

ANÁLISIS HIDROMORFOLÓGICO Y SOLUCIÓN INGENIERIL PARA EL CRUCE DEL POLIDUCTO REPSOL-YPF SOBRE UN TRAMO DEL RÍO CUARTO (CÓRDOBA, ARGENTINA)

Corral Mariano, Castello Edgar, Gerbaudo Carlos, Hillman Gerardo, Plencovich Gonzalo,
Ambrosino Silvio, Pagot Mariana, Rodriguez Andrés, Martínez Rodolfo
Laboratorio de Hidráulica, FCEfyN, UNC. Av. Veléz Sarsfield 1601. TE: 4334446. mcorral@com.uncor.edu

RESUMEN

El cruce del poliducto Mendoza-Córdoba (Repsol-YPF), con el río Cuarto o Chocancharagua (Provincia de Córdoba) ha sufrido desde la década del 80 hasta la actualidad modificaciones estructurales debido al descenso del lecho como consecuencia de los procesos erosivos actuantes. La metodología empleada para abordar esta problemática ha consistido en el desarrollo de las etapas básicas de un proyecto de ingeniería. En primer lugar fue realizado el análisis geomorfológico del tramo del río, el cual permite inferir las posibles tendencias evolutivas del sistema fluvial y en segundo lugar se han definido las condiciones hidráulicas del río, para establecer una estimación de la magnitud de los procesos erosivos actuantes. A su vez estos resultados permitieron contar con elementos sólidos para realizar un diagnóstico estructural de la estructura soporte en la situación actual.

En el presente trabajo se resume la metodología empleada y los resultados obtenidos en cada disciplina involucrada, que diagnostican la susceptibilidad de la obra en su configuración actual. Además se presenta el proyecto de las obras provisorias de refuerzo, como así también la evaluación preliminar de diferentes alternativas que garanticen en forma cuasi-definitiva la estabilidad estructural de la obra.

ABSTRACT

The cross of the Cuarto or Chocancharagua river by the Mendoza – Córdoba poli-pipe of Repsol-YPF, (Córdoba province) has been affected since 80's up now a days by strong structural modifications due to the bed descending from the erosion and sediment transport processes. The methodology used for this problem includes various steps of an engineering project. First a geomorphologic analysis of the fluvial reach was carried out to prevent the possible trends of the fluvial system, second the hydraulics conditions were computed to estimate the erosion processes. With these results the structural verification for the present situation was developed.

The methodology, the main results of each involved discipline are summarized for the diagnostic of the present situation of poli-pipe cross. Finally additional works for stability improvements and some alternatives for long term solutions are discussed.

INTRODUCCIÓN

El cruce del poliducto Mendoza – Córdoba, propiedad de la empresa Repsol-YPF, con el río Cuarto o Chocancharagua se encuentra emplazado a unos 7 Km aguas arriba del puente

Malvinas Argentinas, de la Ruta Nacional N° 36 o Av. de Circunvalación de la ciudad de Río Cuarto, Provincia de Córdoba.

El poliducto que cruza sobre el Río Cuarto (Figura 1) consiste en un caño de acero de 0,30 m de diámetro, protegido con una cobertura de hormigón. El poliducto está soportado por una estructura formada por pilotes y riendas de acero, encontrándose los ocho primeros de estos soportes distanciados regularmente cada 10 m en el sentido del eje del poliducto; mientras que el último apoyo, hacia la zona central del cauce, se encuentra separado a unos 25 m del anterior. Los pilotes existentes se agrupan en tipologías denominadas P1, P2 y P3, siendo los pilotes P1 y P2 de 0,80 m de diámetro y el pilote P3 de 0,60 m de diámetro.



Figura 1. Traza del poliducto sobre el Río Cuarto, Provincia de Córdoba

Desde su construcción hasta la fecha esta obra de cruce ha sufrido importantes modificaciones. Debido al descenso generalizado del lecho de este río, a comienzos de la década del 80 se debió practicar una profundización (de aproximadamente 2,50 m) de la obra por flexión propia del conducto y revistiéndolo de hormigón para proporcionarle peso propio o lastre.

Dada las características morfodinámicas de este río, recientemente en el año 2000, fueron realizadas una serie de obras en el propio cruce del poliducto y en el tramo del cauce. Dentro de las primeras, se ha observado que el conducto fue sujetado mediante cables a un sistema de pilotes, dotando al conducto de una mayor resistencia a los desplazamientos laterales principalmente y verticales. Además fue realizada una conformación del terreno natural sobre la margen derecha del río, y un revestimiento mediante tablestacas metálicas para la protección en el punto de contacto del poliducto con el cauce.

En dicha oportunidad, en el cauce de río, también fueron construidas 3 pantallas metálicas para la protección de la margen derecha, a modo de espigones, distribuidas en un tramo de cauce de unos 160 m hacia aguas arriba del cruce.

En la actualidad, estas pantallas han quedado aisladas por la erosión lateral del río sobre la margen derecha y la corriente puede pasar por detrás de las mismas. El continuo descenso del lecho ha dejado visible el poliducto en los primeros 15 o 20 m desde la margen derecha generando una situación de riesgo para la estabilidad de la obra.

Cabe destacar el impacto ambiental negativo que se produciría como consecuencia de una rotura de esta obra y más aún considerando la ubicación de la misma aguas arriba de la localidad de Río Cuarto, segunda ciudad de la Provincia de Córdoba.

El desarrollo metodológico del presente trabajo comprende diferentes etapas entre las que se destacan la definición de los caudales de diseño, la confección de un modelo digital del terreno, la simulación hidráulica del tramo en estudio y la estimación de la magnitud de los procesos erosivos actuantes. Necesariamente los resultados de las variables hidráulicas se apoyan en un estudio geomorfológico del tramo de río, el cual además permite inferir las posibles tendencias evolutivas del sistema fluvial.

En relación a la verificación estructural del sistema se ha realizado la estimación de las acciones hidráulicas (fuerza de arrastre) y la evaluación de posibles impactos sobre el poliducto y su estructura soporte, originados por elementos arrastrados por el agua durante las crecidas del río.

En el presente trabajo se resume la metodología empleada y los resultados obtenidos que incluyen desde la modelación hidráulica del tramo hasta la estimación de las posibles erosiones, que diagnostican el estado actual de la obra de cruce. A su vez se presenta el proyecto de las obras provisorias de refuerzo, como así también la prefactibilidad de diferentes alternativas que garanticen en forma cuasi-definitiva la estabilidad estructural de la obra.

DIAGNÓSTICO DE LA SITUACIÓN ACTUAL

Análisis geomorfológico del tramo

El análisis geomorfológico del tramo fue basado fundamentalmente en el reconocimiento de los ambientes y unidades hidrogeomorfológicas que integran el valle fluvial, incluyendo una evaluación temporal de los cambios efectuados por el curso del río, considerando un período de 33 años.

Como material aerofotográfico se emplearon fotogramas a escalas aproximadas 1:20.000 del año 1970, y 1:75.000 del año 1994, además de imágenes satelitales destacándose la correspondiente al 13 de abril del corriente año LANDSAT 7 ETM+. Por otro lado, como base topográfica se utilizó la carta Río Cuarto del Instituto Geográfico Militar editada a escala 1:50.000 con equidistancia de 5 m del año 1970. Como resultado de esta etapa fue elaborada la carta temática geomorfológica mostrada en la Figura 2.

