

# **PROCESOS MORFOLÓGICOS EN CAUCES AFECTADOS POR UN DESCENSO EN SU NIVEL DE BASE. CASO DE ARROYOS EN LA REGIÓN ESTE DE LA PROVINCIA DE SALTA, ARGENTINA**

**Hector Daniel Farias**

Instituto de Recursos Hídricos, FCEyT-UNSE  
Av. Belgrano (S) 1912, (G4200ABT) Santiago del Estero, Argentina.  
E-mail: hfarias@bigfoot.com - Web: <http://irh-fce.unse.edu.ar/hdf>

## **RESUMEN**

Gran parte de los cursos fluviales (ríos y arroyos) que discurren de W a E en la región oriental de la provincia de Salta están experimentando en los últimos años importantes procesos morfológicos que afectan obras de infraestructura y conspiran contra el normal desarrollo de las actividades productivas de esa región. En este trabajo se analizan esos procesos a través del estudio de cinco arroyos de la región y se tipifican los procesos que en definitiva se reducen a respuestas morfológicas ante cambios de nivel de base inducidos por acciones antrópicas. Asimismo, se presentan los diseños propuestos para una serie de puentes que se proyectaron para reemplazar a los que colapsaron por efecto de los procesos mencionados, que afectaron un ramal ferroviario que se encuentra en rehabilitación.

## **ABSTRACT**

Most of the fluvial courses (rivers and creeks) located on the eastern region of Salta province (Argentina) flows from West to East. These channels are experiencing important morphological processes in the last years. The processes strongly affect infrastructure works and have negative influence on the normal development of production activities along the region. In this paper, five creeks located at the region are used to study those morphological processes, which are conceptually analyzed to show that the problem is originated by a lowering of the base level induced by man-made actions, such as river channelization. Furthermore, a set of proposed designs are presented for railway bridges that failed due to these erosion mechanisms, and are scheduled to be rebuild in the next time.

## **INTRODUCCIÓN**

El área de influencia de la traza de los ramales del Ferrocarril General Belgrano “Cargas” que se encuentra en procesos de rehabilitación luego de casi dos décadas de abandono, se ubica en la región Noreste (N-E) de la Provincia de Salta. En esta zona la traza atraviesa, en un marco regional perteneciente a la denominada “zona de las Yungas”, una cantidad apreciable de cursos fluviales (ríos y arroyos) que discurren de W a E y de N-W a S-E. Muchos de estos cursos cursos están experimentando en los últimos años importantes procesos morfológicos que afectan las obras de infraestructura (ferroviaria, vial y de otros servicios) y conspiran contra el normal desarrollo de las actividades productivas de esa importante región de Argentina.

En la segunda mitad de la década de 2000 han acontecido en la zona varios fenómenos (denominados “extremos” o “extraordinarios”) que han ocasionado severos procesos de transfiguración del paisaje geomorfológico y fundamentalmente metamorfosis fluvial en muchos de los ríos y arroyos. Sin embargo, analizando archivos históricos se ha constatado que esos fenómenos vienen ocurriendo desde finales de la década de 1970, pero que en los

últimos años se ha repetido con mayor asiduidad.

En este trabajo se presentan los resultados de un estudio en el que se analizaron los procesos morfológicos mencionados en cinco arroyos de la región, encontrándose que en definitiva los fenómenos de erosión y metamorfosis fluvial por incisión se presentan como consecuencia de las respuestas de los sistemas a alteraciones en el nivel de base, inducidos por acciones antrópicas fundamentalmente vinculadas a la afectación de tierras a la actividad agrícola y a la canalización de cursos fluviales.

## **OBJETIVOS**

El objetivo general de la investigación es el de analizar y tipificar los procesos que caracterizan el comportamiento durante las últimas décadas de una serie de arroyos ubicados en la región oriental de la provincia de Salta, incluyendo su implicancia sobre las obras de cruce existentes (fundamentalmente puentes viales y ferroviarios y cruces de conductos) sobre estos cursos.

Entre los objetivos específicos se distinguen: tipificación de los procesos para cada caso particular, estudio hidrológico regional y específico para cada cuenca, simulación hidráulica del comportamiento de los cursos para una serie de escenarios hidrológicos y propuesta de acciones para rehabilitar algunas de las obras de cruce afectadas por los procesos erosivos, fundamentalmente los puentes ferroviarios.

## **DESCRIPCIÓN DE LOS PROCESOS MORFOLÓGICOS**

Para el estudio a nivel regional de los procesos morfológicos que están experimentando los cursos fluviales y su incidencia sobre la traza de los ramales bajo estudio, se ha considerado conveniente dividir a la región de estudio en dos sub-regiones, a saber:

- (1) Arroyos y Quebradas situadas al Norte de Embarcación (Figuras 1 y 2)
- (2) Arroyos situados al Norte del Río Dorado (Apolinario Saravia) (Figuras 3 y 4)

En los mapas adjuntos se indica la ubicación de ambas sub-regiones, las que son analizadas en las secciones siguientes (Figuras 1 a 4).

Las áreas de estudio exhiben problemas similares desde el punto de vista hidrológico y fluvio-morfológico, por lo que los procesos detectados en estas zonas responden a un mismo patrón general, dentro de una sub-región que podría considerarse cuasi-homogénea.

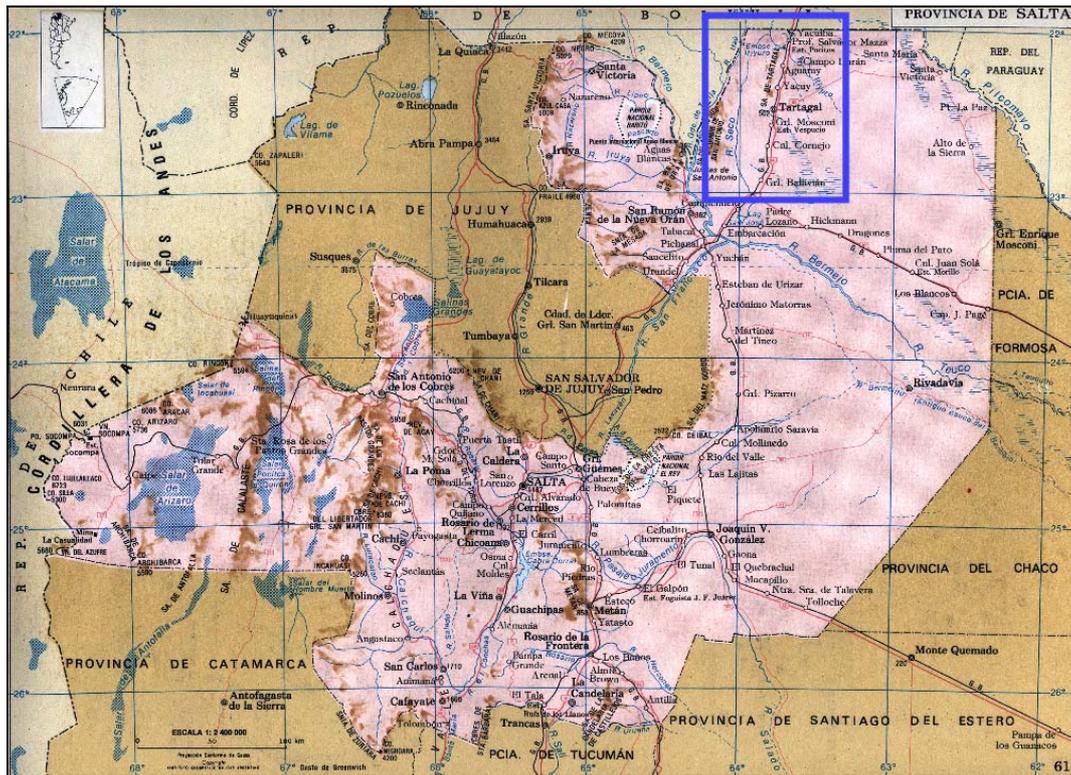


Figura 1.- Ubicación de la sub-región 1: Arroyos y Quebradas situadas al Norte de Embarcación

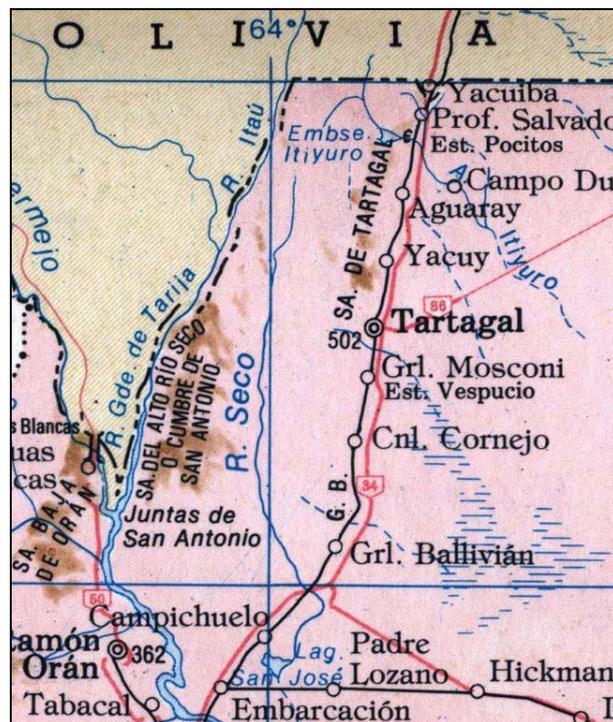


Figura 2.- Detalle sub-región 1: Arroyos y Quebradas situadas al Norte de Embarcación

