

# Evaluación de la integridad de gasoductos en cruces de ríos

Por **Martín Carnicero**,  
Transportadora de Gas del Norte SA

A lo largo de sus 7000 kilómetros de red, Transportadora de Gas del Norte (TGN) enfrenta el problema de garantizar la integridad de los gasoductos a través de los numerosos cruces de ríos distribuidos en todo el país. Para ello, la empresa elaboró un programa orientado a la detección y solución de aquellos cruces de ríos que presentan un riesgo para el funcionamiento del sistema

Trabajo seleccionado en el Congreso sobre Integridad en Instalaciones de Gas y Petróleo

**E**l objetivo de este trabajo consiste en describir la manera en que se genera y procesa la información para decidir si es necesario realizar una obra de protección. Además, se pretende compartir la experiencia adquirida en la ejecución de más de 100 obras de remediación a lo largo de diez años. De esta manera, se podrá evaluar la eficiencia de estas obras respecto de su función principal de protección de gasoductos, al tiempo que se revisarán también los criterios de diseño para respetar los principios básicos de la hidráulica fluvial

## Introducción

Para garantizar la integridad de los gasoductos en todo su sistema, TGN ha implementado un Programa de Cruces de Ríos (PCR). Este programa ofrece las siguientes ventajas:

- Permite conocer los ríos ubicados en ambientes similares.
- Permite confeccionar diseños específicos.
- Evita gastar dinero en obras no apropiadas.
- Ofrece la posibilidad de aprender de los errores y de revisar los criterios y parámetros de diseño.

La asignación de recursos humanos y financieros enfocados en las tareas específicas garantiza un seguimiento de este tema, una de las principales causas de interrupción de transporte de gas en el sistema de TGN cuando ocurren eventos extremos.

## Programa de Cruces de Ríos

El programa consta de las siguientes partes:

**Sistema de monitoreo:** se define un formulario electrónico que se corresponde con un instructivo de monitoreo para poder registrar, a lo largo del tiempo, la evolución de todos los factores naturales y antrópicos que intervienen en un cruce. Se confecciona un listado de los ríos más importantes, y se definen las frecuencias de monitoreo teniendo en cuenta el régimen de lluvias y los eventos extremos.

**Estudios de integridad:** una vez identificado un cruce al cual se deberá adecuar la obra de tendido, se lleva a cabo una serie de relevamientos de campo y estudios de gabinete tendientes a evaluar cómo los procesos erosivos podrían afectar la integridad de un cruce.

**Implementación de obras de remediación:** la información recopilada y elaborada por los estudios de integridad es la base del diseño de las obras de remediación. Estas se configuran a partir de dos documentos: la memoria técnica, que sirve además para obtener los permisos ante las autoridades de aplicación, y la memoria descriptiva de las obras, que es el documento usado para licitar los trabajos en el que se incluye la información de base, planos de detalle, procedimientos constructivos y especificaciones técnicas de los materiales.

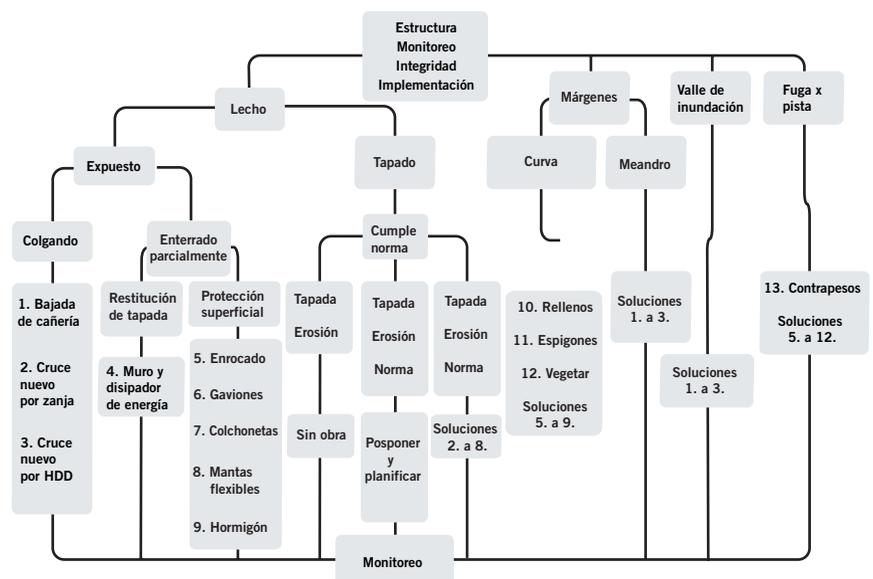
**Confección de una base de datos:** es importante que toda la información referente a los cruces a lo largo del tiempo se guarde en una base de datos que garantice su acceso de manera confiable. La historia de un cruce y el funcionamiento de las obras son factores preponderantes en la toma de decisiones en relación con la alternativa de obra de remediación que debe efectuarse.

**Previsión de recursos financieros mediante un presupuesto anual:** la problemática de los cruces

de ríos está íntimamente relacionada con la comparecencia de fenómenos naturales de muy difícil predicción en cuanto a su magnitud y aparición en el tiempo. Esto implica que van surgiendo nuevas necesidades de adecuación de cruces a medida que avanza la temporada de lluvias. Como consecuencia, impacta de forma directa en cualquier previsión financiera, ya que nuevos trabajos no previstos deben ser abarcados por obras que necesitan ser financiadas, u obras previstas dejan de ser prioritarias, siendo desplazadas por los nuevos acontecimientos. Así, se puede enfocar esta cuestión definiendo dos partes: una programada que se relacione con trabajos preventivos o de carácter proactivo, y otra no programada que atienda las urgencias que surjan puntualmente. La consecuencia lógica de este enfoque es que, a lo largo del tiempo, se parte de un presupuesto básico anual, que, en los años hidrológicamente secos, permite trabajar en forma proactiva y constante. Por otra parte, se ve alterado en los años hidrológicamente húmedos con picos de gastos no previstos.

## Caracterización de problemas en cruces de ríos

En trabajos presentados ante este y otros foros en años anteriores, se elaboró un esquema básico, reproducido



a continuación, de los problemas típicos que se presentan en los cruces de ríos. De allí se desprenden los siguientes casos, y cabe señalar que pueden darse en forma concurrente y combinada. Para cada caso, se agrega una breve descripción de los esfuerzos que actúan sobre la cañería:

**Erosiones en lecho:** en este caso, la situación más crítica se produce cuando el caño se encuentra expuesto y sin apoyo (*free span*), ya que, a los esfuerzos inducidos por la corriente (flexión por arrastre, vibración por vórtices y fatiga), se le suma el peso propio y, eventualmente, los contrapesos. Otras situaciones de menor implicancia son caños expuestos, pero apoyados; y, por último, caños con baja tapada. Es importante aclarar que, desde el punto de vista tensional de la cañería, los caños con baja tapada no sufren esfuerzo inducido. Por este motivo, el problema pasa a ser el de mejor o peor cumplimiento de la normativa de aplicación sin que exista un riesgo real a la integridad del caño.