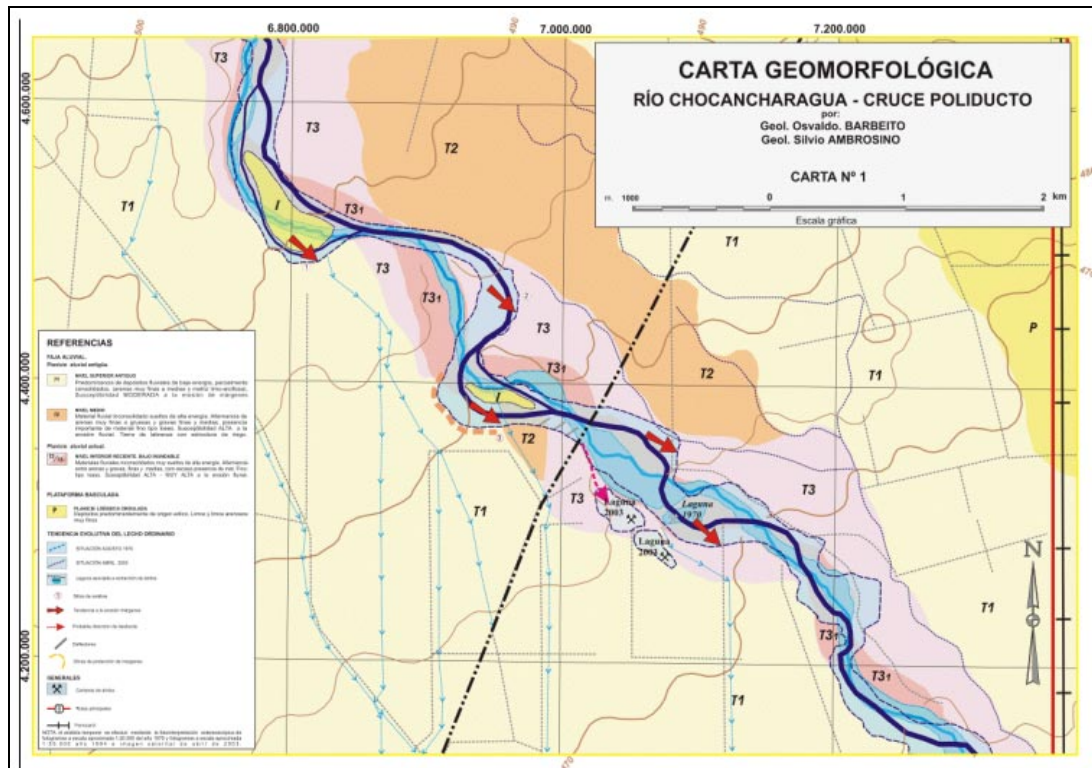


Figura 2: Carta Geomorfológica del tramo.

En el sitio de obra de cruce y el entorno de la misma, el ámbito fluvial se caracteriza por escurrimiento meandriforme de sinuosidad moderada del lecho ordinario con canales de flujo entrelazados en estiaje y la presencia de tres niveles principales de aterrazamiento: un nivel superior antiguo (T1), un nivel medio (T2) y un nivel inferior reciente (T3). Los dos primeros (T1 y T2) conforman la planicie aluvial antigua y el último (T3), la planicie aluvial actual del río.

El nivel inferior reciente (T3) y el subnivel asociado, actúan parcialmente como lecho de inundación periódico, ante la ocurrencia de crecidas ordinarias cuando es superada la capacidad de conducción del lecho ordinario y en forma total como lecho episódico, ante la ocurrencia de crecientes extremas.

Del análisis temporal mediante fotointerpretación estereoscópica de los fotogramas disponibles, la interpretación de la información satelital y el control de campo, permitieron detallar las siguientes consideraciones en el sitio de cruce del poliducto y su entorno próximo, las cuales pueden observarse en la Figura 3.

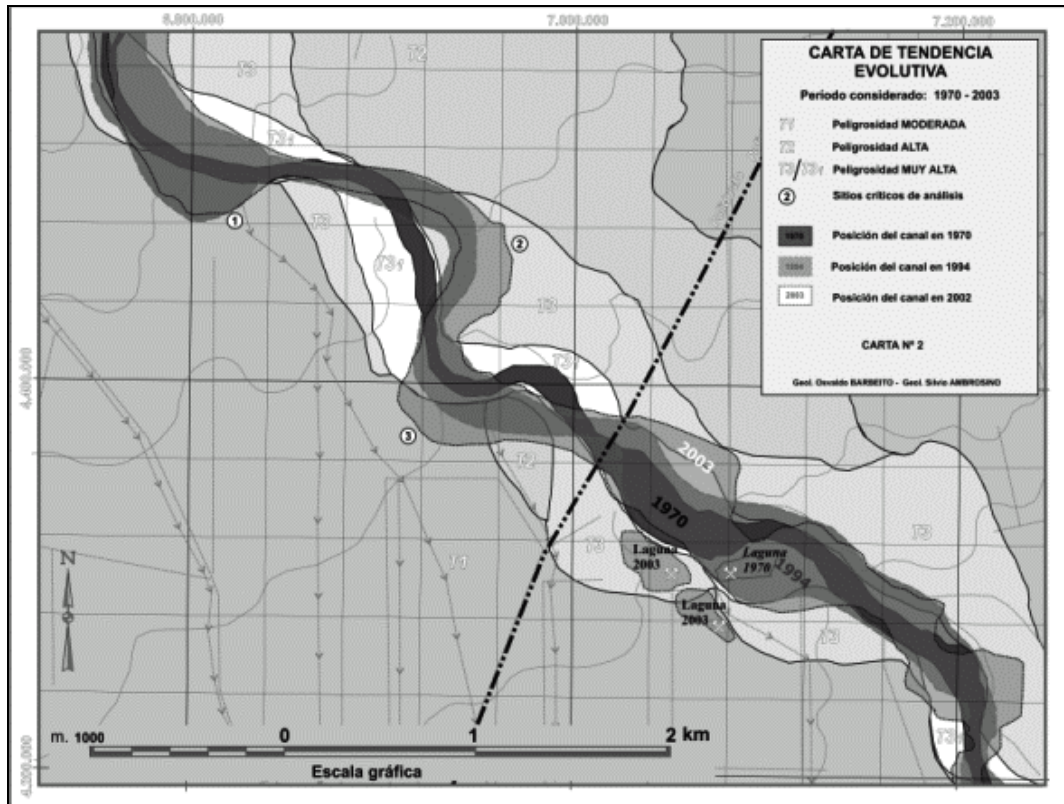


Figura 3: Carta de la tendencia evolutiva del tramo.

El patrón de escurrimiento meandriforme que presenta el lecho ordinario en el análisis, se caracteriza por desplazamiento aguas abajo, desplazamiento lateral y progresivo estrangulamiento de las curvas, procesos que solo tienen acción significativa durante la ocurrencia de las crecidas estivales. Aguas arriba del poliducto el diseño es de sinuosidad media, situación que cambia aguas abajo, en donde es menos acusado, probablemente por control estructural en profundidad al que se ajusta el curso, según el sentido NW-SE (fracturación o fallamiento).

La alta tendencia a la generación de crecientes repentinas de magnitud que presenta la cuenca de recepción serrana del río Choncancharagua por condicionamiento natural, determina una dinámica fluvial intensa en el entorno del cruce del poliducto, hecho claramente evidente en la fuerte inestabilidad manifiesta en el desplazamiento en sentido de la corriente de las curvas externas de los meandros, desplazamiento lateral y profundización del cauce.

El análisis temporal indica que la situación (3) de la carta de la Figura 3, representa el riesgo potencial de mayor significación para el poliducto. En el sitio la curva externa erosionando el nivel superior de terraza en la margen sur, ha tenido un avance importante en el sentido de la corriente y también lateralmente.

El avance aguas abajo es de esperar que acuse una aceleración cuando la erosión comience a actuar en forma franca sobre el nivel medio de terrazas (T2) y el nivel inferior (T3), que ofician de margen inmediatamente aguas abajo. Esto en respuesta al carácter suelto de los materiales aluvionales que los conforman. Tal situación define de alta peligrosidad por erosión de márgenes en el primer caso, a muy alta, en el segundo.