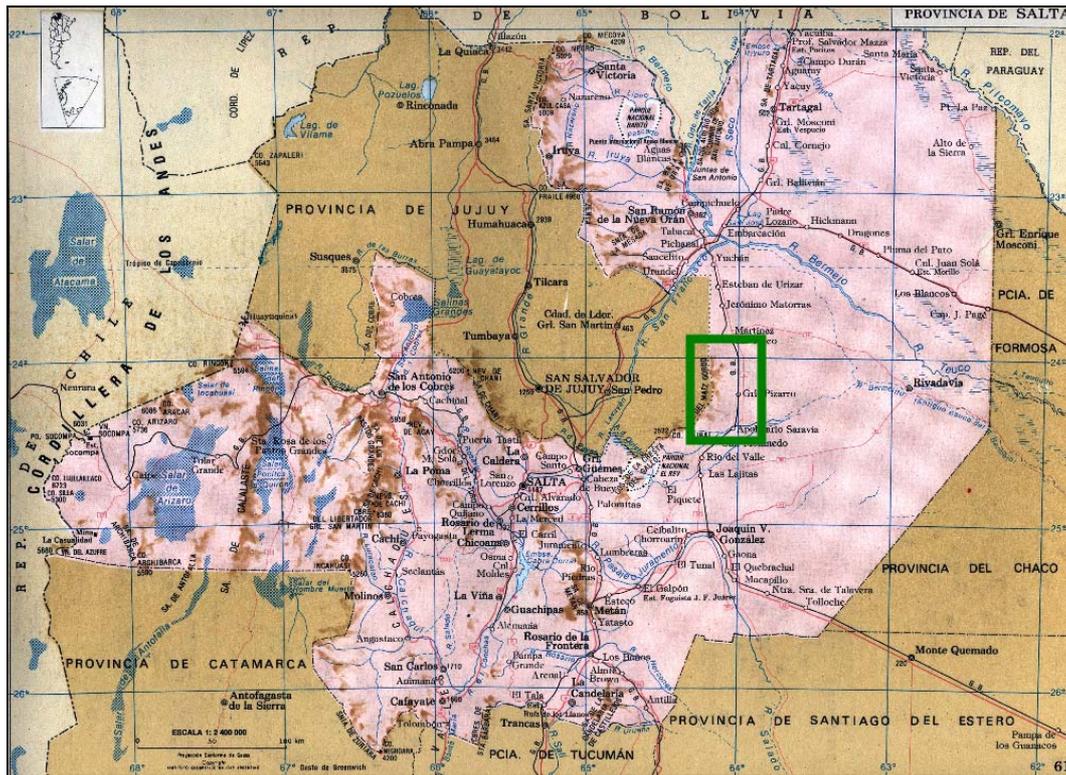


Figura 3.- Ubicación de la sub-región 2: Arroyos situados al Norte del Río Dorado (Apolinario Saravia)

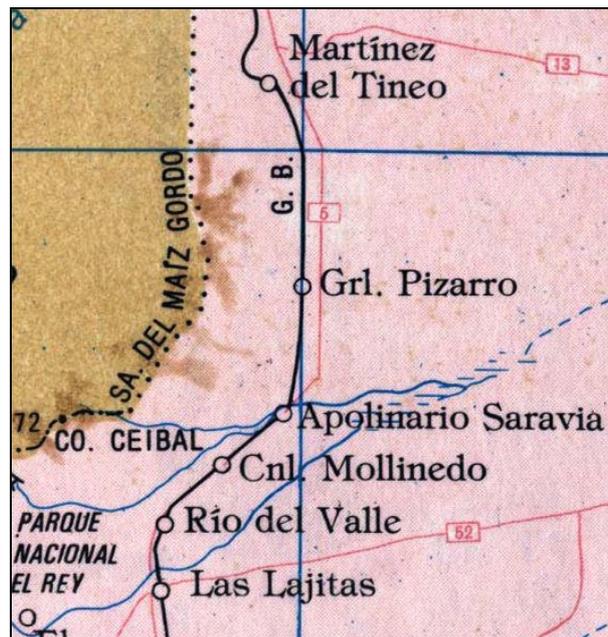


Figura 4.- Detalle sub-región 2: Arroyos situados al Norte del Río Dorado (Apolinario Saravia)

En la Sub-región 1 (Figura 2) se incluyen varios ríos y arroyos, entre los que pueden mencionarse (en dirección norte a sur) los siguientes: Arroyo sin denominación (NN), Qa. Zanja Honda, Qa. Cuña Muerta. Todos estos arroyos muestran importantes procesos erosivos a lo largo de su curso, pero fundamentalmente los mismos se evidencian en las proximidades de los puentes y alcantarillas sobre la traza del FF CC G. Belgrano y la R.N. 34.

Resulta evidente que el área situada al Este de la R.N. 34 ha sido alterada antrópicamente para ser afectadas grandes superficies de territorio a la explotación agrícola exhaustiva, fundamentalmente al cultivo de soja y poroto. Mediante un análisis multitemporal expeditivo basado en el uso de imágenes satelitales Landsat desde fines de la década de 1970 hasta la actualidad (año 2009) se pudo visualizar de manera evidente este fenómeno. Esta (franja al Este de la RN 34) es una región en la que la condición natural se caracterizaba por albergar los tramos inferiores de todos los cursos que descienden desde las serranías de Tartagal y los sistemas montañosos situados más al Norte.

Estos cursos se caracterizaban por un patrón de alineamiento en planta divagante, meandriforme y de muy bajos gradientes, con lo que los caudales de crecidas prácticamente se dispersaban en esta zona. Con la explotación agrícola, muchos de estos cauces fueron literalmente “borrados” del territorio a través del desbosque y posterior laboreo de tierras y la mayoría de los cauces se reemplazaron por canales rectilíneos localizados en las líneas de linderos de las propiedades.

La principal consecuencia geomorfológica de estas acciones se reduce a un marcado descenso en el nivel de base de todos estos cursos, lo cual ha generado severos procesos de erosión retrógrada, que ha avanzado hasta exhibir las discontinuidades de la pendiente del lecho en la vecindad inmediata aguas abajo de cada uno de las obras de cruce (puentes y alcantarillas), tanto de la RN 34 como de la traza del FF CC GB. En esta situación, resulta muy alto el riesgo potencial de sufrir averías y/o colapso por parte de estas estructuras en las temporadas de lluvias que afectan las cuencas de aporte (de diciembre a marzo).

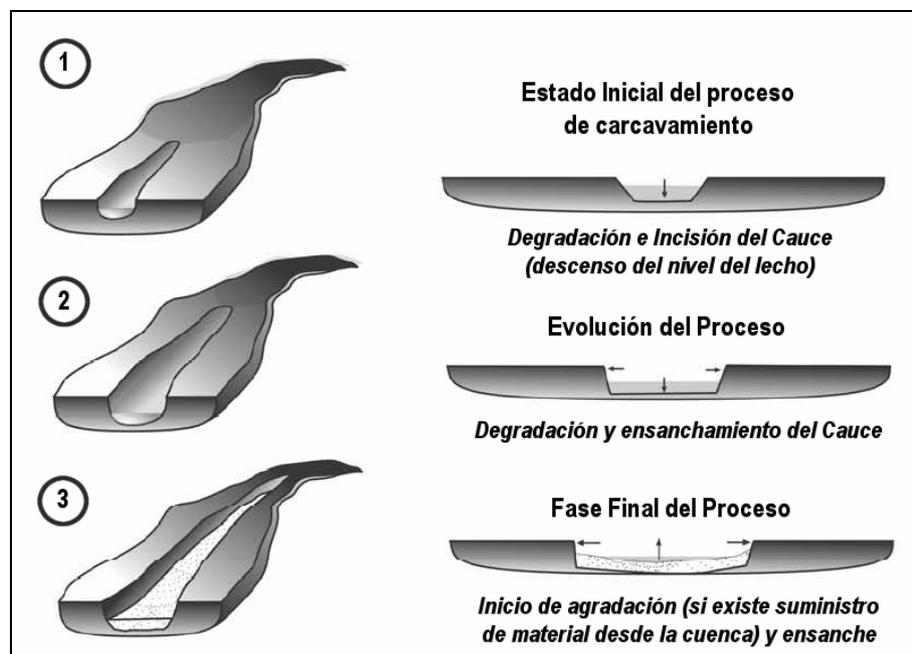


Figura 5.- Evolución del proceso de incisión de cauces por descenso del nivel del lecho.

La magnitud de estos procesos ha sido comprobada en las visitas de campo realizadas a cada uno de los cruces mencionados previamente. También se deduce a partir de la inspección de las secciones transversales indicadas en antiguos planos de los puentes (en los que se especifica la diferencia de altura entre el lecho existente en la época en que los puentes fueron

construidos o reparados y el borde inferior de viga proyectada para el puente). Una estimación cuantitativa preliminar indica descensos variables de 2 m a 4 m (respecto del “nivel inicial” del lecho) en la mayoría de los casos (Figura 5).

Por su parte, teniendo en cuenta la tendencia a la evolución futura de estos rasgos morfológicos, la expectativa en el mediano plazo de estos procesos de “metamorfosis fluvial” (Julien, 2002) indica que es de esperar que los cauces experimenten un ensanchamiento (mediante fenómenos de erosión basal y falla geomecánica de márgenes, de acuerdo al modelo conceptual sugerido por Simon en 1989, Figuras 8 y 9). Por lo tanto, la implicancia inmediata (teniendo en cuenta las escalas de tiempo ingenieril de las obras proyectadas) en cuanto al comportamiento futuro de los puentes (a reparar y/o reconstruir) se orienta hacia un ensanchamiento y profundización de los cauces, por lo que resulta necesario analizar la alternativa de nuevos puentes de mayor luz y, en los casos en que ello no sea posible, diseñar obras de protección de márgenes, adecuación fluvial en el segmento de aproximación a los puentes y disponer protecciones (asociadas a un estricto programa de mantenimiento periódico) para controlar los procesos de erosión por contracción y en estribos.



Figura 6.- Arroyo Tortugas en proximidades de la ruta provincial No. 5 y la traza del Ferrocarril Belgrano (escena Jul. 2008).

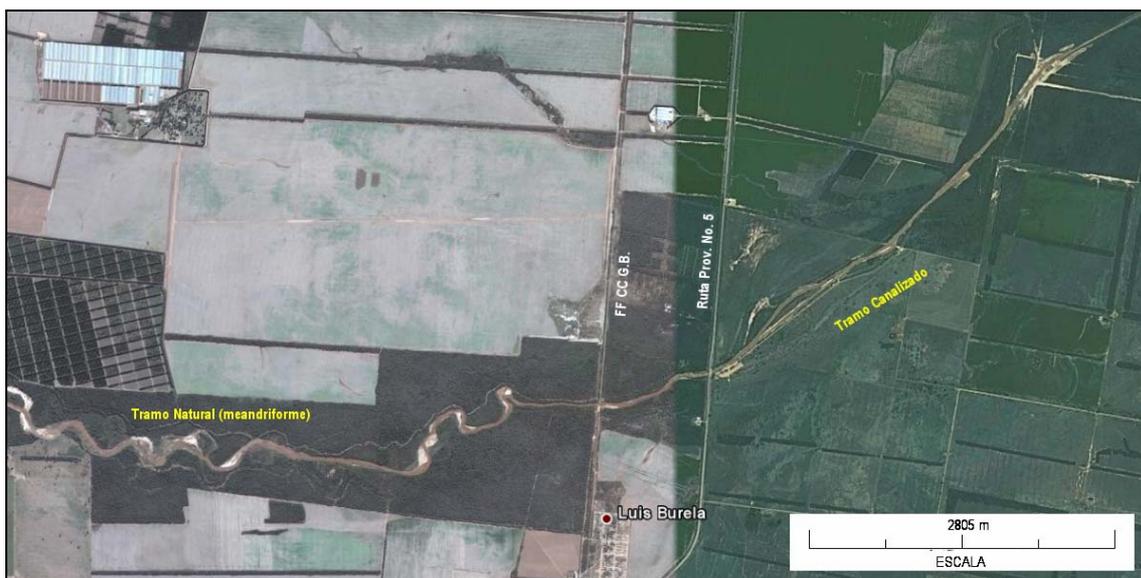


Figura 7.- Arroyo Cabeza de Vaca en proximidades de la ruta provincial No. 5 y la traza del Ferrocarril Belgrano (escena Jul. 2008).