**Erosiones de margen:** en este caso, puede hacerse una división entre erosiones en márgenes curvas que se corren a lo largo del tiempo manteniendo la geometría del curso y la correspondiente a la formación de meandros, en cuyo caso la posición de las márgenes cambia con el tiempo. Ante la verificación del corrimiento de márgenes, la corriente de agua puede inducir esfuerzos en el cuello de cisne o, si éste no existe, en el tramo en el cual la cañería levanta su posición a medida que se aleja de la margen. Por ello, es muy usual que la cañería quede sin apoyo y se vea expuesta a tensiones de flexión y torsión, ya sea de la corriente de agua misma o del material de troncos, ramas y detritos que se acumulan en la cara aguas arriba del caño.

**Erosiones en el valle de inundación:** en algunas ocasiones, los ríos presentan un cauce principal de mediana envergadura y otros que se activan en las inundaciones de un ancho mucho mayor. Ese curso más ancho se denomina “valle de inundación” y suele caracterizarse por la presencia de vegetación, cauces y brazos inactivos o atrofiados. A veces, el diseño del cruce especial no con-

templa profundidades de la misma magnitud que el cauce principal, por lo que puede verse expuesto. En otras oportunidades, existen cambios en la dirección de la traza dentro del valle por los cuales el agua no escurre en forma perpendicular, sino paralela a la traza. Por consiguiente, se producen eventuales destapes en longitudes significativas.

**Fuga del río por la pista de mantenimiento:** en oportunidades en donde el cauce principal del río se obstruye (colmatación, construcción de dique, estrechamientos, etc.), el agua puede torcer su curso y tomar la pista de mantenimiento como vía preferencial de escurrimiento. Si se producen erosiones en tramos donde el caño fue construido a profundidades cercanas a un metro, es probable que se produzcan destapes en longitudes significativas ante situaciones de crecidas e inundación, con lo que el caño queda destapado y flotando.

**Flujo de detritos:** en zonas montañosas, los ríos poseen una fuerte pendiente del orden del 10% o mayor. Los tipos de escurrimientos en estos ríos van de aguas claras, aguas con sedimentos, crecidas de barro, flujos de detritos e hiperconcentrados, listados en orden de una concentración creciente de sedimentos. La propiedad distintiva es la densidad, que, al ser mayor que la del agua clara, permite transportar todo tipo de materiales, tales como rocas, árboles y ramas. Las tensiones inducidas son de muy difícil cuantificación, pero, a las ya mencionadas en párrafos anteriores, se suman los impactos de grandes rocas y la presión ejercida por la acumulación de troncos y ramas sobre la cara aguas arriba de la cañería.

## Estructura de un estudio de integridad de cruces de ríos

Cuando los relevamientos de campo indican que, en un río, existe una amenaza a la integridad del gasoducto, se decide encarar un estudio de integridad para evaluar el riesgo y la necesidad o no de realizar una obra de remediación, su alcance y su proyección en el tiempo. A continua-

ción, se enumeran las distintas tareas llevadas a cabo en estos estudios.

## Definición de escalas

A los efectos se entender un problema en un determinado cruce, su enfoque debe contemplar el análisis de la información en diferentes escalas:

- **Escala regional:** incluye todos los datos referentes a la cuenca hidrográfica de aportes, tales como sus características geomorfológicas, el uso del suelo, y el régimen de lluvias y caudales del río.
- **Escala local:** se refiere a las dimensiones de la sección del río por donde cruza el caño, la geometría de su lecho, la pendiente, los suelos que forman las márgenes y el lecho.
- **Escala constructiva:** hace referencia a las características constructivas del cruce del gasoducto propiamente dicho, tales como su tapada original, si tiene contrapeso, el espesor de la cañería, la ubicación del cuello de cisne o el tramo de bajada y subida de la cañería en las acometidas al cauce.
- **Escala temporal:** como en toda obra de infraestructura, la determinación de la recurrencia o del período medio de tiempo entre dos eventos fija el alcance de los estudios y del correspondiente diseño. TGN utiliza para sus proyectos de remediación una recurrencia de 50 años, que se aplica a caudales o tormentas de lluvia en cuencas no aforadas. Sin embargo, cabe aclarar que la capacidad de los cauces suele ser sobrepasada para recurrencias menores, de alrededor de dos a cinco años.

## Partes del estudio

- **Estudios hidrológicos:** el objetivo principal es calcular el caudal de diseño para la recurrencia asumida. Para ello, se efectúa un inventario de datos en la región, específicamente imágenes satelitales, cartas topográficas y caudales, o, en su defecto, lluvias, que es el caso más frecuente, dado que pocos ríos se encuentran aforados. De las imágenes satelitales y cartas topográficas, se obtienen las características de la cuenca, tales como superficie, pendiente, número de tributarios y tiempo de concentración. En caso de caudales disponibles, se efectúa un análisis estadístico de eventos extremos (máximos anuales), donde se asigna un

período de retorno a cada valor para poder elegir aquel correspondiente a 50 años. De lo contrario, se infiere el caudal a partir de la lluvia mediante la definición de una tormenta de diseño y un modelo de lluvia-escurrimiento superficial, cuyo resultado es el hidrograma de crecida (caudal frente a tiempo). Se trata de usar modelos matemáticos de dominio público que permitan actualizar sus datos a lo largo del tiempo, por ejemplo, cambios en el uso de suelo, inclusión de tormentas registradas u otro dato que afecte el caudal de diseño.

- **Estudios topográficos:** se realizan en la sección del cruce, en una longitud aproximada de 400 metros con centro en el eje del gasoducto. De él se extraen el ancho, la pendiente del lecho, la altura de las márgenes, y las características del valle de inundación y de la geometría del río. Es muy importante georreferenciar la topografía a un único sistema de referencia para poder comparar distintos relevamientos a lo largo del tiempo. Dentro de su alcance, deben incluirse las secciones de control dadas por puentes, alcantarillas y demás condicionantes del escurrimiento del agua.
- **Estudios hidráulicos:** una vez obtenido el caudal de diseño, se procede a calcular la capacidad de transporte de agua que tiene el río en la sección del cruce. Para ello, se emplean modelos numéricos de flujo en canales abiertos de donde se obtiene la elevación a la que alcanza el agua y su distribución de velocidades a lo ancho del río. Al igual que en la modelación hidrológica, se trata de usar modelos matemáticos de dominio público que permitan actualizar sus datos a lo largo del tiempo, por ejemplo, cambios en la topografía del río u obras de infraestructura construidas.
- **Estudios geotécnicos:** dadas las características geológicas de cada río, se observan distintas disposiciones de suelos en las márgenes y en el lecho, de donde se toman muestras y se realizan ensayos. Los ensayos de laboratorio son granulometría, densidad natural y óptima, límites de Atterberg y, por último, triaxiales para el caso de la estabilidad de

márgenes altas. El de penetración normal se efectúa principalmente in situ. Estos datos también sirven para los cálculos de control de erosión y, en la construcción de las obras, para que los contratistas evalúen el rendimiento de la maquinaria de movimientos de suelos por emplear en la remediación.