Inmediatamente aguas abajo del poliducto sobre la misma margen, la actividad minera complica la situación. Dos canteras de áridos establecidas en el nivel inferior de terrazas (T3), están afectadas por desbordes ante la ocurrencia de crecidas, situación que ante un evento de magnitud, puede desencadenar rápidas y severas situaciones de inestabilidad en la zona del poliducto.

En lo que respecta a la situación (2) de la carta de la Figura 3, si bien el potencial de peligrosidad es menor en función a la mayor distancia con respecto al poliducto, debe considerarse ante la ocurrencia de un evento extremo, la posibilidad de sobrepaso del meandro por desborde hacia la margen izquierda, patrón fotogeológico evidente en las fotografías del año 1994, a 4,5 Km aguas arriba del cruce del poliducto.

Hidrología

Entre los antecedentes hidrológicos consultados se destaca el estudio de AyEE (1967), realizado en base a registros de caudales. En dicho trabajo se estudiaron 247 crecidas en un período de 16 años de observación con estudios detallados de relación de caudales pico para diferentes puntos de control ubicados en varios sectores de la cuenca.

Se detalla en el estudio de AyEE el registro de la crecida extraordinaria de octubre de 1943 con un caudal pico de 1100 m³/s en Tincunaco, 2010 m³/s en Costa del Tambo y de 1780 m³/s en la ciudad de Río Cuarto, correspondiendo estas secciones a áreas de aporte de 635, 1400 y 1800 Km², respectivamente.

Más recientemente, en el año 2002, debido a la definición de los caudales de diseño para los azudes del Río Cuarto por parte de la DiPAS, se han realizado diferentes estudios para la definición de obras complementarias a los azudes, como el dimensionamiento de las protecciones de márgenes y lecho realizado por Farías (2002), y la modelación física a fondo móvil de los azudes realizada por en Laboratorio de Hidráulica de la UNC (2003).

En general los trabajos recopilados, DiPAS (2002), Farías (2002) y UNC (2003), detallan una serie de relaciones entre recurrencias y caudales para la sección del Puente Ferroviario en la ciudad de Río Cuarto.

En la Tabla 1 se muestra un resumen de los caudales según los antecedentes recopilados y los adoptados en forma práctica para el análisis hidráulico del presente estudio.

Tabla 1: Caudales según diferentes autores y caudales adoptados.

AyEE (1967)		Azudes Río IV		Q adoptados	
TR	Q	TR	Q	TR	Q
[años]	[m ³ /s]	[años]	[m ³ /s]	[años]	[m ³ /s]
3	680	2	161	2	160
10	1429	3	700	3	700
25	1843	20	1900	25	1900
50	2240	50	2400		
100	2608	100	2906	100	2900

Simulación Hidráulica

A partir de los caudales establecidos, fue realizada la modelación hidráulica del tramo con el objeto de cuantificar los diferentes procesos involucrados en esta obra de cruce.

En esta etapa fue elaborado un modelo hidráulico unidimensional para realizar las primeras estimaciones de las variables, las cuales fueron comparadas y verificadas con los resultados proporcionados por un segundo modelo bidimensional del tramo de río. En el caso unidimensional fue empleado el software HEC-RAS (USACE, 2002); mientras que para el modelo bidimensional el software utilizado fue RMA2 (WES, 1997).

Modelación hidráulica unidimensional: modelo HEC-RAS

Para la estimación de la profundidad de erosión por sectores en la sección transversal del cauce fue necesario determinar la distribución transversal de velocidades; adoptándose las obtenidas a partir del modelo HEC-RAS, que utiliza el concepto de conductividad hidráulica de la sección. La Figura 4 presenta los resultados para cada uno de los caudales de análisis.

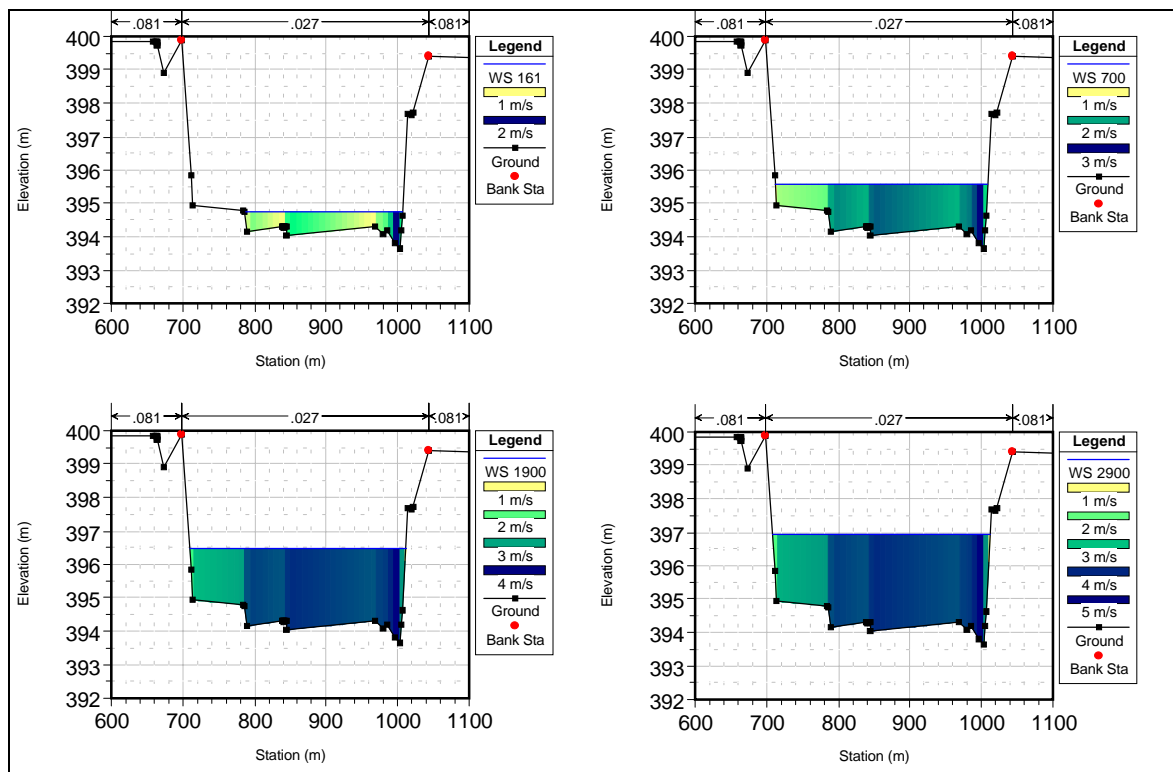


Figura 4: Distribución lateral de velocidades para los caudales de análisis.

Simulación hidrodinámica 2D: modelo RMA2

RMA2 es un modelo numérico hidrodinámico en elementos finitos bidimensional, que calcula los niveles de la superficie libre alcanzada por el agua y las componentes horizontales de velocidad para régimen subcrítico en campos bidimensionales de flujo. RMA2 calcula la solución por elementos finitos de las ecuaciones de Navier – Stokes bajo la forma de Reynolds para flujos turbulentos. Las pérdidas friccionales se estiman a través de la ecuación de Manning, mientras que para caracterizar la turbulencia se utilizan coeficientes de viscosidad de remolino.

El principal objetivo de la modelación 2D realizada ha consistido en evaluar la distribución de flujo y los patrones de velocidades para distintos ángulos de entrada de los caudales

establecidos, posibilitando una mejor cuantificación de la distribución de caudales en la sección transversal, dato necesario para la estimación de las profundidades de erosión que afectarían a la obra de cruce

La modelación bidimensional ha considerado en la sección de aguas arriba en ingreso de agua con un ángulo de entrada variable, con el objeto de identificar la sensibilidad de las variables hidráulicas en el tramo ante la incidencia de flujos cruzados provenientes de meandros y curvas situados aguas arriba del dominio de cálculo.