En el caso de los arroyos situados al Norte del Río Dorado (Subregión 2, Fig. 4), no obstante

estar situados unos 200 km al sur del centro de la Sub-región 1, presentan un comportamiento de los cauces marcadamente similar al del caso anterior. En este caso, los dos arroyos analizados (Tortugas –Figura 6- y Cabeza de Vaca –Figura 7-) también muestran indicios de estar experimentando procesos evolutivos caracterizados por fenómenos de incisión y agrandamiento de sus secciones transversales. En ambos casos, las crecidas producidas en estos arroyos han generado el colapso de los puentes sobre el FF CC GB.

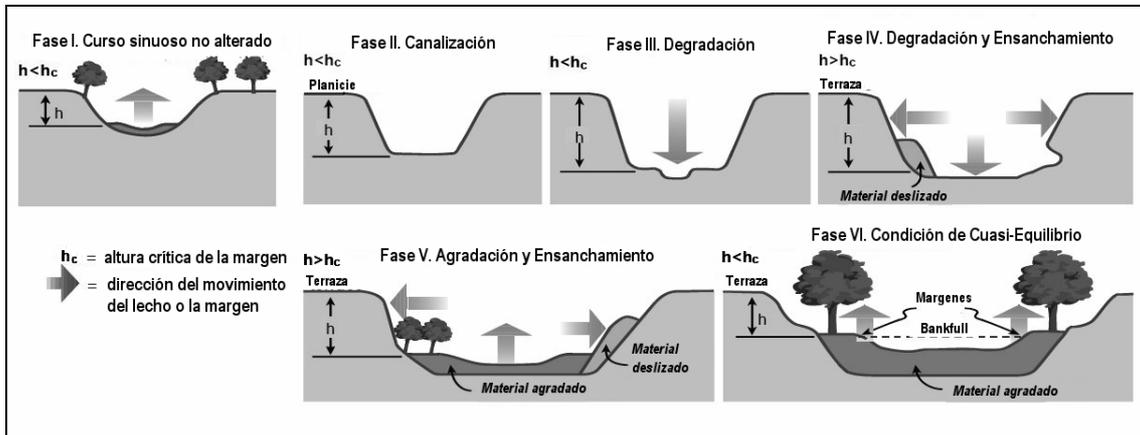


Figura 8.- Modelo conceptual de la evolución de un cauce canalizado (Simon, 1989)

La Figura 8 (Simon, 1989) muestra el modelo conceptual de desarrollo evolutivo de un cauce fluvial luego de haber sufrido una acción de canalización, es decir, alteración de su sinuosidad y estrechamiento de su sección. Observando las imágenes de las Figuras 6 y 7, y las fotografías de terreno (Figuras 12 a 26) resulta evidente que este modelo describe adecuadamente el comportamiento de los arroyos estudiados.

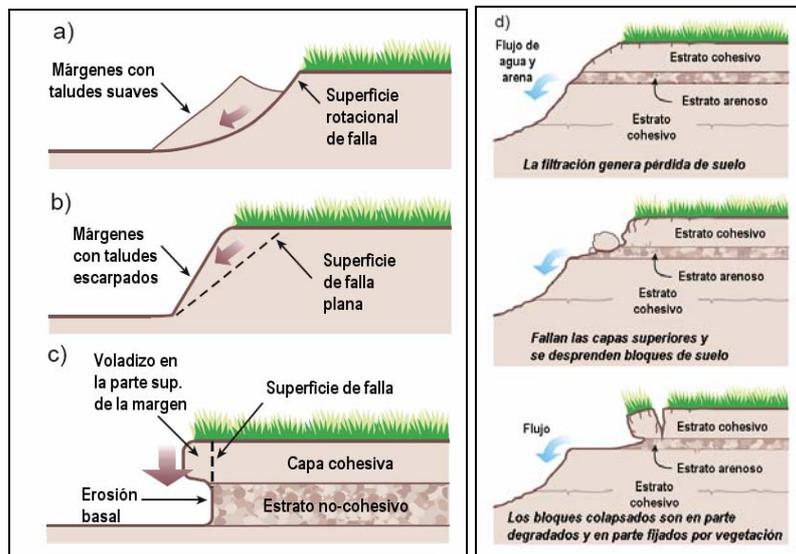


Figura 9.- Modelo conceptual de la evolución de un cauce por procesos de erosión de márgenes

La Figura 9 muestra en detalle los procesos de erosión de márgenes que se presentan en estos arroyos (fases IV y V del modelo de Simon), los que efectivamente han sido constatados en campo y a partir de los análisis geotécnicos realizados sobre los materiales presentes en las márgenes de los arroyos, principalmente clasificados como suelos del tipo CL-ML en el

## SUCS.

En la Figura 10 se presenta una conceptualización del proceso de canalización (cuya finalidad es eliminar la presencia de zonas deprimidas con cauces divagantes y áreas lagunares, conduciendo los cauces a ríos de mayor orden situados aguas abajo), el cual ha sido simplificado a tres estados característicos. En los bloques se explica el comportamiento del sistema en cada uno de esos estados.

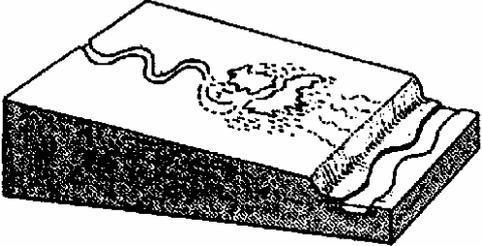
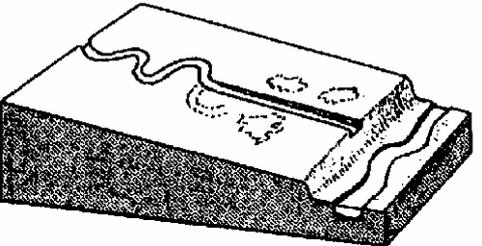
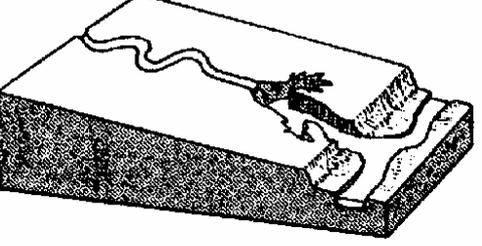
	<p><b>Estado E1.</b> El curso menor, como consecuencia de su baja pendiente, pierde capacidad de conducción y genera desbordes y zonas lagunares. Cuando estas áreas se saturan, la descarga al curso mayor se produce a través de un patrón de escorrentía de tipo mantiforme.</p>
	<p><b>Estado E2.</b> Cuando el cauce menor es canalizado con un trazado rectilíneo a través del área de bañados, se genera una descarga en forma de flujo concentrado al curso mayor, dando lugar a un descenso del nivel de base, el cual depende de la diferencia de cotas entre el área lagunar y el curso mayor.</p>
	<p><b>Estado E3.</b> Como consecuencia del descenso en el nivel de base (descarga del curso canalizado en el cauce mayor) se genera un proceso de erosión retrógrada. El fenómeno erosivo se propaga hacia aguas arriba, se expande en forma dendrítica y captura al curso menor, produciendo la metamorfosis fluvial del mismo (incisión / ensanchamiento, etc.).</p>

Figura 10.- Conceptualización de los procesos erosivos inducidos por canalización.

Se observa que la acción de canalización genera un descenso en el nivel de base y a partir de ello se desencadena el proceso de erosión retrógrada (Knighton, 1994; Leopold et al., 1964). El fenómeno erosivo se propaga hacia aguas arriba, se expande en forma dendrítica y captura al curso menor, produciendo la metamorfosis fluvial del mismo (incisión / ensanchamiento, etc.), de acuerdo al modelo conceptual previamente presentado.

Nuevamente, las fotografías de terreno evidencian claramente que este modelo describe adecuadamente lo que acontece con los arroyos estudiados.