- **Medición de tapada:** uno de los parámetros más importantes en la evaluación del riesgo asociado a los cruces de ríos es la tapada de suelo existente. Se efectúa por medio de

un instrumento especial, y el resultado que debe obtenerse es el perfil continuo con puntos del caño con coordenadas x, y, z del terreno y la tapada a lo largo de todo el cruce. Por lo general, se realiza en conjunto con la topografía para referenciar los puntos de medición de tapada y conocer la traza con exactitud. Este dato es de relevancia durante las obras para evitar impactos en las excavaciones.

- **Estudios de socavación:** estos estudios se dividen en dos partes.

La socavación en profundidad se evalúa por medio de fórmulas empíricas o semiempíricas, donde, en función de la velocidad y del suelo del lecho, se calcula la profundidad de erosión, que se compara con la mínima tapada existente. Sin embargo, otra manera de analizar la erosión en márgenes y en el lecho en forma cuantitativa es por comparación de imágenes satelitales y fotografías aéreas georeferenciadas tomadas en distintas fechas, relevamientos topográficos sucesivos y monitoreos anuales de campo.

## Análisis de riesgo

El análisis de riesgo se ha vuelto una disciplina de gran importancia para la planificación de las actividades de operación y mantenimiento de ductos. Existe una gran variedad de *software* que realiza su evaluación de manera semicuantitativa tomando como base tanto la afectación que resulta de un escenario de rotura como la probabilidad de ocurrencia. En la práctica, en TGN se realiza una evaluación amplia que abarca toda la información recabada en el estudio de integridad y se la combina con la historia de adecuaciones de un cruce, más la experiencia acumulada por personal especializado. En general, el problema de los ríos se ha originado por obras menores de adecuación, y, en segundo lugar, por obras mayores y cruces nuevos. Esta cronología de hechos constituye un factor de peso al momento de decidir los trabajos que deben realizarse.

Es importante aclarar que los cálculos de erosión basados en fórmulas deben ser tomados solo como valores referenciales, ya que las hipótesis sobre las que se parte no siempre se cumplen en la realidad o son desconocidas.

Por ello, no es conveniente realizar un análisis de riesgo basado únicamente en comparaciones de la tapada real contra la calculada luego de la erosión. En muchas ocasiones, la erosión se detiene solo cuando se encuentra un estrato más resistente de suelo y no como consecuencia de un aumento de la sección de escurrimiento.

Existen trabajos que toman este criterio de manera aislada, lo que da como resultado un enfoque conservador cuyo cumplimiento en sistemas

de miles de kilómetros implicaría grandes erogaciones incompatibles con valores realistas. Es recomendable que, independientemente del criterio que se siga, se efectúe un análisis de tensiones para evaluar el nivel de riesgo efectivo que se tienen sobre la cañería.

## Casos prácticos de obras de remediación: teoría y experiencia de funcionamiento

A continuación, se tratará de exponer los casos más representativos que surgen de la aplicación del Programa de Cruces de Ríos por diez años y más de 100 obras de adecuación. El propósito es dar un sustento teórico a cada una de las soluciones y compartir la experiencia acumulada, que incluye detalles constructivos y eficiencia en el funcionamiento de cada alternativa.

### Bajada de cañería por flexión de su peso propio

Como consecuencia de la erosión de lecho durante las crecidas, los gasoductos aparecen expuestos parcialmente o sin apoyo (*free span*). Si se elige la alternativa de bajada de cañería como solución, surge la pregunta de a qué profundidad debería bajarse. En general, los cálculos se hacen usando la fórmula desarrollada por Litchvan-Lebediev, que se adjunta a continuación:

$$(1) \quad h_s = \left[ \frac{\alpha * h_0^{\frac{5}{3}}}{0,68 * \beta * \mu * \phi * d_m^{0,28}} \right]^{1+x}$$

- Siendo:
- hs: profundidad después de la socavación
  - ho: profundidad inicial en régimen uniforme
  - dm: diámetro promedio de las partículas del material del lecho
  - $\alpha$ : factor de corrección para la distribución del flujo en la sección transversal
  - $\beta$ : coeficiente de período de retorno
  - $\mu$ : coeficiente de contracción de flujo
  - $\phi$ : coeficiente de densidad que considera la carga de sedimentos
  - X: depende del tamaño de la partícula del material del lecho

Sin embargo, esta fórmula se basa en la hipótesis de que, una vez que la sección transversal de escurrimiento se agranda por la erosión, la velocidad del agua disminuye y la socavación se detiene. No obstante, si los suelos son finos y no cohesivos, la profundidad calculada no es representativa y la erosión progresa sin cesar hasta encontrar un estrato de suelo más duro. Se puede dar el caso de que, una vez bajada la cañería, se destape otra vez.

Entonces, la bajada de cañería debe ser combinada con una protección superficial, lo que aumenta los costos de las obras de adecuación. En otros casos, la pérdida de tapada no está asociada a la erosión, sino a la sobreexcavación de canales existentes para darle mayor capacidad. Esto sucede con los canales de drenaje de agua en la pampa húmeda, donde se cultiva soja en terrenos inundables cuyas pendientes son bajas.

Esta alternativa es una solución válida si existe suelo cohesivo o un estrato geológico que pueda detener la erosión a una profundidad dada no por cálculos, sino por su ubicación natural. En caso contrario, debe implementarse una protección de lecho para controlar la erosión, que también sirve como protección mecánica contra eventuales impactos de equipos de excavación, por ejemplo retroexcavadoras. Como el proceso de bajada de cañería se basa en la flexión natural, la excavación de la zanja se realiza por grandes longitudes mayores a los 100 metros. Por lo tanto, el costo de esta solución es mayor, especialmente donde hay más



Figura 1. Cañería descendida





Figuras 2 a 4. Cañerías expuestas, protección superficial después del descenso

de un caño ubicado uno al lado del otro debido a que las dimensiones de las zanjas son muy anchas para garantizar su estabilidad. El transporte de gas nunca es interrumpido y puede programarse con tiempo para que el acondicionamiento de presiones tenga un impacto mínimo.