A continuación se presentan los resultados obtenidos para el escenario hidrológico correspondiente a 2900 m³/s.

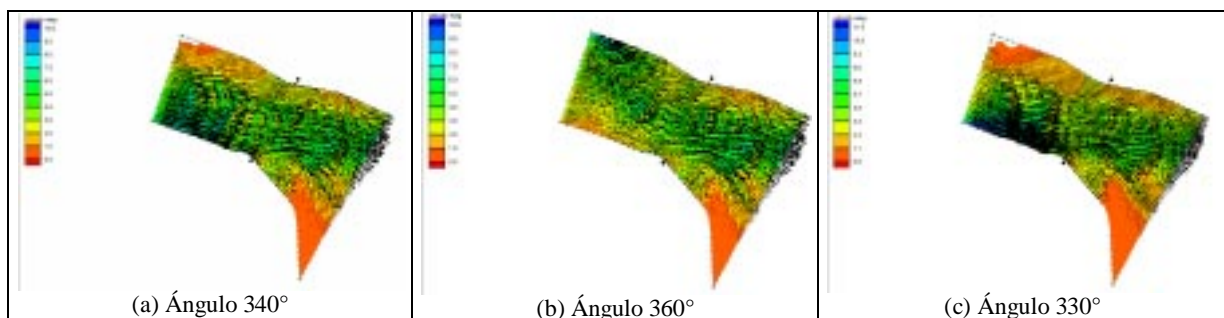


Figura 5: Campo de Velocidades. Q: 2900 m³/s

Estimación de erosiones

En esta etapa del estudio fueron calculadas las erosiones producidas ante la ocurrencia de los eventos hidrológicos considerados, que junto a la evaluación estructural del sistema existente permitieron determinar el comportamiento de la obra en el estado actual y con las modificaciones propuestas. Fue realizada una estimación de los procesos erosivos actuantes y su comportamiento ante escenarios potenciales.

Erosión general

La metodología propuesta por Listchvan-Lebediev, ha sido ampliamente utilizada para la estimación de erosión general durante crecidas extraordinarias (e.g. Schreider M. I. et al 2001, Farías et al. 2002), esta formulación considera la siguiente expresión:

$$Hs_i = \left[\frac{q_i}{(0.68 * \beta * ds^{0.28})} \right]^{1/x}$$

donde:

Hs_i : profundidad total en franja i (tirante + erosión) en m

q_i : caudal de diseño en franja i en m³/s / m.

β : coeficiente que depende de la probabilidad anual con que se presenta la crecida

ds : diámetro medio del material del lecho en mm.

x : coeficiente que depende del diámetro de sedimento en suelo no cohesivo.

La hipótesis esencial en la que se fundamenta esta ecuación es el equilibrio existente entre la velocidad media real de la corriente (V_r) y la velocidad necesaria para el inicio del arrastre del

material del fondo (U_c), en el instante en que se detiene el proceso de socavación. Además el método asume que durante el proceso de socavación el caudal permanece constante en cada franja vertical, lo cual incide directamente sobre la forma que adquiere el perfil de la sección erosionada, resultando similar a la sección original pero con una distorsión vertical.

Para determinar la erosión general en la totalidad del perfil transversal fue discretizada la sección en una serie de franjas verticales, en las cuales se calculó tanto el tirante como la velocidad, obteniéndose la distribución lateral de caudales. Luego de producirse la socavación, la profundidad de la franja resulta h_{si} , la cual es la suma del tirante normal h_i más el incremento de profundidad producido por efecto de la socavación general.

Para determinar la distribución de caudales en la sección transversal, tal como se ha mencionado con anterioridad, fueron empleadas los resultados generados por los modelos numéricos uni y bidimensionales (modelos HEC-RAS y RMA2).

Los resultados obtenidos en la sección transversal que contiene el poliducto, de acuerdo a la distribución de velocidades laterales provistas por HEC-RAS se presentan en la Figura 6.

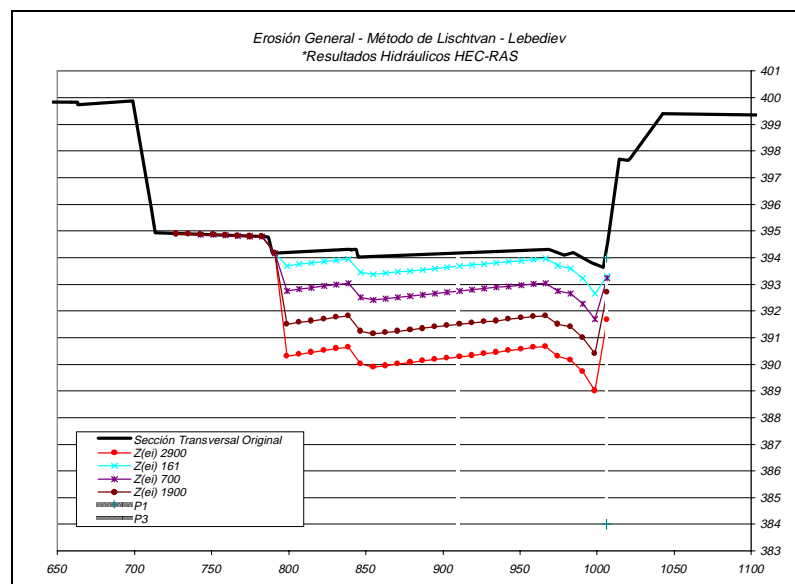


Figura 6: Erosión general para la sección del poliducto con datos de HEC-RAS.

De acuerdo a la metodología propuesta, la aplicación del modelo de simulación hidráulica bidimensional RMA2, permite contar con elementos más sólidos y concretos acerca de la distribución lateral de velocidades, en situaciones que no pueden ser consideradas por hipótesis de modelación unidimensional, como por ejemplo la variación analizada en los ángulos de ingreso de la corriente por la influencia del meandro y el canal aliviador existentes aguas arriba del cruce del poliducto.

En este caso para estimar la erosión fue utilizada la misma formulación de Listchvan-Lebediev, considerando los resultados proporcionados por el modelo RMA2. Se presenta en la Figura 7 los resultados obtenidos para el caudal de $2900 \text{ m}^3/\text{s}$, el cual puede compararse con su respectivo estimado mediante los resultados del modelo unidimensional.

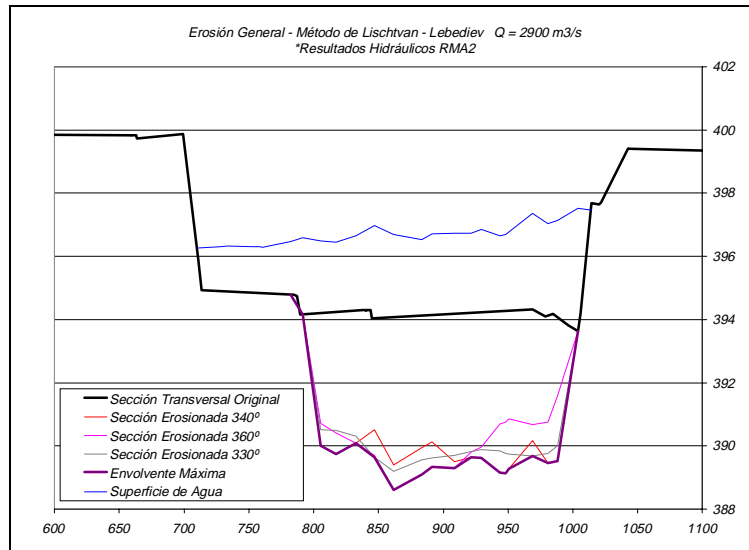


Figura 7: Erosión general para la sección del poliducto. Caudal 2900 m³/s

Erosión local por pilas

Para determinar las erosiones locales del material que compone el lecho en las inmediaciones de los pilotes de sujeción del poliducto, fueron empleadas expresiones semiempíricas, a través del software ELEHCA (Menéndez et al., 2002), además de las expresiones incorporadas en el modelo HEC-RAS. Además se utilizaron expresiones específicas del tema como la propuesta por Laursen y Toch (1956).