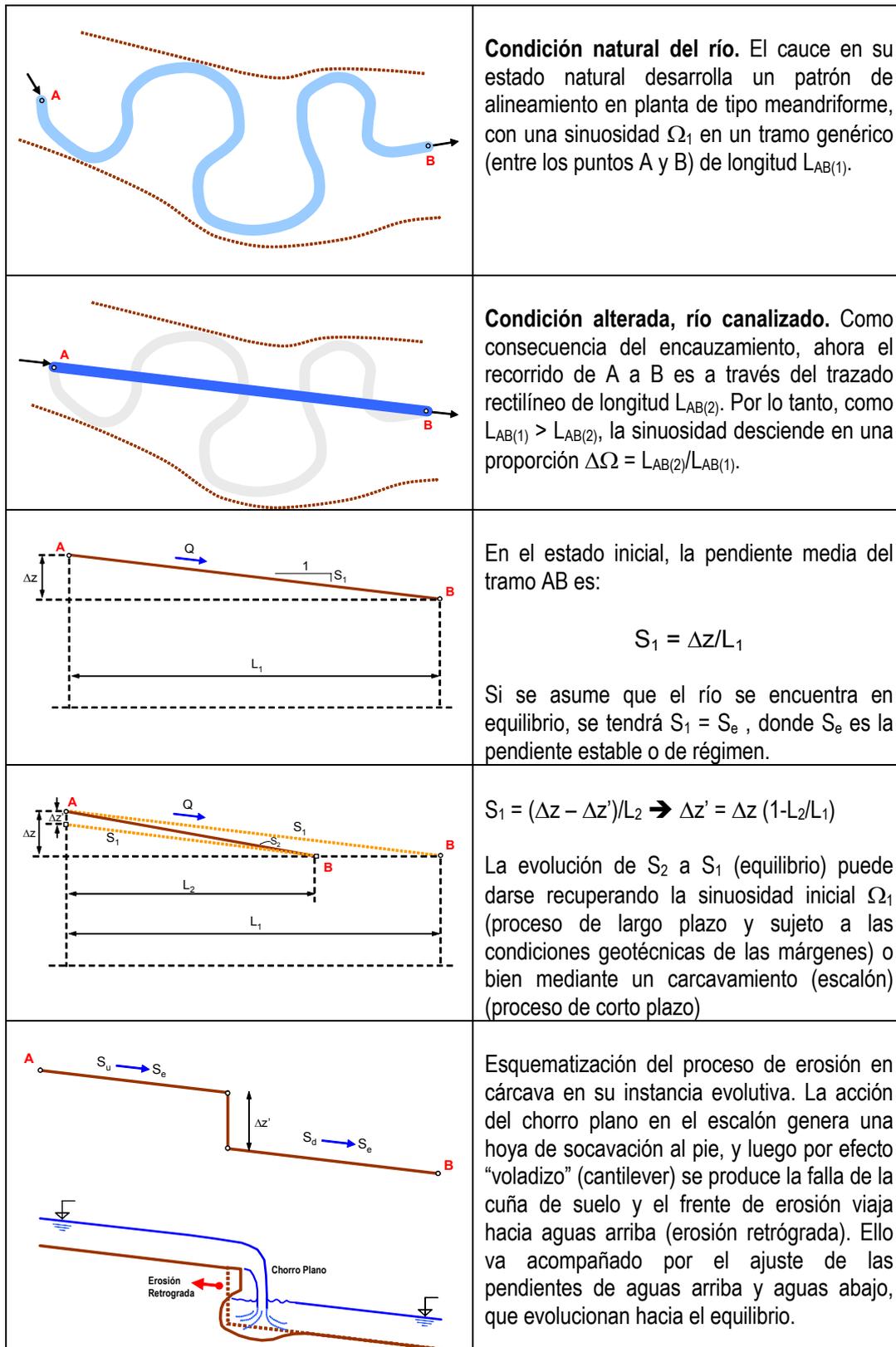


Figura 11.- Modelo conceptual de evolución del proceso de erosión en cárcava ante un cambio en el nivel de base.

En la Figura 11 se ilustra un Modelo conceptual de evolución del proceso de erosión en cárcava ante un cambio en el nivel de base.

A continuación se presenta una serie de fotografías de los arroyos estudiados en distintos sitios en los que se ha producido una afectación importante a obras de infraestructura (vial, ferroviaria y de otros servicios). En cada foto se explica el proceso observado.



**Figura 12.-** Arroyo Cuña Muerta inmediatamente aguas arriba del puente sobre la RN 34. Se observa un importante proceso de erosión de márgenes (MD) que ha llevado a la destrucción de la obra de protección conformada en muro de gaviones. El estribo de margen derecha (Sud) se encuentra en una situación de alta vulnerabilidad potencial para el próximo período de lluvias en la región. Este punto se sitúa a unos 800 m aguas abajo del cruce de las vías del FCCGB y se observa como está evolucionando la sección transversal.



**Figura 13.-** Arroyo Cuña Muerta inmediatamente aguas abajo del cruce de las vías del FCCGB. Se observa claramente la diferencia entre la sección transversal actual del cauce y la sección hidráulica del puente. Los efectos de contracción son altamente significativo y se aprecian importantes procesos erosivos en los pies de estribos. También puede apreciarse un precario umbral de fondo aguas abajo del puente (a la altura de la línea que acota el ancho). Se recomienda incrementar la sección hidráulica.



**Figura 14.-** Arroyo Zanja Honda. Revestimiento del cauce con hormigón en el segmento de aproximación inmediatamente aguas arriba del puente sobre la R.N. 34.



**Figura 15.-** Arroyo Zanja Honda. Vista hacia aguas abajo desde la sección del puente sobre la R.N. 34. Se observa el descenso del nivel del lecho en la sección de restitución al cauce natural aguas abajo del puente.



**Figura 16.-** Arroyo Zanja Honda. Detalle de la obra colapsada aguas abajo de la sección del puente sobre la R.N. 34. Se observa el descenso del nivel del lecho y el desnivel existente (del orden de 2 metros) que ha generado la destrucción de la platea, con severos procesos erosivos en ambas márgenes. La amenaza a la estabilidad del puente es significativa ante la eventualidad de incremento en los caudales líquidos esperables en la próxima estación estival.



**Figura 17.-** Arroyo Zanja Honda. Otra vista de los procesos erosivos sobre margen derecha en la obra de descarga situada inmediatamente aguas abajo del puente sobre la R.N. 34.



**Figura 18.-** Arroyo Zanja Honda. Vista general (hacia aguas arriba) de la obra destruida, tomada desde el centro del cauce aguas abajo del puente. Resulta necesario y urgente reparar esta obra e instrumentar acciones de protección de la misma para evitar el colapso del puente.



**Figura 19.-** Arroyo Zanja Honda. Otra vista de la situación anterior.



**Figura 20.-** Arroyo NN ubicado al norte de A° Zanja Honda y al sur del A° Yariaguarenda. Fotografía tomada desde la margen derecha aguas abajo de la alcantarilla cajón de dos celdas sobre la R.N. 34. Nuevamente se observa un proceso de degradación del lecho y erosión retrógrada que ha generado una diferencia de nivel entre la cota del fondo del arroyo y la platea de la alcantarilla del orden de 4 metros. Se observan vestigios de obras precarias en la zona pero se desconoce si este tema ha sido abordado por parte de la DNV para instrumentar medidas de protección y control de la erosión al pie de la platea ante la inminencia de la temporada de lluvias y la situación de riesgo potencial de la obra.



**Figura 21.-** Arroyo NN ubicado al norte de A° Zanja Honda y al sur del A° Yariaguarenda. Fotografía tomada desde la R.N. 34 hacia aguas abajo. Se observan algunos trabajos de movimiento de suelos aparentemente realizados por las empresas que operan los gasoductos y poliductos destapados que se aprecian en segundo plano.



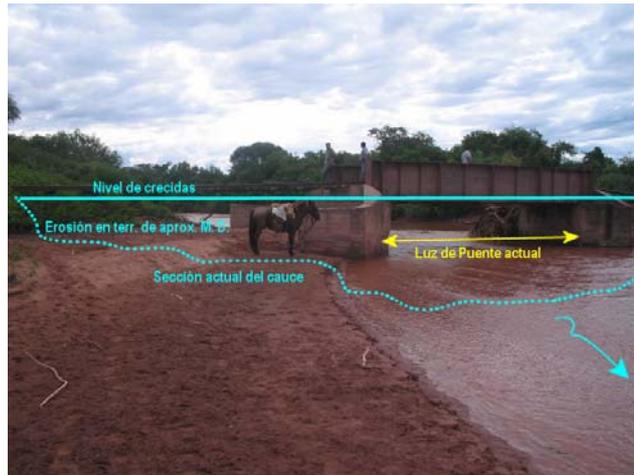
**Figura 22.-** Arroyo NN ubicado al norte de A° Zanja Honda y al sur del A° Yariaguarenda. Vista de los daños producidos por lo procesos erosivos sobre el paquete estructural de la R.N. 34 en ambas márgenes, con las reparaciones de la carpeta asfáltica.



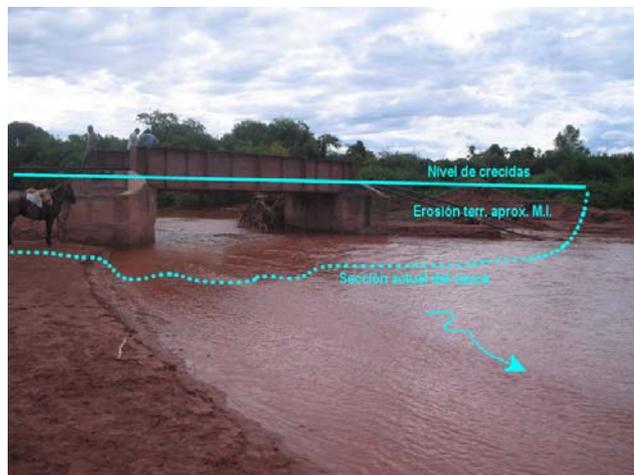
**Figura 23.-** Arroyo Tortugas. Vista hacia aguas arriba. Puede observarse el importante proceso de cárcavamiento a que está sometido este curso.



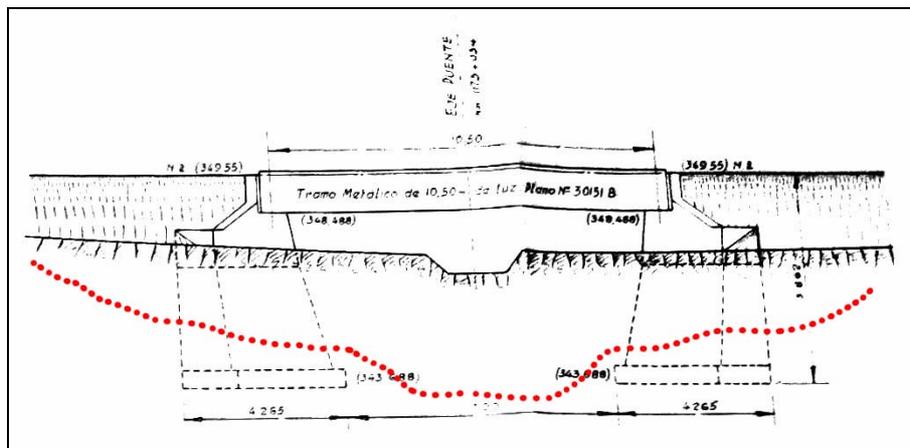
**Figura 24.-** Arroyo Tortugas. Vista hacia aguas arriba. Detalle de la cabecera de la cárcava, la cual evoluciona hacia aguas arriba produciendo un descenso de la cota del lecho del orden de los 2,0 metros.



**Figura 25.-** Arroyo Cabeza de Vaca. Vista desde aguas abajo hacia aguas arriba del puente en su condición actual. Se deduce claramente la insuficiencia hidráulica del mismo y se observan los procesos erosivos sobre la región del terraplén de aproximación de margen derecha.



**Figura 26.-** Arroyo Cabeza de Vaca. Vista desde aguas abajo hacia aguas arriba del puente en su condición actual. En este caso se observa la sección transversal actual del cauce y los procesos erosivos sobre el terraplén de margen izquierda.