### Perforación dirigida

La perforación dirigida ofrece la alternativa de ubicar el gasoducto a grandes profundidades, que suelen ser mayores a diez metros del lecho. En el sistema operado por TGN, los cruces dirigidos se efectúan en ríos donde los caudales permanentes impiden la excavación de una trinchera. Allí, las altas velocidades alcanzadas por el agua inhabilitan el uso de los materiales de control de erosión, como colchonetas, gaviones o mantas con dados de hormigón. Asimismo, se efectúan en cruces afectados por flujos de detritos en ríos de montaña o al pie de esta.

Al igual que en el caso anterior, la profundidad del cruce debe ser cuidadosamente estudiada por medio de ensayos de suelos y cálculos de la profundidad de socavación. En algunos casos, la disponibilidad de una máquina perforadora puede llegar a

ser un factor importante al momento de decidir si realizar o no este tipo de cruce, especialmente por el costo que implica traer una máquina del exterior. El ancho del río también puede ser un factor limitante, ya que, a mayor ancho, mayor deberá ser la potencia de



Figuras 5 y 6. Máquina perforadora y pileta de lodos bentoníticos



la máquina perforadora. Asimismo, en ríos con presencia de grandes piedras o bochones, es posible que no represente una alternativa viable.

En cuanto a esta solución, se recomienda que, si la erosión en suelos finos no cohesivos es el problema que afecta al cruce, entonces debe existir un estrato de suelo más consolidado o resistente para que sea factible. En una situación de emergencia, ofrece una alternativa rápida para construir un cruce nuevo, si hay una máquina disponible. Es importante considerar el tiempo de compra de la tubería, ya que debe ser de un espesor considerable para resistir los esfuerzos de flexión durante las maniobras de perforación y tendido. El transporte de gas es afectado solo en las maniobras de conexión del nuevo cruce con el gasoducto.

### Cruces aéreos

Cuando los gasoductos quedan expuestos, una solución que se ha implementado durante años en ríos

de pequeño ancho es la construcción de muros transversales con un cuenco disipador de energía a resalto hidráulico. Su funcionamiento ha sido bueno en años secos o normales siguiendo las reglas de la hidráulica clásica.

Lamentablemente, en tormentas intensas, escurren por el río deslizamientos de laderas en las sierras que afectan obras de infraestructura, como puentes y cañerías. Toman la forma de flujos densos que acarrear grandes piedras y troncos. Con el tiempo, la presión ejercida sobre la cañería puede llevar a una rotura.

Siguiendo un enfoque cuantitativo, las variables más importantes por determinar son la carga de sedimentos y la tensión de corte ejercida por el flujo. La primera de ellas aumenta desde aguas claras (menor al 20% en volumen), crecidas de barro con un rango que va del 20% al 40% en volumen, hasta flujos hiperconcentrados con un valor cercano al 50%. Las mayores concentraciones tienen la capacidad de movilizar grandes



Figura 7. Flujo de detritos en ríos de montaña



Figura 8. Troncos y ramas sobre gasoducto

bloques de piedras. Los flujos hiperconcentrados se comportan como fluidos no newtonianos, donde la tensión de corte tiene cuatro componentes debido a cohesión, viscosidad de la mezcla, turbulencia y colisión entre partículas grandes. Construir



Figura 9. Cruce aéreo de 200 m de luz



Figura 10. Cruce aéreo de 110 m de luz

De acuerdo con manuales de hidráulica de canales abiertos, el cálculo de la longitud del cuenco disipador de energía sigue un procedimiento básico que se basa en experiencias de laboratorio. Sin embargo, según nuestra experiencia, en los ríos con suelos no cohesivos, la velocidad de agua al final de la pileta es todavía lo suficientemente alta para erosionar aguas abajo.

una obra hidráulica capaz de que sea lo suficientemente fuerte como para soportar estos esfuerzos lleva a valores de inversión mucho mayores que los correspondientes a cruces aéreos.

Independientemente del tipo de flujo que pase por el río, es mejor que el cruce no se oponga a dichas fuerzas de la naturaleza para incrementar las probabilidades de que dure más tiempo en operación.

Cuando el costo de un cuenco disipador o un cruce dirigido es muy alto, el cruce aéreo presenta una opción más económica. También, elimina la incertidumbre asociada a los posibles esfuerzos que tendría que soportar una obra de adecuación frente a los flujos densos. Debe tenerse especial cuidado en la ubicación de las torres, lejos de la amplitud de los meandros, y también en su altura.

Una desventaja es que este tipo de cruce está muy expuesto a acciones de robo y vandalismo en lugares aislados. Deberá considerarse el tiempo de compra de la tubería de espesor especial.

### Diques transversales con cuencos disipadores

Una vez que se expone una tubería, una solución muy popular es elevar el lecho del río para que los sedimentos decanten hasta que la tubería quede cubierta para crear un salto hidráulico aguas abajo. Los problemas típicos de esta solución radican en el ingreso: hay que asegurarse de que no pase agua por el costado de la estructura y al final aguas abajo, donde no puede controlarse la erosión en la transición entre el final de la obra y el lecho del río.

$$(2) \quad \frac{y_2}{y_1} = \frac{1}{2} \left( \sqrt{1 + 8F^2} - 1 \right)$$

$$(3) \quad F_1 = \frac{V_1}{\sqrt{gy_1}}$$

Siendo:

$y_2, y_1$ : profundidades aguas arriba y abajo del resalto

$F$ : número de Froude de entrada

$V_1$ : velocidad de entrada

Por lo tanto, durante años normales o secos, este esquema funciona bastante bien, aunque un segundo salto comienza a formarse al final del cuenco disipador. Nuestros esfuerzos para controlar la erosión al final de la pileta disipadora de energía incluyeron revestimiento de escollera y un diseño típico con bloques de hormigón para disipar la turbulencia dentro del cuenco. Por desgracia, la erosión aguas abajo creció con el tiempo, y la necesidad de un segundo cuenco de disipación resultó necesaria. Luego de producirse una crecida o un flujo de detritos, el salto o la diferencia de nivel entre el lecho y los caños creció a diez metros. Por ello, la magnitud de las obras de adecuación dentro de este esquema de saltos y cuencos y su costo se tornaron excesivos sin que además garantizaran su estabilidad en el tiempo. Por ello, se requería una solución conceptual diferente, como cruce dirigido o aéreo, por competir en precio y ofrecer una solución más segura.