El software ELEHCA (Erosión Local por Estructuras Hidráulicas en Corrientes de Agua) provee estimaciones de la profundidad máxima de erosión local producidas por cualquier estructura hidráulica que se introduzca en una corriente de agua, y de las escalas de tiempo asociadas con el proceso de evolución hacia esa profundidad máxima, empleando fórmulas de base empírica. Las fórmulas utilizadas para la estimación de erosión local por pilas comprenden la ecuación de la CSU (Richardson y Davis, 1995), Jonhson (1992) y Breusers (Hoffman, 1997).

La estimación de erosión en puentes provista por HEC-RAS se basa en los métodos descritos en la circular HEC N° 18 (FHWA, 2001) y recomienda el empleo de la ecuación de la CSU (Colorado State University) desarrollada por Richardson y Davis (1995).

Cabe mencionar que para efectuar las estimaciones de erosión local se ha tenido en cuenta la configuración del grupo de pilas, es decir la relación existente entre el espaciamiento de pilas y el diámetro de las mismas (relación d/b), tanto en sentido longitudinal como transversal al cauce. En este caso en particular la relación antes expuesta (d/b aproximadamente 14) determina que las pilas funcionan en forma independiente, de acuerdo a criterios expuestos por Raudkivi (1991) que establecen 11 como valor límite transversal y longitudinal.

Considerando el objetivo del presente trabajo se adoptaron como parámetros de diseño los valores medios presentados en la Tabla 2 para cada uno de los caudales y tipología de pilotes.

Tabla 2: Resumen de erosión local para cada tipo de pilotes.

Caudal [m ³ /s]	Erosión Local [m]		
	P3	P2	P1
160	0.84	0.98	1.21
700	1.18	1.43	1.50
1900	1.41	1.73	1.75
2900	1.53	1.87	1.89

Erosión total

La erosión total en cada pilote resulta de la suma de la erosión general y la erosión local, estableciéndose de esta manera una hipótesis conservadora. La Tabla 3 resume los valores de erosión total para cada tipología de pilote ante la ocurrencia de los caudales planteados para el presente trabajo.

Tabla 3: Profundidades de erosión total para cada caudal.

Caudal [m ³ /s]	Erosión Total [m]		
	P3	P2	P1
160	1.29	1.41	2.24
700	2.56	2.79	3.19
1900	4.04	4.33	4.48
2900	5.36	5.65	5.84

Es importante destacar que se debería considerar el descenso generalizado del lecho que ha sufrido el río Cuarto en los últimos años, el cual de acuerdo a distintos antecedentes estaría en el orden de 1,00 m cada 10 años (Degiovanni y Cantu, 1994). Considerando este descenso del lecho, los valores de erosión total estimados anteriormente, tendrían un aumento progresivo en el tiempo incrementando el riesgo de falla de la obra.

Verificación del poliducto y su estructura soporte

Las principales hipótesis de carga consistieron en considerar la fuerza de arrastre ejercida por la corriente de agua, el cierre o taponamiento de uno de los vanos y el impacto de un elemento flotante.

La fuerza de arrastre de la corriente de agua sobre el poliducto y su estructura soporte fue calculada para los distintos caudales y niveles de erosión asociados con las siguientes expresiones:

$$F_h = C_D \cdot A \cdot q_h$$

donde:

F_h : Fuerza de arrastre de la corriente de agua

C_D : Coeficiente de arraste

A : Area expuesta al flujo

$q_h = \frac{1}{2} \rho v^2 =$ presión dinámica del agua en función de la velocidad de la corriente

La acumulación de vegetación y resaca arrastrada por el río puede producir el taponamiento de un vano completo de poliducto entre pilotes, formando una especie de muro de contención entre el poliducto y el cauce del río. En este análisis fue considerado que dicho muro es impermeable y actúa como una placa plana que se opone al flujo de la corriente. La acción hidrodinámica del agua fue estimada con la expresión anteriormente mencionada.

También fue considerado el impacto de un elemento flotante arrastrado por la corriente sobre el poliducto o sobre la estructura soporte de pilotes. Para el cálculo de la fuerza de impacto fue adoptado como objeto flotante de diseño un árbol con su follaje y raíces de 2000 Kg de masa, arrancado y arrastrado por la corriente de agua. A partir de las hipótesis planteadas, se han realizado combinaciones de carga para verificar la estabilidad estructural del cruce bajo la superposición de acciones simultáneas.

El modelo numérico del pilote simple empotrado en el suelo se realizó con elementos finitos de barras prismáticas para representar el fuste del pilote, y el suelo de fundación se modeló mediante resortes con comportamiento elasto-plástico perfecto, con una pendiente o coeficiente de elasticidad en la parte lineal de la respuesta correspondiente a una recta secante que une el origen con un cierto nivel de deformación de la curva hiperbólica que representa el comportamiento del suelo, y una fuerza máxima para la respuesta plástica correspondiente a la resistencia pasiva del suelo.

La discretización adoptada permite representar diferentes niveles de erosión y evaluar la respuesta carga-deformación del pilote con un grado de precisión compatible con la determinación de las acciones que actúan sobre la estructura. En la Figura 8 se presentan esquemáticamente los modelos del pilote simple correspondientes a distintos niveles de erosión del cauce del río.

Posteriormente, para la evaluación de la propuesta de refuerzo de la estructura soporte, fue realizado un modelo de la estructura aporticada formada por dos pilotes existentes y una viga travesaño superior que vincula los pilotes. Aprovechando las propiedades de antisimetría de un pórtico plano sometido a una fuerza lateral aplicada en el nudo superior se modeló la mitad de la estructura con las condiciones de borde apropiadas para este caso. En la Figura 9 se presentan los modelos de la estructura soporte aporticada para distintos niveles de erosión del cauce del río utilizados para verificar la propuesta de refuerzo.

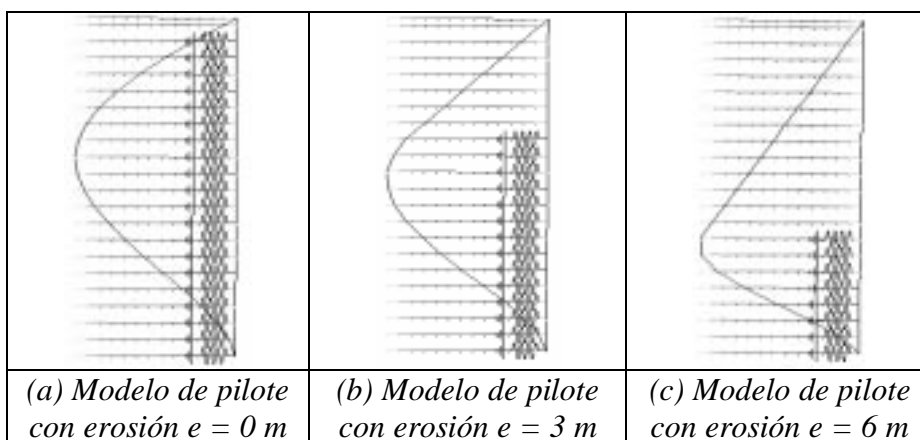


Figura 8: Modelo de pilote simple con distintas profundidades de erosión.