**Figura 27.-** Plano original del puente ferroviario sobre el Arroyo Cabeza de Vaca (década de 1950). Se observa la sección original del curso. En línea punteada roja se ha esquematizado aproximadamente la sección encontrada durante los relevamientos de campo (año 2007). Puede apreciarse la metamorfosis fluvial de este arroyo en función de los procesos morfológicos antes descriptos.

Ante esta situación encontrada en cuanto al patrón de comportamiento de los sistemas fluviales, se decidió llevar a cabo una modelación hidráulica de los tramos analizados con la finalidad de dimensionar un conjunto de nuevos puentes a proyectar con la finalidad de resolver el problema de incomunicación terrestre causado por los procesos morfológicos antes mencionados.

A continuación se presentan los resultados obtenidos a través de la modelación hidráulica de los cursos y el pre-dimensionamiento de puentes.

### **ANÁLISIS HIDRÁULICO DE LOS CURSOS Y PRE-DISEÑO DE PUENTES**

A continuación se presentan en forma sintética los resultados del análisis llevado a cabo para el estudio hidráulico de los puentes considerados críticos (que definen las obras prioritarias) emplazados sobre el tramo estudiado, que comprende una serie de cauces con un patrón de comportamiento altamente evolutivo, tal como se describiera en la sección sobre estudios fluvio-morfológicos.

Asimismo, se describen las técnicas empleadas para el estudio de estos cauces y la metodología final utilizada para definir los diseños de los puentes. En particular, se realizó un estudio de sensibilidad de los parámetros de diseño que se encuentran a través de la aplicación refinada del modelo HEC-RAS, esencialmente en lo que se refiere a los métodos para calcular las socavaciones por contracción, en estribos y en pilas, y así definir la tipología y dimensiones de los elementos estructurales de cimentación de los puentes.

Considerando los resultados de los estudios fluviales e hidrológicos, una vez definidos los hidrogramas de diseño, se realizó un análisis hidráulico de los cursos fluviales y vías de flujo en las zonas de cruces del eje del trazado del ramal de FF CC.

Las características hidráulicas del tramo cercano al emplazamiento de cada cruce se investigaron con la aplicación del modelo matemático hidrodinámico (1D) HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center - U. S. Army Corps of Engineers) (Dyhouse et al., 2003), el cual está basado en una solución numérica de la ecuación diferencial del flujo gradualmente variado en cauces de secciones no prismáticas mediante la implementación del método estándar por etapas (standard step method).

Para la aplicación del modelo se procedió a utilizar los resultados del relevamiento topográfico en campaña de un conjunto de secciones transversales de los cauces, localizadas tanto aguas arriba como aguas abajo de la sección de cruce. Asimismo, se analizaron las características de rugosidad del cauce que definen la resistencia al escurrimiento de los contornos del mismo. La aplicación del modelo permitió la estimación de los niveles alcanzados por la superficie libre del flujo para el escenario asociado al caudal de diseño y además otras variables hidráulicas de interés para el análisis hidráulico de los puentes, tales como velocidades del flujo, relaciones altura-caudal ( $h-Q$ ), números de Froude en distintas secciones, etc.

Los detalles de la aplicación en cuanto a la modelación hidráulica se presentan en las secciones siguientes.

Las estrategias metodológicas consideradas para la modelación hidráulica estuvieron condicionadas por las características morfológicas de los arroyos estudiados en los tramos de interés.

Para cada uno de los arroyos se realizaron los siguientes estudios:

- Conceptualización de los procesos de erosión lateral de márgenes y estimación de las posibles tasas de desplazamiento de las márgenes ante los escenarios hidráulicos seleccionados.
- Caracterización morfo-dinámica del tramo, con evaluación de los patrones de alineamiento planimétrico, sinuosidad y tendencias evolutivas en respuesta a eventos hidrológicos extremos.
- Estimación de las profundidades de socavación por contracción, en estribos y en las pilas del puente, para los diferentes escenarios hidrológicos seleccionados.

A continuación se presenta la metodología aplicada para definir la geometría y dimensiones de los puentes en base al análisis hidráulico de cada uno de los cruces, utilizando los resultados de los estudios hidrológicos, así como también los datos proporcionados por los relevamientos topográficos y estudios de suelos y sedimentos, en complemento con técnicas de modelación hidrodinámica para optimizar el diseño a adoptar.

Para cada cruce se presenta un resumen de los productos del modelo HEC-RAS, consistente en:

- ◆ Perfil Hidráulico general del tramo modelado, incluyendo la geometría del puente adoptada como resultado de la modelación.
- ◆ Geometría de la sección transversal situada inmediatamente aguas arriba del puente proyectado, con indicación del nivel de aguas máximas (NAM) para una recurrencia de 100 años.
- ◆ Visualización tridimensional (3D) del tramo modelado, que permite apreciar una visión de conjunto de la manera en que se ubica el puente y la mancha de inundación asociada a la crecida de diseño.
- ◆ Sección transversal aguas arriba con la distribución lateral de velocidades, lo que permite estimar las socavaciones esperables en la estructura proyectada.
- ◆ Sección transversal del puente con indicación de las profundidades de socavación asociadas a una recurrencia de 50 años.

Los resultados se presentan en las figuras siguientes.

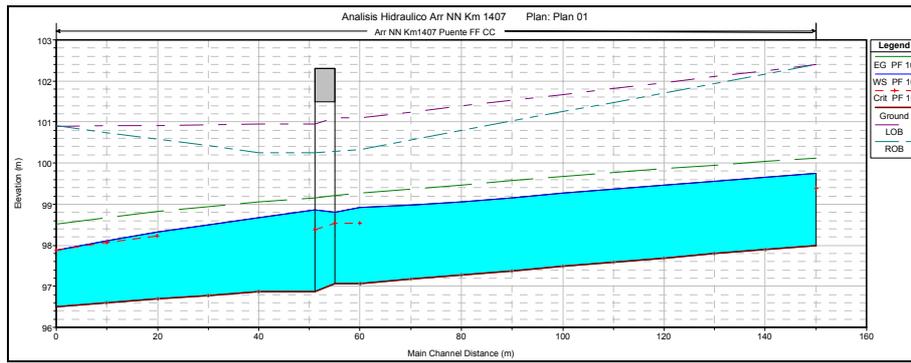


Figura 28.- Arroyo NN Km 1407. Perfil Hidráulico para Q [TR = 100 años].

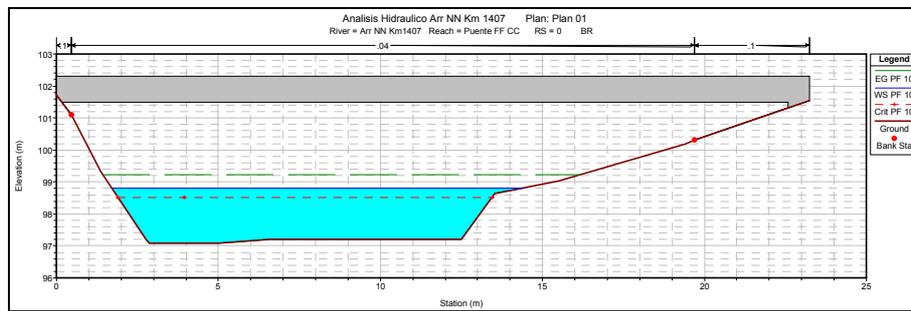


Figura 29.- Arroyo NN Km 1407. Sección Puente L = 25 m para Q [TR = 100 años]. Cota NAM = 98.81.

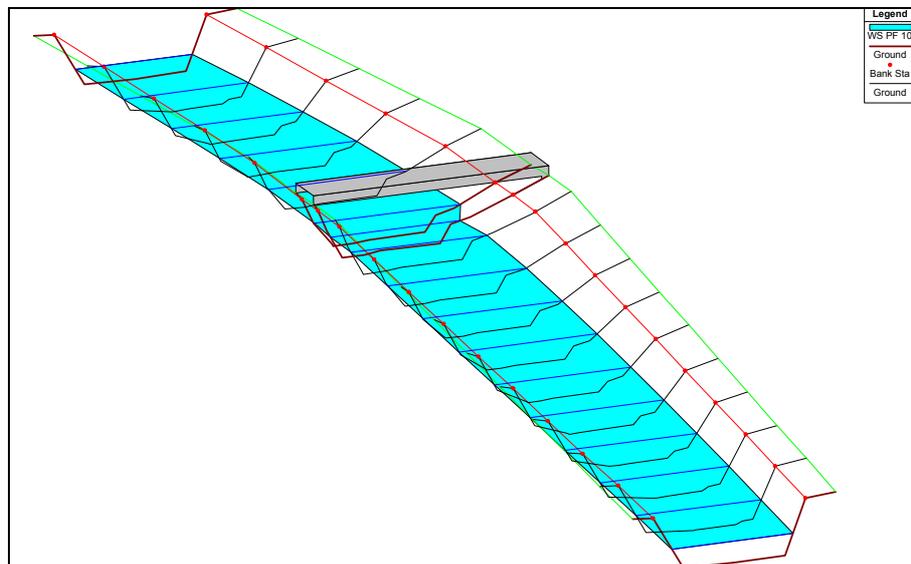
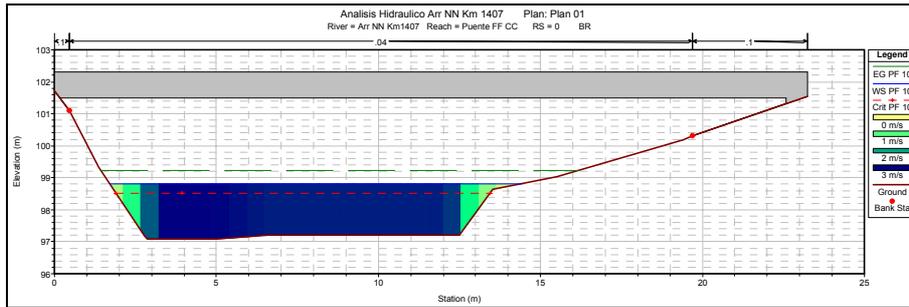
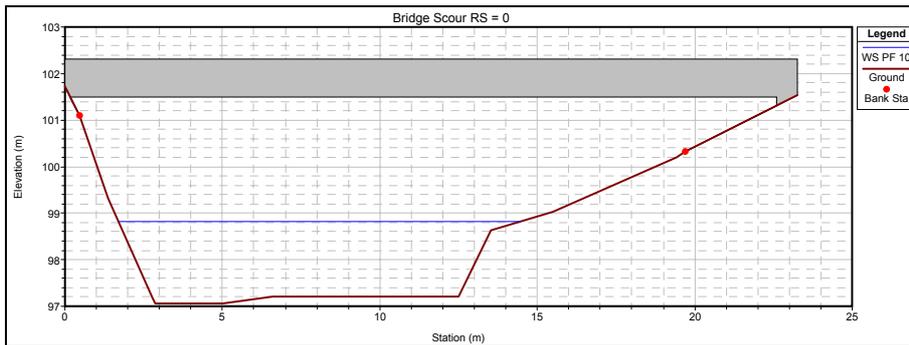