Recomendaciones para esta solución: estos diques transversales son apropiados para pequeños caudales con agua clara y donde el material del lecho es grueso. Debe tenerse cuidado a la hora de extender el cuenco de disipación para una longitud significativamente mayor que la proporcionada por los ensayos de laboratorio y manuales de diseño. Es necesario evitar que el agua pase por los costados de la estructura en la entrada y por debajo, ya que el flujo subterráneo también existe. Estas estructuras no están diseñadas para recibir entradas de agua laterales, que también pueden ser causa de falla si no se controlan. A medida que el tamaño de la estructura crece, debe realizarse un análisis de costo preciso para comparar este esquema frente a

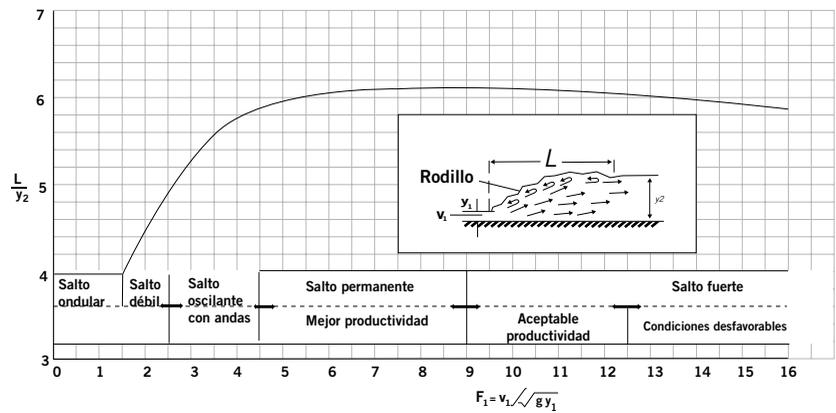


Figura 11. Cálculo de la longitud del resalto hidráulico

otras soluciones, como cruces aéreos o dirigidos, si los tubos están expuestos o sin apoyo. En ocasiones, es más conveniente una serie de saltos pequeños que uno grande.

### Protecciones de lecho

En nuestro sistema, se instalaron cinco tipos diferentes de protección, que se caracterizan por ser flexibles y, en algunos casos, incorporan peso y garantizan su estabilidad. Se enumeran en un orden de menor a mayor grado de sofisticación de los revestimientos: protección de escollera, colchonetas de piedra encanastada, bloques de hormigón fijados a un geotextil, protección mecánica de hormigón armado y mantas de refuerzo de vegetación (*Turf Reinforcement Mattress: TRM*).

En teoría, los parámetros básicos que se utiliza para seleccionar la mejor alternativa están dados por la velocidad y la tensión de corte. La velocidad en régimen uniforme y permanente está definida por la fórmula empírica de Manning:

$$(3) \quad V[m/sec] = \frac{1}{n} R^{\frac{2}{3}} \sqrt{S}$$

Donde:

$n$ : coeficiente de rugosidad

$R$ : radio hidráulico (perímetro mojado/sección transversal)

$S$ : pendiente de la línea energía, aunque normalmente se usa la del río

Luego, simplemente por comparación, se procede a cotejar la velocidad calculada en el río contra la que puede resistir un determinado tipo de revestimiento, dada por ensayos su-

Figuras 12 a 15. Ejemplos de cuencos disipadores





ministrados por los proveedores.

La distribución del esfuerzo cortante en un canal trapezoidal rectilíneo muestra que, en la parte inferior de las márgenes, se encuentran valores máximos, casi uniformemente distribuidos en el lecho del río. Las variables que intervienen en la magnitud de valores del esfuerzo cortante son profundidad ( $y$ ), peso específico del agua ( $w$ ) y pendiente del canal ( $S$ ).

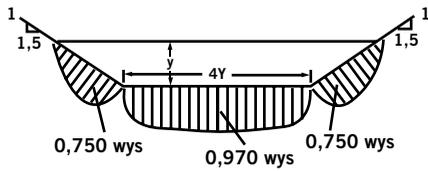


Figura 16. Distribución de esfuerzos de corte en la sección transversal de un canal rectilíneo

Siendo:

$y$ : profundidad

$w$ : peso específico del agua

$S$ : pendiente del río

Al igual que en el caso anterior, por comparación, se procede a co-tejar el valor del esfuerzo cortante calculado en el río contra el que puede resistir un determinado tipo de revestimiento, dado por ensayos suministrados por los proveedores. Sin embargo, cada material sigue un procedimiento de cálculo diferente. El cálculo de la escollera se basa en el tamaño de la roca, que es lo suficientemente grande para permanecer

estable por su propio peso contra el arrastre y empuje del agua. Debe tenerse cuidado al examinar la carga de sedimentos, ya que aumenta la densidad del agua y disminuye la estabilidad de la protección. El diámetro medio del enrocado viene dado por la ecuación:

$$(5) \quad D_{50} = 0,001 \left( \frac{V_a^3}{d_{avg}^{0,5} K_1^{1,5}} \right)$$

Siendo:

$D_{50}$ : mediana del tamaño de partícula de la escollera

$V_a$ : velocidad promedio en el canal principal

$d_{avg}$ : profundidad promedio en el canal principal

$K_1$ :

- Factor que depende del ángulo que forma la margen con la horizontal.
- Ángulo de reposo del material de escollera.
- Factores de corrección: régimen del escurrimiento, olas, turbulencia, detritos y peso específico.

Aparte de este parámetro, es importante que el enrocado tenga piedras más grandes y más pequeñas para que llene los espacios intermedios y provea trabazón entre ellas. También debe considerarse la disponibilidad, el tamaño y el transporte de la piedra, ya que afectan el costo de esta solución, que en principio parece ser bajo.



Figuras 17 y 18. Ejemplos de revestimientos de escollera

TGN aplica esta solución en los ríos que tienen una amplia sección transversal, donde la velocidad no se concentra, y cuando los sedimentos finos llenan el espacio de poro del material graduado. Por otro lado, cuando se usó en ríos estrechos con altas velocidades, la escollera fue arrastrada aguas abajo después de la primera crecida.

Las colchonetas de piedra encanastadas ofrecen una alternativa que ha sido implementada con éxito. Operan a una amplia gama de velocidades que



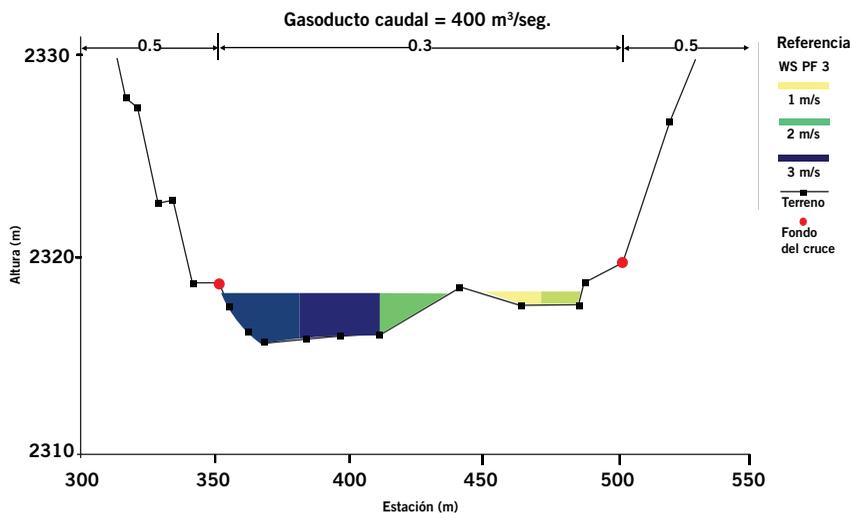


Figura 19. Distribución de velocidades calculada para la sección del cruce

Tab. 2 - Espessuras indicativas dos revestimentos em colchões Reno e gabões em função da velocidade da correnteza.