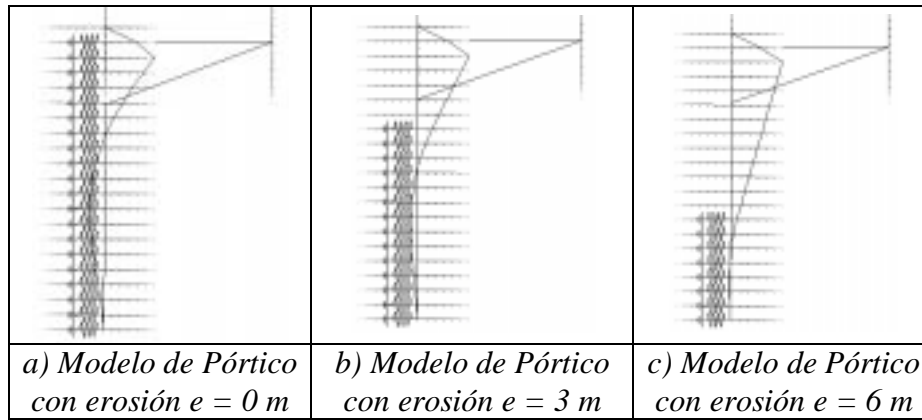


Figura 9: Modelo de pórtico con distintas profundidades de erosión.

La evaluación de las cargas y acciones hidráulicas sobre la estructura soporte del poliducto fue realizada para distintos caudales y niveles de erosión, considerando tres sectores del cauce del río donde se encuentran las diferentes estructuras del proyecto actual y asignando a cada sector de la sección del río propiedades hidráulicas medias de acuerdo a los estudios hidráulicos realizados. Los sectores estudiados son:

- i) **Sector Margen Derecha del río:** Pilote tipo “P1”
- ii) **Sector Centro – Derecho del río:** Pilote tipo “P2”
- iii) **Sector Central del río:** Pilote tipo “P3”.

Para cada sector del río se calcularon en primer término las cargas sobre la estructura soporte debido a la acción de la corriente de agua, obstrucción de un vano entre pilotes y cargas de impacto de un objeto flotante, y luego se realizaron las combinaciones de carga.

En la Figura 10 se presenta gráficamente la evaluación de la seguridad de la estructura soporte para el pilote tipo P1. En este gráfico se observa como la capacidad resistente valorada mediante una fuerza admisible en el extremo superior del pilote decrece a medida que aumenta la erosión y se reduce el empotramiento efectivo en el lecho del río; mientras que las cargas hidráulicas y de impacto que actúan sobre el pilote aumentan a medida que crece la velocidad del flujo de la corriente y aumenta la erosión. La intersección de la curva de capacidad resistente con las diferentes curvas de cargas actuantes define el punto de máxima erosión admisible para cumplir con los requerimientos de seguridad establecidos.

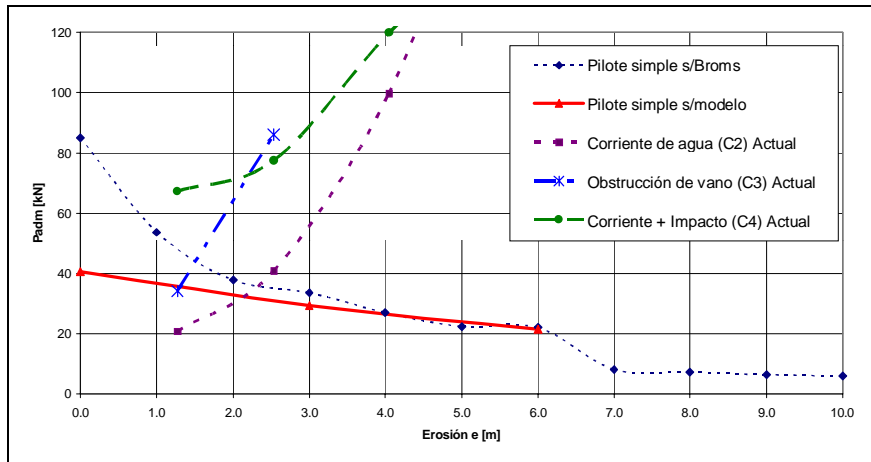


Figura 10: Evaluación del Pilote P1 existente para diferentes profundidades de erosión.

De análisis de la Figura 10 se desprende que los pilotes P1 en la situación actual podrían soportar una profundidad de erosión total del orden de 1,20 m, aunque no serían capaces de soportar el impacto de un objeto flotante con las hipótesis de cálculo adoptadas.

En síntesis, de acuerdo a los resultados obtenidos es posible afirmar que en las condiciones actuales el sistema presenta una elevada probabilidad de falla, ya que los procesos hidráulicos que podrían provocarla poseen gran probabilidad de ocurrencia, es decir, velocidades y erosiones que se darían para caudales de baja recurrencia.

OBRAS PROPUESTAS

Las medidas propuestas fueron orientadas al refuerzo de la obra de cruce existente mejorando tanto los inconvenientes estructurales de la misma, por un lado, y reduciendo los problemas de erosión a los que se encuentra sometida la obra, por otro. El objeto de estas medidas consiste en mejorar la situación actual hasta tanto se proyecten y construyan las medidas definitivas necesarias para las características del cruce estudiado.

Es importante destacar que las recomendaciones técnicas del presente trabajo apuntaron fundamentalmente a soluciones para el corto plazo, quedando pendiente un necesario análisis detallado de soluciones de mayor envergadura para un horizonte temporal mayor. Sin embargo, se adjuntan a continuación algunas consideraciones planteadas a nivel conceptual de las que podrían ser estas soluciones para el largo plazo.

Refuerzo Estructural

Los resultados de la evaluación estructural del poliducto y su estructura soporte muestran que la obra en su estado actual presenta una alta probabilidad de falla ante la avenida de una crecida de baja recurrencia (ocurrencia normal).

Debido al alto impacto ambiental y económico que implica el colapso o falla de la obra, fueron propuestas una serie de medidas de refuerzo para disminuir el riesgo de falla de la obra. Estos refuerzos consisten en el aperticamiento de los pilotes actuales y la provisión de una viga metálica longitudinal de apoyo del poliducto, apoyada en la estructura soporte existente.

En la Figura 11 se presenta la verificación de la seguridad de la estructura soporte reforzada, observándose que la erosión admisible alcanza valores de 2,5 a 3,0 m para las cargas hidráulicas debido a la corriente de agua y obstrucción de un vano.

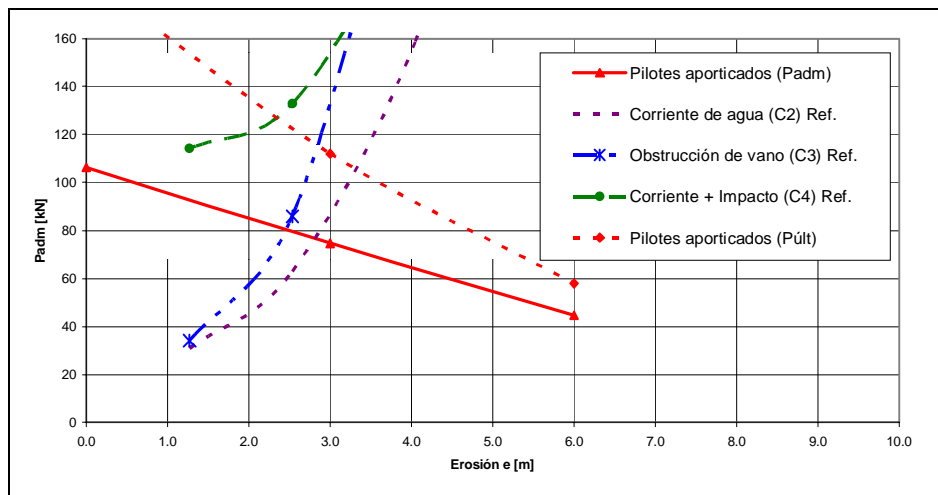


Figura 11: Evaluación aporticamiento P1 para diferentes profundidades de erosión.

Con respecto a la combinación de carga que incluye el impacto de un elemento arrastrado por la corriente sobre la estructura soporte, considerando la resistencia última de la estructura, se pueden alcanzar niveles de erosión compatibles con los obtenidos para las otras combinaciones de carga.