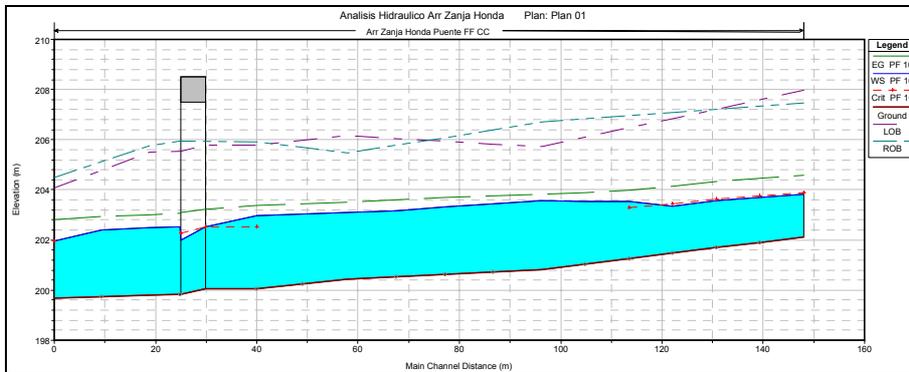
Figura 30.- Arroyo NN Km 1407. Vista 3D (hacia aguas abajo) Mancha Inundacion Puente L = 25 m para Q [TR = 100 años]. Cota NAM = 98.81



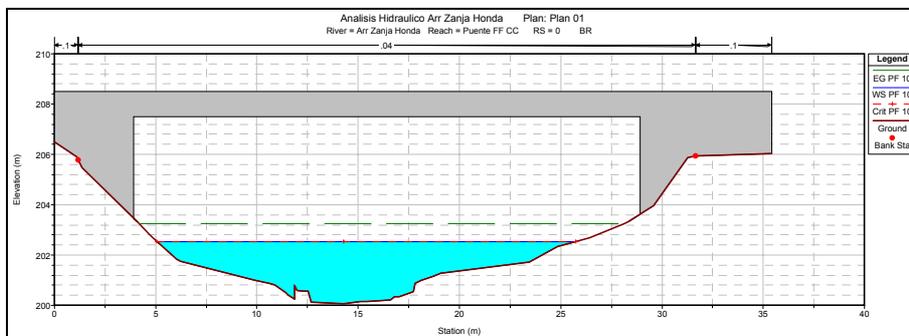
**Figura 31.-** Arroyo NN Km 1407. Distribución de Velocidades, Sección Puente L = 25 m para Q [TR = 100 años]. Cota NAM = 98.81



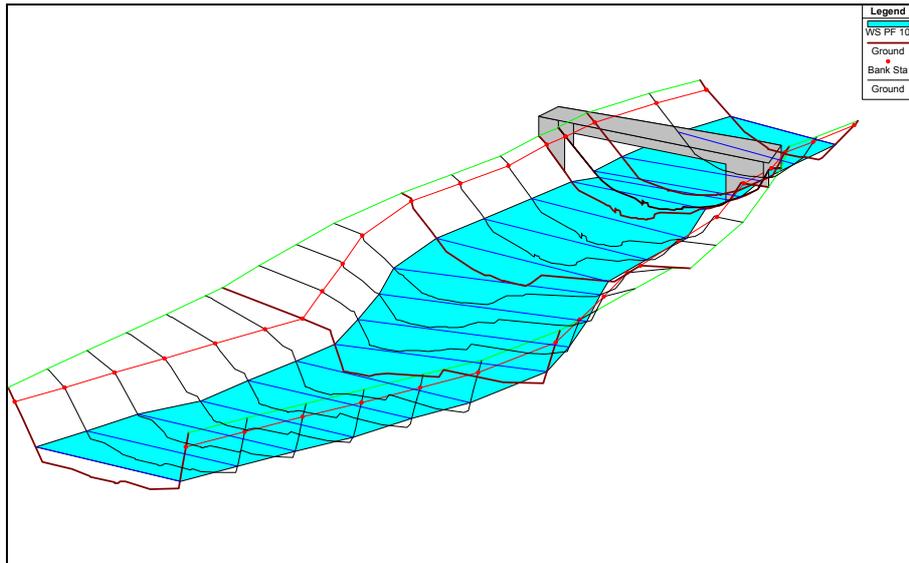
**Figura 32.-** Arroyo NN Km 1407. Erosiones Locales: despreciables.



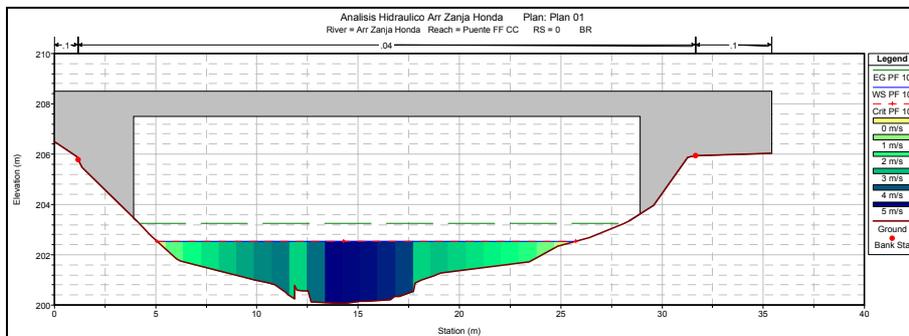
**Figura 33.-** Arroyo Zanja Honda. Perfil Hidráulico para Q [TR = 100 años]



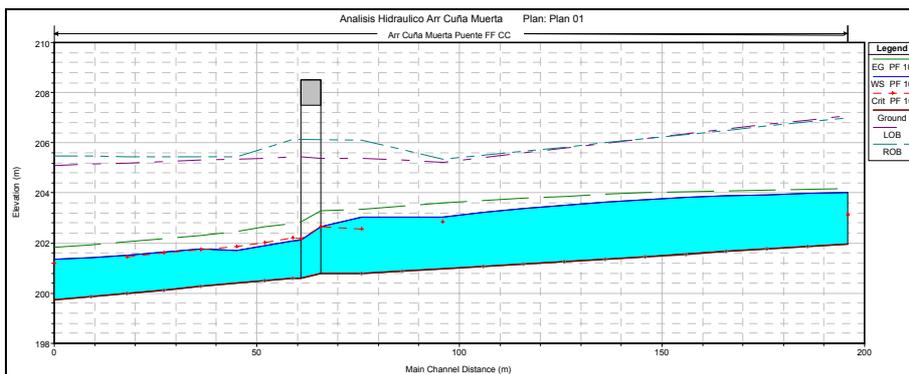
**Figura 34.-** Arroyo Zanja Honda. Sección Puente L = 25 m para Q [TR = 100 años]. Cota NAM = 202.54



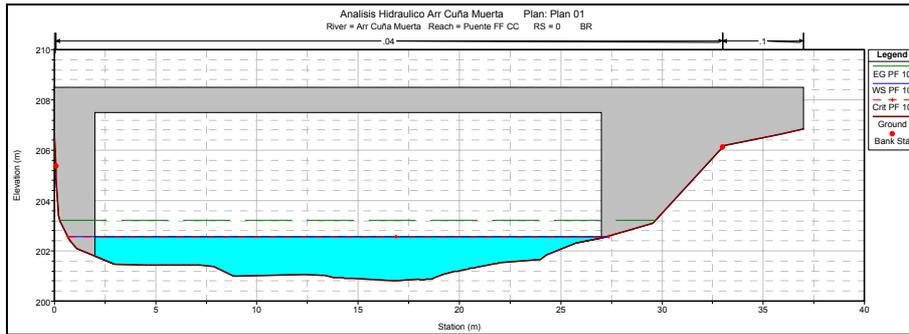
**Figura 35.-** Arroyo Zanja Honda. Vista 3D (hacia aguas abajo) Mancha Inundacion Puente L = 25 m para Q [TR = 100 años]. Cota NAM = 202.54



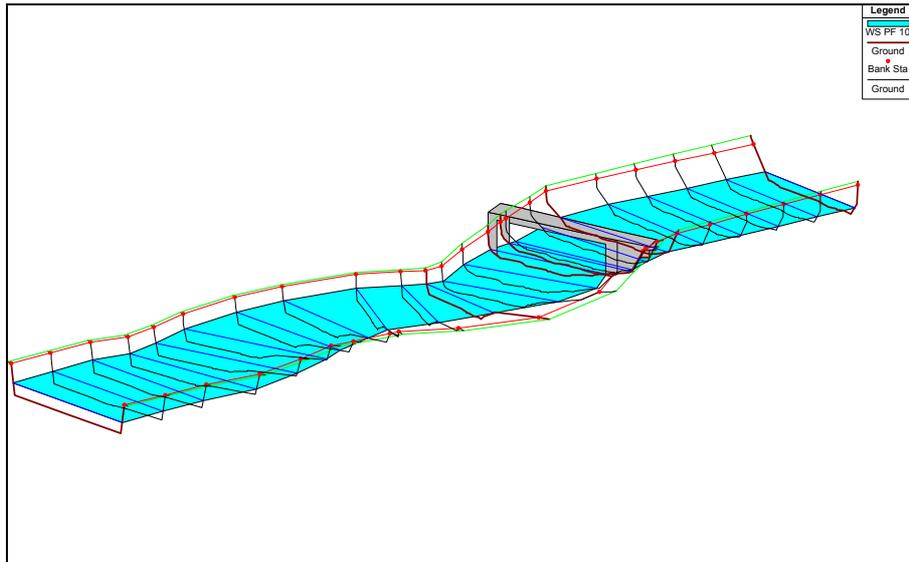
**Figura 36.-** Arroyo Zanja Honda. Distribución de Velocidades, Sección Puente L = 25 m para Q [TR = 100 años]. Cota NAM = 202.54. Arroyo Zanja Honda. Las Erosiones Locales en pilas, por contracción y en estribos son nulas porque el puente no genera efectos de contracción dada su geometría que contiene al cauce en su totalidad. Se puede asumir una erosión accidental del orden de 1 metro para tener en cuenta posibles efectos de troncos depositados en el cauce