Tab. 2 - Indicative Reno Mattres and gabion thickness in relation to water velocities

Tab. 2 - Espesores indicativos de los revestimientos en colchones Reno y en gaviones en función de la velocidad de la corriente

Tipo Type Tipo	Espessura Thicknees Espesor m	Pedras de enchimento Filling stones Pedrisco de relleno		Velocidade crítica Critical velocity Velocidad crítica m/s	Velocidade limite Limit velocity Velocidad limite m/s
		Dimensões Stone size Dimensiones	d <sub>50</sub>		
Colchões Reno Reno mattress Colchones Reno	0,15 e 0,17	70 a 100	0.085	3,5	4,2
		70 a 150	0.110	4,2	4,5
	0,23 e 0,25	70 a 100	0.085	3,6	5,5
		70 a 150	0.120	4,5	6,1
0,30	70 a 120	0.100	4,2	5,5	
	100 a 150	0.125	5,0	6,4	
Gabões Gabions Gaviones	0,50	100 a 200	0.150	5,8	7,6
		120a 250	0.190	6,4	8,0

Figura 20. Tabla provista por el fabricante con velocidades admisibles

alcanzan los 5 m/seg., sin deformación excesiva, y hasta 6,4 m/seg. como límite para un espesor de 30 cm.

Los sedimentos finos llenan el espacio entre las piedras y aumentan el peso por unidad de área. Como desventaja, esta solución necesita mano de obra intensiva, que últimamente ha incrementado su costo, y está sujeta a robo en lugares aislados.

Los bloques de hormigón fijados en un geotextil trabajaban satisfactoriamente en condiciones normales. La vinculación se produce por medio de pins o rulos en el cuerpo de la manta. El problema radica en la definición de la altura del bloque. El cálculo se realiza mediante una fórmula que incorpora un número de coeficientes empíricos difíciles de evaluar. El cálculo de la altura del bloque se efectúa por medio de la ecuación de Pilarczyk.

$$(6) \Delta D_n = \left( \frac{0,035}{\Psi_{cr}} \right) \Phi_s K_b K_s^{-1} K_t \left( \frac{U^2}{2g} \right)$$

Donde:

- $\Delta D_n$ : altura del bloque
- $\Psi_{cr}$ : factor que considera el inicio del movimiento de la partícula
- $\Phi_s$ : factor de estabilidad
- $K_h$ : considera la profundidad del flujo y la rugosidad del material del lecho
- $K_s$ : considera la pendiente de la margen y el ángulo de reposo del material
- $K_t$ : factor de turbulencia
- $U$ : velocidad media a lo largo de la vertical en el canal principal

En la práctica, los bloques de hormigón operan bien durante los años normales. Durante crecidas importantes, se ha superado su estabilidad quedando enrollado el geotextil junto con los bloques de hormigón conectados. TGN todavía utiliza esta alternativa en lugares donde no hay piedras disponibles para usar colchonetas y, además, porque la instalación es más rápida. También se

colocan en el caso de que exista tráfico vehicular por el cauce del río, en la sección del cruce. Los bloques de hormigón pueden ser colados in situ, aunque la calidad de las mantas no es la misma en comparación con las construidas en una fábrica en condiciones controladas.

Una alternativa exitosa para el caso de una tubería descubierta parcialmente en su parte superior es la que combina una protección mecánica de hormigón armado alrededor de la tubería con mantas colocadas aguas abajo para controlar la turbulencia generada. La cubierta de hormigón armado sigue un perfil hidráulico que se usa en la cresta de los vertederos.

La ventaja de esta solución reside en que no se crea un salto y la intrusión de la cresta de hormigón es mínima. Si existen sedimentos finos, estos sedimentan aguas arriba de la cresta. Otra propiedad de esta solución es que el hormigón ofrece una protección robusta contra flujo de detritos, especialmente de piedras grandes. Una vez más, se debe extender la protección aguas debajo de la cresta lejos de la cañería para hacer frente a la transición con material del natural del lecho.

Por último, se implementó una "solución verde" con mantas geotextiles de refuerzo de vegetación (*Turf Reinforcement Mattres: TRM*), que constan de un número de capas



Figuras 21 y 22. Ejemplos de colchonetas antes y después de su colocación





Figura 23. Colocación de mantas



Figura 25. Coraza de hormigón



Figura 26. Obra en funcionamiento



Figura 24. Mantas con bloques deformados

y cuadrículas de geosintéticos (o material biodegradable) que pueden resistir velocidades de agua hasta 5,5 m/seg. Este material favorece la revegetación aumentando su vida útil y fundiéndose con el medio ambiente. Los criterios de diseño son, al igual que las colchonetas, las velocidades calculadas y las tensiones de corte.

TGN utiliza este material en lugares donde la vegetación natural crece fácilmente y cuando la protección mecánica del caño no es prioritaria.

### Protecciones de margen

Las alternativas son similares a las descritas en el capítulo anterior en términos de materiales, a pesar de que las estructuras de control varían según cada caso en particular. Una vez más, se identificaron cinco casos: protección de escollera, colchonetas de piedra encanastada, muros de gaviones, espigones y geotubos. En teoría, uno de los principales factores que afectan a la erosión de márgenes es la geometría del río, específicamente su curvatura y el ancho. Esto condiciona la magnitud del impacto de la velocidad del agua en la orilla. Conocido es el hecho de que, debido a las fuerzas centrífugas, las velocidades mayores se concentran hacia la orilla cóncava. Así, se origina un proceso de erosión en esa margen y sedimentación en la curva convexa opuesta dada la existencia de corrientes secundarias.

Según la curvatura, un corte

transversal típico podría cambiar de forma de "v" a uno más rectangular. En cualquier caso, se debe considerar que el mayor esfuerzo cortante tiene lugar en la intersección entre la margen y el lecho. Por lo tanto, es tan importante para la estabilidad de la margen proteger su cuerpo como su pie o zona más profunda en el lecho para evitar el colapso por desmoronamiento. La selección del material que debe emplearse se basa en qué tan fuerte o robusta debe ser la protección.