Esto implica que para las cargas de impacto de probabilidad de ocurrencia muy baja se acepta la plastificación o rotulación del pilote, y debido a la configuración estructural de pórtico de la pila, se podrá disipar la energía del impacto mediante deformaciones plásticas evitándose el colapso de la estructura.

En caso de ocurrencia de un impacto se deberá evaluar las consecuencias del mismo, y de ser necesario, se deberá proceder a la reparación o reemplazo de la estructura.

Protección contra la erosión

Las obras de protección propuestas han tenido como finalidad preservar la integridad y garantizar el funcionamiento de la estructura que soporta el poliducto resguardando la estabilidad y/o el funcionamiento de la estructura. Además, estas protecciones deben minimizar las erosiones generales y/o locales que pudieran producirse en la zona de emplazamiento de la estructura del poliducto, tanto en el lecho como así también sobre la margen derecha, que es identificada como zona de mayor riesgo de erosión lateral.

El tipo de protecciones sugeridas consistieron en protecciones flexibles y permeables, que protejan lecho y márgenes, admitiendo eventuales deformaciones, resultando ser el más conveniente un sistema compuesto por gaviones y colchonetas de piedra embolsada para la margen derecha y colchonetas en las pilas de la estructura soporte.

Protección de Pilas centrales

Esta protección propuesta tiene como función proteger el entorno de las pilas (Figura 12) ante la presencia de procesos de erosión locales, por lo tanto deberá llevar un espesor de 30 cm,

debido a las exigencias hidráulicas por los niveles de turbulencia del flujo. La geometría final de la protección propuesta debe tener continuidad en planta, protegiendo en forma conjunta las pilas existentes debido a las exigencias hidráulicas.

Se ha adoptado como criterio proteger en sentido transversal al flujo como mínimo una longitud equivalente a tres o cuatro veces del diámetro de la pila, de acuerdo a las experiencias citadas en la literatura específica (Melville, 1997).

La protección sobre las pilas existentes del poliducto, deben cubrir una longitud adecuada tanto aguas arriba como abajo, para evitar que los procesos de erosión local afecten la estabilidad de las mismas. En el caso de la protección para aguas arriba se ha propuesto una longitud equivalente igual a la dimensión transversal (4 m), considerando la formación de la olla de erosión en el sector frontal de las pilas. Para el caso de aguas abajo de las pilas, se ha proyectado proteger como mínimo una longitud equivalente al triple de las profundidades de erosiones esperadas, considerada como erosión general o local, la que dé mayores valores. Por consideraciones prácticas se han recomendado protecciones de 6 m de longitud.

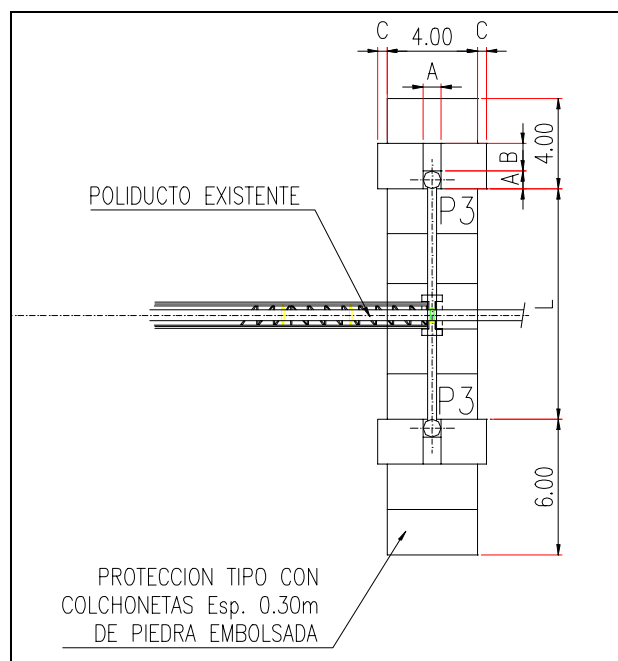


Figura 12: Obra de protección para pilas centrales.

Es importante destacar que no existe ninguna vinculación entre el pilote y la manta de colchonetas, porque de presentarse una situación de descenso del material del lecho la estructura de protección debe acompañar al mismo y no “colgarse” de la estructura soporte del poliducto.

Margen derecha

La margen derecha del cauce presenta signos de erosión actual, debido a la forma en que la corriente incide sobre esta margen y por las características erodibles de los suelos existentes. Por este motivo la margen derecha debe ser protegida mediante una estructura ejecutada en gaviones, de características geométricas similares al estribo de un puente.

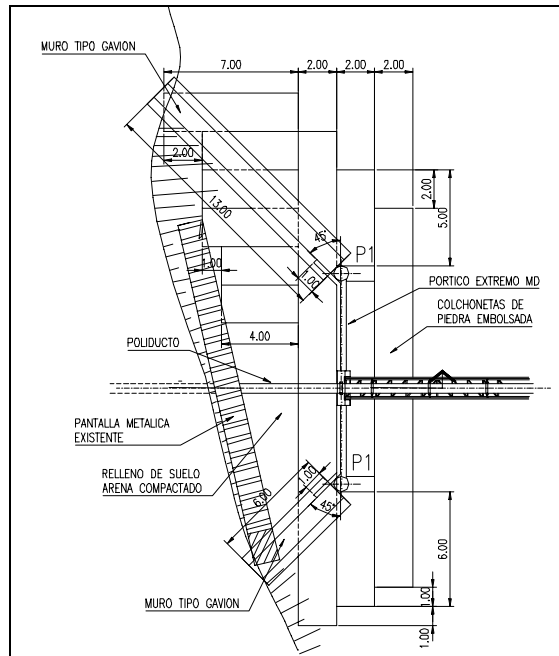


Figura 13: Obra de protección para margen derecha.

La protección sobre la margen derecha del cauce, debe cubrir una longitud adecuada para evitar que la tendencia actual de erosión de dicha margen afecte la estabilidad del talud. Esta protección tiene como función proteger dicha margen a la erosión de los caudales del cauce de baja recurrencia e incluir la zona de vórtices laterales, por lo tanto deberá llevar un espesor de 30 cm, debido a las exigencias hidráulicas del flujo.

Considerando la literatura específica del tema (HEC N°18, 1993), se adopta como criterio proteger en una longitud equivalente a dos veces la profundidad del flujo. Se han recomendado las mismas consideraciones con relación a la continuidad del conjunto de colchonetas y gaviones, dado que esta vinculación física debe asegurar la continuidad de la manta, y la estabilidad de los muros de gaviones apoyados sobre éstas.

ANÁLISIS PRELIMINAR DE ALTERNATIVAS DE OBRAS PARA EL LARGO PLAZO

Un cruce estable para el largo plazo del poliducto en el río Chocancharagua deberá minimizar los inconvenientes debido a los intensos procesos morfodinámicos a los que se encuentra sometido el río en este tramo.

Dada la naturaleza de los hidrocarburos transportados por el poliducto, y su emplazamiento aguas arriba de un importante núcleo urbano, su probabilidad de falla debe ser cuasi nula. Bajo estos lineamientos fueron evaluadas distintas variantes: 1) el soterramiento del poliducto; 2) cruce aéreo en puente; y 3) protección de la obra existente mediante un azud aguas abajo del mismo.

Del análisis técnico – económico preliminar ha surgido como solución más conveniente un cruce de tipo aéreo mediante estructuras prefabricadas. Esta observación sólo reviste de carácter preliminar, debido a la necesidad de un estudio más detallado para la definición de una sección de cruce más estable y el posterior proyecto de obra definitiva.

CONCLUSIONES

Dada la complejidad de los procesos analizados en el presente trabajo combinando distintas especialidades (hidráulica, geomorfología, geotecnia y estructuras), es posible realizar conclusiones y recomendaciones desde cada una de ellas. De acuerdo a los resultados alcanzados en cada área temática involucrada existe unanimidad en que la obra presenta un elevado riesgo de falla en la situación actual.