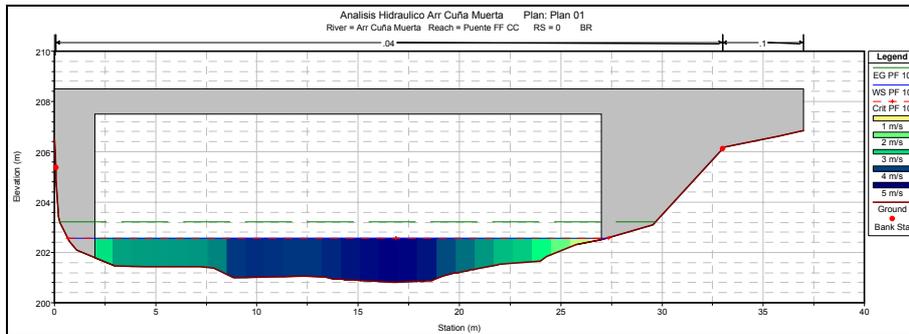
**Figura 37.-** Arroyo Cuña Muerta. Perfil Hidráulico para Q [TR = 100 años]



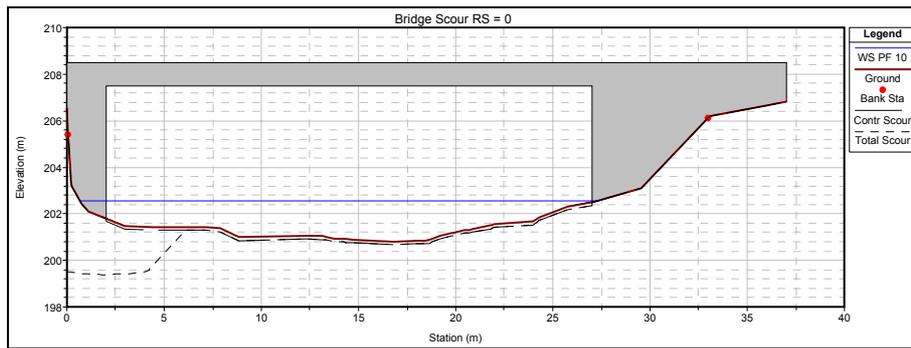
**Figura 38.-** Arroyo Cuña Muerta. Sección Puente L = 25 m para Q [TR = 100 años]. Cota NAM = 202.58



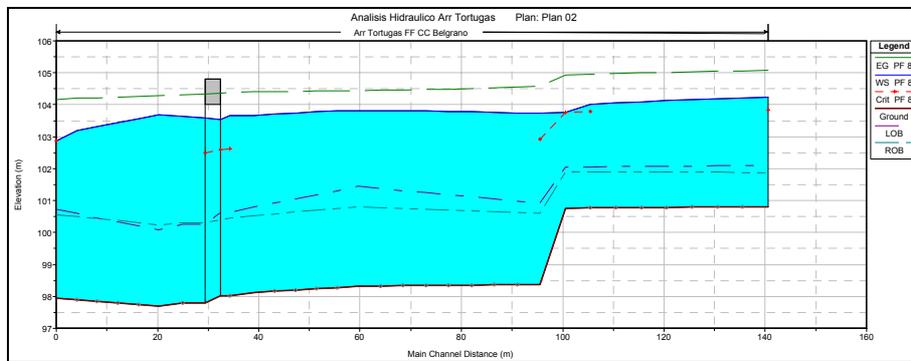
**Figura 39.-** Arroyo Cuña Muerta. Vista 3D (hacia aguas abajo) Mancha Inundacion Puente L = 25 m para Q [TR = 100 años]. Cota NAM = 202.58



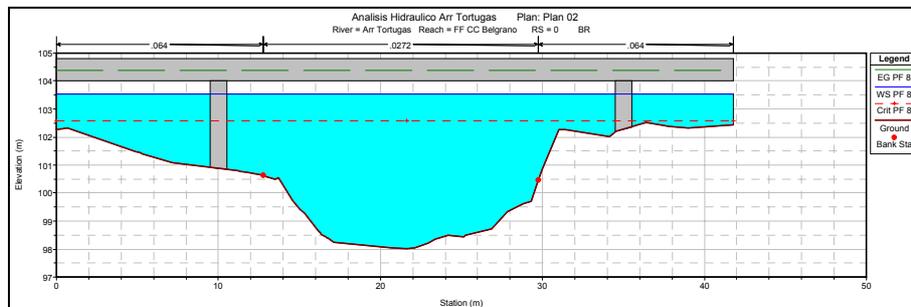
**Figura 40.-** Arroyo Cuña Muerta. Distribución de Velocidades, Sección Puente L = 25 m para Q [TR = 100 años]. Cota NAM = 202.58



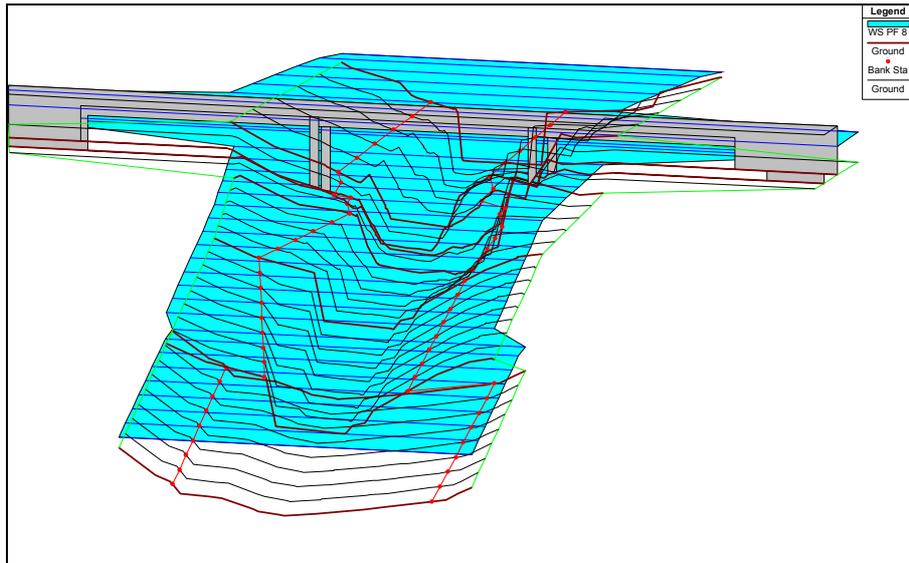
**Figura 41.-** Arroyo Cuña Muerta. Erosiones Locales: por contracción:  $h_{sc} = 0.13$  m; en estribos:  $h_s = 2.27$  m (margen izquierda). Si se desplaza el puente 1.50 m sobre margen derecha de la posición indicada, las erosiones en estribos se reducen a 1.80 m aprox.



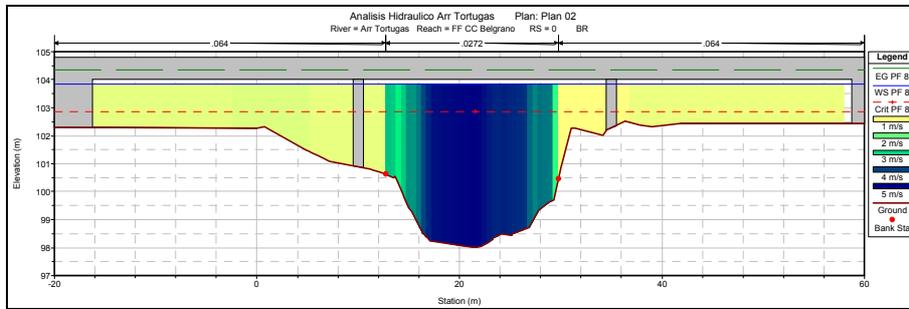
**Figura 42.-** Arroyo Tortugas. Perfil Hidráulico para Q [TR = 100 años]. Condición actual



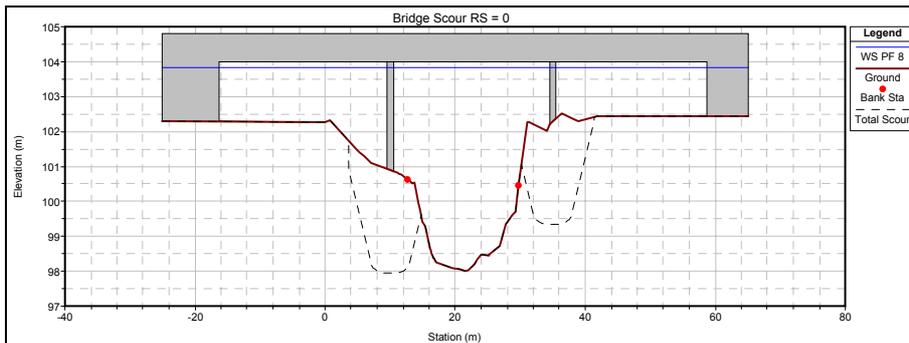
**Figura 43.-** Arroyo Tortugas. Sección Puentes L = 75 m (25x3) para Q [TR = 100 años]. Cota NAM = 103.53. Cond. Actual



**Figura 44.-** Arroyo Tortugas. Vista 3D (hacia aguas abajo) Mancha Inundacion Puente L = 75 m para Q [TR = 100 años]. Cota NAM = 103.53



**Figura 45.-** Arroyo Tortugas. Distribución de Velocidades, Sección Puente L = 75 m para Q [TR = 100 años]. Cota NAM = 103.53



**Figura 46.-** Arroyo Tortugas. Erosiones Locales: en pilas:  $h_s = 2.95$  m; en estribos:  $h_s = 0.5$  m (ambas margenes).