La protección de escollera es una solución simple y asequible cuando las piedras están fácilmente disponibles en el sitio. Los detalles de diseño incluyen una curva granulométrica bien graduada para proporcionar peso y tamaños más pequeños para rellenar el volumen de poros dejado por las partículas más grandes.

También se debe hincar un pie en el lecho y colocar un geotextil para separar y filtrar la escollera de los materiales naturales de lecho y margen.

TGN obtuvo buenos resultados en los ríos que tienen curvaturas leves, geometrías rectilíneas y anchos considerables.

Las protecciones de colchonetas de piedra encanastada son una solución confiable para ríos que ofrecen anchos considerables y curvas suaves. En líneas generales, este tipo de sección transversal no puede dar cabida a las crecidas, y las inundaciones indefectiblemente suceden. Por lo tanto, deben extenderse en la parte superior de la sección transversal para convivir con las inundaciones y también, como se mencionó antes, desde el extremo más profundo de la margen a lo largo del lecho del río para evitar el colapso a sus pies por erosión.

Comportamiento de mantas geotextiles "Landlok". Unidades inglesas y métricas

Material	Duración eficiente	Valores máximos de velocidad y tensiones de corte durante plazos cortos						Tamaño S "n"		
		Reforzo de vegetales						0"-6"	6"-12"	12"-24"
		Total <sup>a,7</sup>	Parcial <sup>a</sup>		Sin vegetación <sup>a</sup>					
LANDLOK 450	Permanente	10 lb / ft <sup>2</sup> 479 N / m <sup>2</sup>	18 ft / sec 5.5 m / sec	8 lb/ft <sup>2</sup> 383 N/m <sup>2</sup>	15 ft/sec 4.6 m/sec	5 lb/ft <sup>2</sup> 239 N/m <sup>2</sup>	12 ft/sec 3.7 m/sec	0.035	0.025	0.021
LANDLOK 1051	Permanente	10 lb / ft <sup>2</sup> 479 N / m <sup>2</sup>	18 ft / sec 5.5 m / sec	n/a	n/a	5 lb/ft <sup>2</sup> 239 N/m <sup>2</sup>	12 ft/sec 3.7 m/sec	0.036	0.026	0.020
LANDLOK 300	Permanente	12 lb / ft <sup>2</sup> 576 N / m <sup>2</sup>	20 ft / sec 6.1 m / sec	-	-	-	-	0.030	0.028	0.018

Tabla de velocidades y tensiones de corte admisibles para TRM



Figura 27. Revestimiento de TRM



Figura 28. TRM revegetado



Una regla es extender horizontalmente un mínimo de cuatro veces la altura de la protección de margen. Entre los detalles constructivos para tener en cuenta, se incluyen las transiciones de escollera entre la parte ascendente de la colchoneta y la margen natural para evitar que el agua pase por atrás de la estructura y aguas abajo para minimizar la erosión al final de la protección. Allí, la margen natural está sujeta a la erosión. Además, se recomienda un ángulo de pendiente suave para dar estabilidad a la colchoneta y disminuir la tensión de corte.

Los muros de gaviones presentan una alternativa más robusta para los ríos con un corte transversal sesgado en forma de "v", curvas cóncavas profundas y sedimentación en la orilla opuesta. Por lo general, están asociados con curvaturas mayores. Como se mencionó antes, debe colocarse una colchoneta de longitud generosa en el lecho del río desde el pie del muro para evitar el colapso de la pared de gaviones. Entre los detalles de construcción, deben incluirse los espigones aguas arriba y aguas abajo para evitar que el agua pase por detrás del muro, así como las transiciones de escollera en ambos extremos.

Los espigones son una solución muy popular, aunque su diseño no es una tarea sencilla. En general, cuando los márgenes curvos se extienden a cierta distancia (más de 100 m, como un número tentativo), resulta muy costoso proteger toda la extensión.

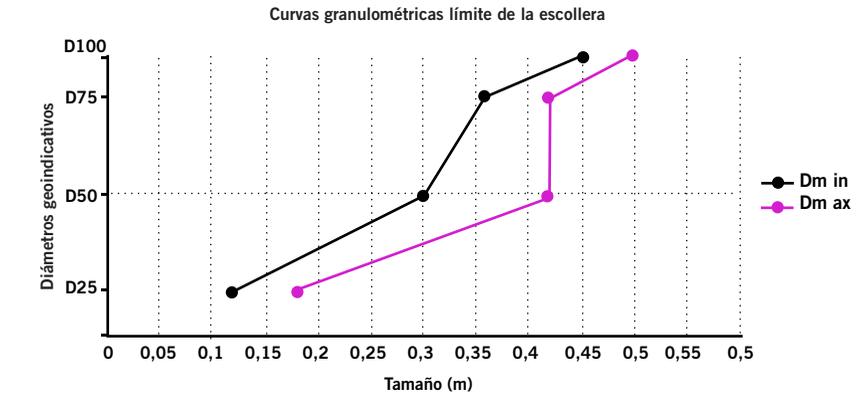


Figura 32. Curva granulométrica de la escollera

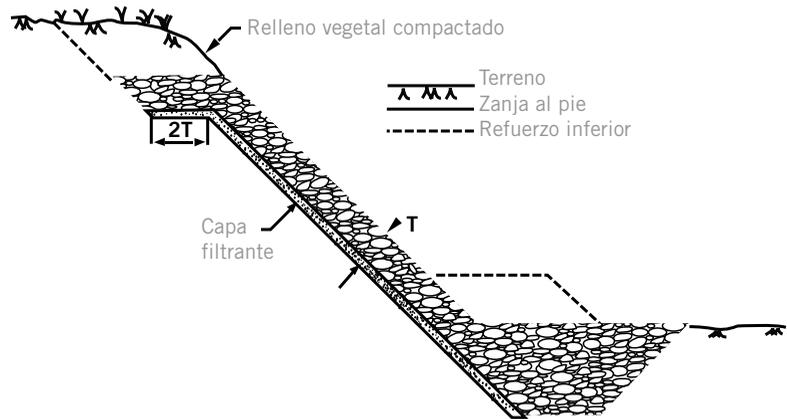
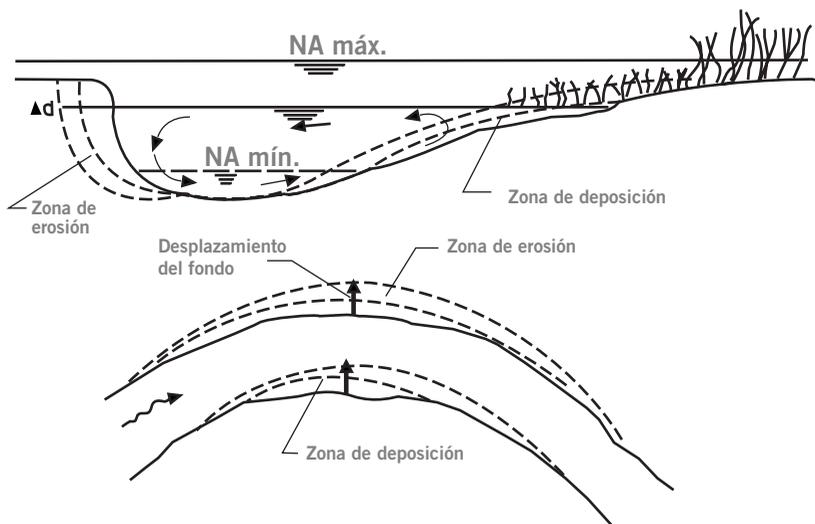