Del análisis geomorfológico (ver Figura 2) se observa que la curva situada aguas arriba del cruce erosiona el nivel superior de terraza (T1) en la margen derecha, la cual ha sufrido un importante avance lateral y hacia aguas abajo. El análisis temporal (ver Figura 3) indica que esta situación representa el riesgo potencial de mayor significación para el poliducto.

Inmediatamente aguas abajo del poliducto sobre la misma margen, las areneras existentes complican la situación, ya que realizan la extracción en el nivel inferior de terrazas (T3) y se encuentran afectadas por desbordes ante la ocurrencia de crecidas, situación que ante un evento de magnitud, puede desencadenar rápidas y severas situaciones de inestabilidad en la zona del poliducto.

El estado actual del cruce del poliducto presenta un alto riesgo de falla ante la avenida de una crecida de ocurrencia normal. La evaluación y verificación de la estabilidad de las estructuras soporte muestra que el límite admisible de la profundidad de erosión total es del orden de 1,20 m a 1,80 m, valores que se pueden generar para caudales de bajas recurrencias.

También fue verificado que en caso de erosionarse un sector del río, el caño del poliducto no sería capaz de soportar su propio peso y el del fluido que transporta, trabajando como un tramo de viga sin el apoyo que le brinda el suelo, y además se producirían grandes desplazamientos que superan ampliamente el límite de deformaciones que puede soportar el ducto.

Ante esta situación, se han previsto una serie de medidas de refuerzo de carácter temporal las cuales no garantizan su eficacia ante una eventual crecida del río. El objeto de estas medidas consiste en mejorar la situación actual hasta tanto se proyecten y construyan las medidas definitivas necesarias para las características del cruce estudiado, de manera que el riesgo de falla se reduzca a su mínima expresión.

Los refuerzos proyectados disminuyen el riesgo de falla de la obra, ya que el límite admisible de la profundidad de erosión aumenta a 3,00 m, y la viga metálica brindará el apoyo adicional al caño en la situación de erosión general. Además, ante el eventual impacto de un objeto arrastrado por la corriente, la configuración estructural de los apoyos en forma de pórtico permitirá disipar la energía del impacto con deformaciones plásticas evitando el colapso de la estructura.

Considerando el fuerte impacto negativo que significaría la rotura de la obra, en base al material transportado y la cercanía a la Ciudad de Río Cuarto, se recomienda encarar con alta prioridad las obras de un cruce definitivo. Del análisis técnico – económico preliminar surge a priori como solución más conveniente un cruce de tipo aéreo mediante estructuras

prefabricadas; sin perjuicio de la necesidad de un estudio en detalle para la definición de una sección de cruce más estable y el posterior proyecto de obra definitiva.

LISTA DE SÍMBOLOS

H_{s_i} = profundidad total en franja i

q_i = caudal de diseño en franja i

β = coeficiente que depende de la probabilidad anual con que se presenta la crecida

d_s = diámetro medio del material del lecho

x = coeficiente que depende del diámetro de sedimento en suelo no cohesivo.

F_h = Fuerza de arrastre de la corriente de agua

CD = Coeficiente de arraste

A = Area expuesta al flujo

q_h = presión dinámica del agua en función de la velocidad de la corriente

ρ = densidad del agua

v = velocidad del agua

REFERENCIAS

Aguirre Pe, J. (1980): *Hidráulica de Sedimentos*. Facultad de Ingeniería, Universidad de Los Andes. Mérida, Venezuela.

AyEE (1967): *Presa Embalse Tincunaco sobre el Río Cuarto*. Provincia de Córdoba. Jefatura de Estudios Zona Centro. Agua y Energía Eléctrica S.E. Secretaria de Energía y Minería.

Breusers H.N.C., and Raudkivi A.J. (1991): *Scouring – Hydraulic structures- Design Manual*. AA Balkema.

Degiovanni, A. y Cantu, M. (1994): *Análisis de riesgo de erosión fluvial en un tramo del río Cuarto, Córdoba - Argentina*. Actas del XV Congreso Nacional del Agua. La Plata. Argentina.

Drilled Shafts Construction Procedures and Design Methods. Lymon C. Reese and Michael W O'Neill. Publication No. FHWA-HI-88-042. U.S.Department of Transportation, Federal Highway Administration. August 1988.

Earthquake Resistant Design. D.J. Dowrick. John Wiley and Sons, 1978.

Farías H. D. (2002): *Dimensionamiento de las Protecciones Márgenes y Lecho Fluvial*. Estudios para las el diseño de las obras complementarias de los azudes de Río Cuarto.

Farías H.D. y Pilán M.T. (2002): *Cálculo de las Profundidades de Socavación General en Cauces Aluviales. Aspectos Teóricos y Aplicaciones*. XX Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Cuba.

Hoffmans, G.J.C.M., Verheij, H.J. (1997): *Scour manual*. AA Balkema.

Hydrologic Engineering Center - HEC (2002): HEC-RAS. River Analysis System (version 3.1). User's Manual and Hydraulic Reference Manual. US Army Corps of Engineers. Davis, California.

Johnson, P.A. (1992): *Reliability-based pier scour engineering*. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 118, No. 10, pp. 1344-1358.

Johnson, P.A. (1995): *Comparison of pier-scour equations using field data*. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 121, No. 8, pp. 626-629.

Laursen E.M., Toch A. (1956): *Scour around bridge piers and abutments*. Bull. No. 4, Iowa Hwy. Res. Board, Ames, Iowa.

- Massera, Lilian (1999): *Análisis de la Situación de Riesgo de Inundación. Ciudad de Río Cuarto*. Informe interno. Dirección Provincial de Agua y Saneamiento. Provincia de Córdoba.
- William L.T. and Whitman R.V. (1972): *Mecánica de Suelos*. Editorial Limusa-Wiley, S.A. México.
- Menéndez, A.N., Salerno, G., Amores, G. (2002) *Un sistema de decisión para el cálculo de erosión local*. XX Congreso Latinoamericano de Hidráulica, La Habana, Cuba.
- Menéndez, A.N., Salerno, G., Amores, G. (2003): *Software "ELEHCA" for Local Scour Diagnosis*. 34th Annual Conference & Expo IECA (International Erosion Control Association), Las Vegas, USA, February, 2003.
- PROCATAN SRL (1999): *Cruce poliducto Monte Cristo – San Lorenzo con el río Cuarto*. Estudio de Suelos aplicado a Cruces Especiales. Informe Técnico. Río Cuarto, Provincia de Córdoba.
- Raudkivi A. (1990): *Losse Boundary Hydraulics*. Pergamon Press
- Schreider, M. I., Scacchi, G., Franco, F., Fuentes, R. y Moreno, C. (2001): *Aplicación del Método de Lischvan y Levediev al Cálculo de la Erosión General*. Ingeniería Hidráulica en México. Vol. XVI, N°1, pp. 15-26.
- Streeter V, Wylie B. (1994): *Mecánica de los Fluidos*. Tercera edición en Español de Fluid Mechanics. McGraw-Hill. México.
- U.S. Department of Transportation (1993): *Evaluating Scour at Bridges*. Hydraulic Engineering Circular N° 18, report FHWA-IP-90-017, Federal Highway Administration. Washington, DC, USA.
- UNC (2003): *Modelación Física Tridimensional a Fondo Móvil de los Azudes de la Ciudad Río Cuarto*. Laboratorio de Hidráulica. Universidad Nacional de Córdoba.
- WES (1997): *RMA2 – User Guide*. Version 4.3. US Army Corps of Engineers – Waterways Experiment Station. Hydraulics Laboratory.
- White, F. (1993): *Mecánica de Fluidos*. Traducción de Fluid Mechanics. McGraw-Hill. España.