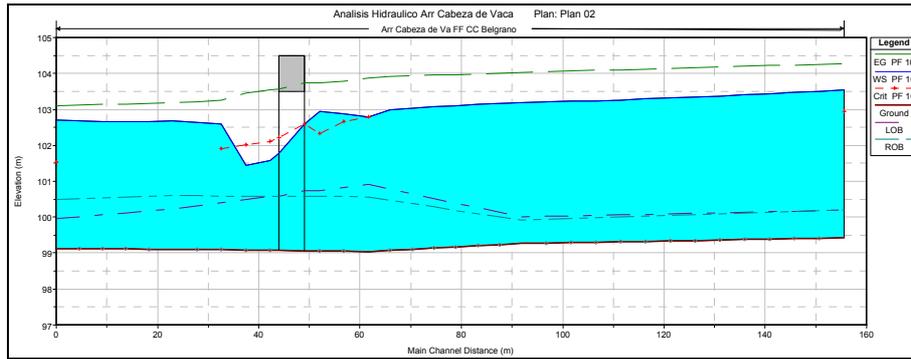


Figura 47.- Arroyo Cabeza de Vaca. Perfil Hidráulico para Q [TR = 100 años]

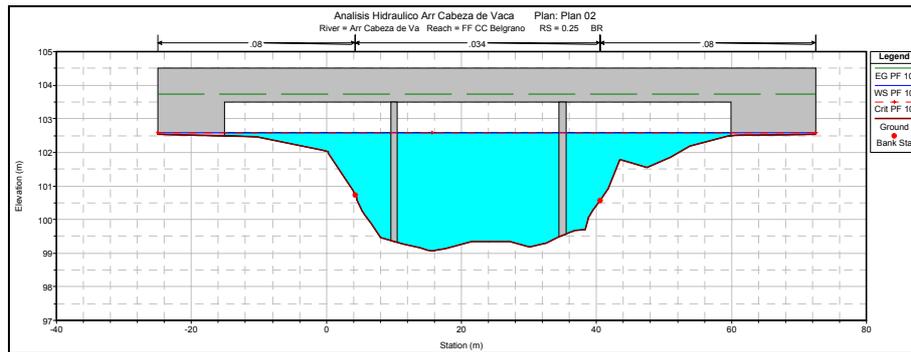


Figura 48.- Arroyo Cabeza de Vaca. Sección Puente L = 75 m (25x3) para Q [TR = 100 años]. Cota NAM = 102.59

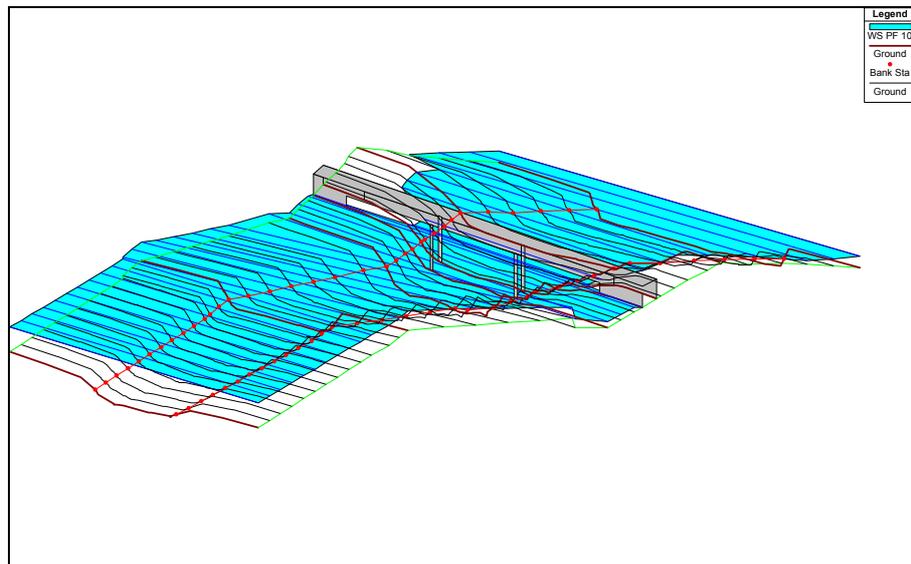
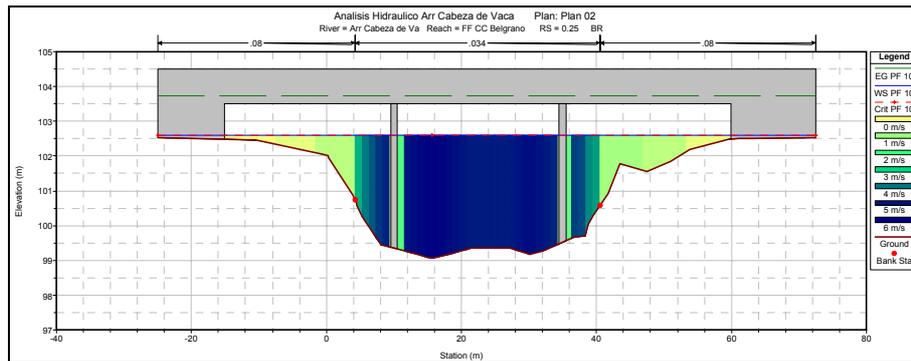
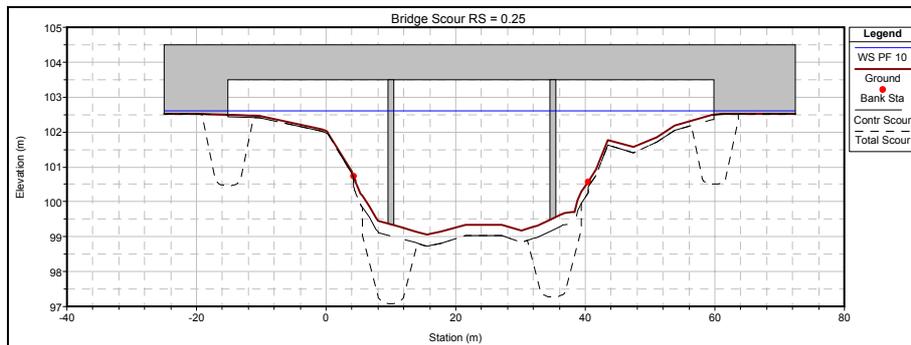


Figura 49.- Arroyo Cabeza de Vaca. Vista 3D (hacia aguas abajo) Mancha Inundacion Puente L = 75 m para Q [TR = 100 años]. Cota NAM = 102.59



**Figura 50.-** Arroyo Cabeza de Vaca. Distribución de Velocidades, Sección Puente L = 75 m para Q [TR = 100 años]. Cota NAM = 102.59



**Figura 51.-** Arroyo Cabeza de Vaca. Erosiones Locales: por contracción: hsc= 0.32 m; en pilas: hs = 1.94 m; en estribos: hs = 1.98 m (ambas margenes).

## CONCLUSIONES

A continuación se presentan las conclusiones y recomendaciones para cada uno de los arroyos analizados en correspondencia con los cruces de la traza del FF CC G.B., indicándose la ubicación de cada sección en el sistema de referencia kilométrica del FF CC.

Km 1407,770. S/D (Arroyo NN ). En este caso se trata de un arroyo que ha experimentado un marcado proceso de incisión y agrandamiento de la sección transversal. La antigua alcantarilla existente en el cruce ha sido colapsada completamente y sólo se encontraron en el sector vestigios consistentes en bloques aislados de mampostería de la misma. Teniendo en cuenta las características del cauce actual y lo que se observa del mismo en el cruce de la Ruta Nacional N° 34, sumados a los aspectos simulados en la modelación hidráulica de este curso, se recomienda la construcción de un nuevo puente.

Km 1405,259. Arroyo Zanja Honda. Este cauce no escapa a la problemática regional descripta. Se ha producido un descenso del lecho del orden de 2 a 3 metros respecto de la situación en que se encontraba el arroyo cuando se construyó el puente actual de 10 m de luz neta. Sin embargo, los rasgos morfológicos que exhibe el arroyo tanto en la sección de cruce como inmediatamente aguas abajo (en el cruce con la R.N. 34), más los resultados de los estudios hidrológicos e hidráulicos, inducen a afirmar que el cauce evolucionará hacia una condición de cuasi-equilibrio compatible con una sección más ancha que la actual. Por lo

tanto, se recomienda fuertemente evaluar la alternativa de un nuevo puente de mayor luz (del orden de los 25 metros). En caso de preservar el puente actual, se deberán disponer de obras de protección muy costosas: en primera instancia una adecuación hidráulica del segmento de aproximación del cauce, con márgenes protegidas con muros de gaviones, muros de ala largos (de gaviones o de hormigón) en las secciones de ingreso y egreso del puente actual y umbrales de fondo escalonados con disipadores y muros laterales inmediatamente aguas abajo de la sección de salida del puente.

Km 1402,108. Arroyo Cuña Muerta. La problemática de este arroyo es idéntica a la del Zanja Honda. Se recomiendan las mismas actuaciones que en el caso anterior.

Km 1184,873. Arroyo Las Tortugas. Este arroyo está experimentando un importante proceso de erosión retrógrada. Durante las inspecciones de campaña se detectó la cabecera de una cárcava en plena actividad, la cual evoluciona hacia aguas arriba produciendo un descenso de la cota del lecho del orden de los 2,0 metros y ya atravesó la sección de cruce con el FF CC GB, con el consiguiente colapso del puente existente. Teniendo en cuenta la tendencia de evolución futura de este curso, se recomienda proyectar un nuevo puente.

Km 1173,034. Arroyo Cabeza de Vaca. Este arroyo también ha experimentado un importante proceso de metamorfosis fluvial. Como el puente existente tenía una capacidad hidráulica insuficiente, durante las últimas crecidas se produjo un sobrepaso por rebosamiento del flujo que generó la rotura de ambos terraplenes de aproximación quedando la estructura del puente en la región central del cauce. Se recomienda el diseño de un nuevo puente con las características adecuadas, de modo tal de albergar el cauce de crecidas ordinarias (de uno o dos años de recurrencia) en el vano central y reservar los dos vanos laterales para conducir los caudales asociados a recurrencias mayores.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

**Dyhouse, G., J. Hatchett & J.** (2003) *Floodplain modeling using HEC-RAS*. Haestad Press, Waterbury, CT, USA. 696 p.+ 1 CD-ROM.

**Farias, H.D.** (2007). “Estudios Hidrológicos y Fluvio-Morfológicos de Ríos y Arroyos que atraviesan la traza del Ferrocarril Belgrano Cargas. Ramales J.V. Gonzalez-Pichanal-Yacuiba”. *Informe presentado a INDIGO S.A. para el Comitente SOE Belgrano Cargas*, Buenos Aires, Argentina.

**Julien, P. Y.** (2002). *River Mechanics*. Cambridge University Press, United Kingdom.

**Knighton, D.** (1984). *Fluvial Forms and Processes*. Arnold Publ. & J. Wiley and Sons, London, UK.

**Leopold, L. B. , Wolman, M. G. & Miller, J. P.** (1964). *Fluvial Processes in Geomorphology*. Dover Publications, Inc. New York, USA.

**Simon, A.** (1989). “A model of channel response in disturbed alluvial channels”. *Earth Surface Processes and Landforms*. 14(1): pp. 11-26.