Figura 33. Esquema de protección de margen

Por lo tanto, un número discreto de espigones ofrece una alternativa más económica. La curvatura y el ancho del río son las principales variables utilizadas en la definición de la longitud, el espaciamiento y la orientación

de los espigones. Las reglas de diseño se basan en experiencias de campo y de laboratorio. La experiencia de TGN con estas estructuras incluye espigones de troncos y de gaviones sobre colchonetas. Los espigones de troncos han brindado protección solo a corto plazo y, según cómo son construidos, ninguna protección da resultado si el espaciamiento entre los troncos es grande.

Para superar este problema, los espigones de gaviones puestos sobre una colchoneta de piedra encanastada han proporcionado una solución de más largo plazo, incluso después de deformación severa o parcial. Entre los detalles de diseño, deben incluirse la definición de la longitud de la estructura tanto hacia adentro (empotramiento) como hacia afuera de la margen, orientación, una elevación descendente hacia el centro del río, contrafuertes o refuerzos para evitar el volcamiento y una colchoneta en la base para distribuir su peso. En ríos con sedimentos finos, este último



Figuras 30 y 31. Sección transversal y planta de una curva



Figura 34. Protección de margen



Figura 35. Esquema terminado de escolleras y colchonetas



Figura 36. Protección de margen con colchonetas

aspecto es muy importante para evitar el hundimiento de la estructura.

Últimamente, se han implementado protecciones de márgenes con geotubos, que proporcionan una alternativa a las protecciones de muros de gaviones y colchones. Consisten en una bolsa de geotextil rellena de suelo. En un principio, fueron creados para utilizarse en ríos arenosos, y el procedimiento de llenado involucraba el bombeo de una mezcla de agua y sedimento por refulado. Sin embargo, nuestra experiencia se basó en suelo local.

La idea es disminuir los costos asociados con el transporte de piedra y la mano de obra intensiva necesaria para llenar los gaviones y colchones. Por lo general, se complementa con una capa de hormigón para proteger los geotubos contra impacto de árboles, ramas y robo por vandalismo. Aún queda determinar el rendimiento de largo plazo de este tipo de obra, que depende de las características de las temporadas de lluvias futuras.

### Fuga del río por la pista de mantenimiento

Cuando los ríos abandonan el ambiente montañoso y llegan a las llanuras, viajan con pendientes muy leves. Cada año, se producen



Figura 37. Derrumbe por erosión al pie

inundaciones en su valle, ya que sus secciones transversales se colmatan por el depósito de sus sedimentos finos. En estas condiciones, la pista del gasoducto ofrece una ruta de escurrimiento preferencial al agua, cuando los ríos se encuentran obstruidos, y produce una erosión a lo largo de la tubería. Así, la flotabilidad de la tubería se convierte en un problema cuando involucra largas distancias. Ocasionalmente, el agua sigue su curso por caminos rurales, aislando a pequeños poblados, y paga un costo social importante, ya que este problema suele asociarse con el caño que flota. TGN ha intentado dos enfoques diferentes. En una situación de emergencia, se realizó un cruce dirigido para hacer frente a las napas de agua elevadas producto de las inundaciones que imposibilitaban la excavación de la zanja. Como complemento, en un enfoque más proactivo, se instalaron una serie de contrapesos por unos pocos kilómetros en el valle de inundación.



Figura 38. Muro de gaviones y espigones de transición



Figura 39. Muros de gaviones en ambas márgenes



Figura 41. Espigones tipo "patas de gallo"



Figura 42. Relleno y cierre de geotubos



Figura 40. Espigones de gaviones



Figura 43. Obra terminada con gunitadobos



Figura 44. Tubería flotando



Figura 45. Colocación de contrapesos

## Conclusiones

TGN ha abordado el tema de los cruces de ríos como un problema relevante dentro de su Departamento de Integridad. Durante los últimos años, se ha implementado un número considerable de obras de remediación para reflejar este compromiso. Se elaboró un esquema básico para caracterizar los problemas asociados con cruces a fin de proporcionar un enfoque sistemático. Sin embargo, como es una actividad que depende de los ciclos naturales, la información recolectada sobre el funcionamiento de las obras existentes es decisiva. Por lo tanto, el monitoreo periódico de campo alimenta el esquema original y permite realizar ajustes permanentes teniendo en cuenta cada estación lluviosa que se presenta año tras año.

La experiencia recopilada por TGN en estos años puede sintetizarse de la siguiente manera:

1. Crear la estructura con los medios profesionales y físicos para imple-

mentar un Programa de Cruces de Ríos con todos sus componentes.

2. Proveer los recursos financieros para responder a dos partes: una planificada, que se corresponde con un enfoque proactivo de prevención, y otra aleatoria, que depende de los eventos de lluvia y crecida extremos ante los cuales hay que responder de manera imprevista.
3. Implementar un sistema de monitoreo frecuente para evaluar los cambios naturales en la morfología de los ríos, en la sección del cruce, las intervenciones antrópicas y el funcionamiento de las obras.
4. Realizar una lectura correcta de lo que la naturaleza está tratando de decir, según el tipo de escurrimiento en cada cruce (agua clara, crecidas de barro, flujo de detritos o hiperconcentrados).
5. Tratar de oponerse lo menos posible a las fuerzas naturales diseñando obras de adecuación que tengan un impacto mínimo en el

escurrimiento del río.

6. Considerar los principios de la hidráulica que no pueden ser dejados de lado como una manera de extender la vida útil de un cruce.
7. Relacionar el funcionamiento de las obras de adecuación con las características de los años hidrológicos para calcular de manera realista cuánto tiempo puede durar.
8. Ofrecer alternativas igualmente válidas desde el punto de vista técnico que pueden cambiar su prioridad por razones económicas, según el peso relativo de factores tales como mano de obra o materiales. ■

