

PROPUESTA METODOLÓGICA PARA LA EVALUACIÓN DEL RIESGO ALUVIONAL EN CURSOS EFÍMEROS ATRAVESADOS POR CONDUCTOS SUBTERRÁNEOS. ESTUDIOS DE CASOS EN MENDOZA, 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/>

RESUMEN

En este trabajo se presentan los estudios de riesgo aluvional que se aplicaron a una serie de cañadones que atraviesan la traza de un oleoducto y que pueden llegar a afectar la integridad estructural del mismo a través de eventuales procesos de erosión generalizada del lecho durante eventos hidrológicos severos. En el mismo se presenta una metodología para la valoración de los riesgos a que se ve expuesto el conducto por procesos erosivos en cada cruce con un cauce. En base a los valores obtenidos para los indicadores de riesgo, se recomienda la implementación de esquemas ingenieriles para el control de los procesos erosivos en los cruces con riesgo considerados altos, consistentes en medidas de protección contra los procesos de erosión general.

ABSTRACT

This paper summarizes a series of studies carried out to evaluate alluvial erosion risk along a pipeline with several crossings with ephemeral streams. The general erosion processes that occur flash floods can affect the structural integrity of the pipeline systems. A methodology is introduced to account for a set of indexes to evaluate the erosion risk. The application of the methodology is illustrated by several examples. Taking into account the value of risk index, a set of channel training works is proposed to control potential erosion processes in that crossings with high risk.

INTRODUCCIÓN

El tendido de conductos para el transporte de gas, petróleo y otros fluidos exige muchas veces un trazado que debe atravesar regiones con comportamiento hidrológico bien diferenciado. En regiones áridas y semi-áridas se presentan posibilidades ocurrencia del fenómeno que se denomina “riesgo aluvional”, caracterizado por procesos erosivos severos, con gran movilización de materiales sedimentarios, durante la ocurrencia de crecidas “explosivas” (empuntandas) en cursos efímeros. Estos procesos pueden llegar a afectar la integridad estructural de la conducción.

El área de estudio comprende una serie de “cañadones”, que son unos cauces de régimen hidrológico efímero, se ubican como tributarios inmediatos sobre el flanco Norte (margen izquierda) del Río Colorado, en proximidades del ápice que configura el extremo Sud del territorio de la provincia de Mendoza, más precisamente sobre el cuadrante N-W del punto que define el límite entre las provincias de Mendoza, La Pampa, Río Negro y Neuquén (en sentido horario). El área se indica en la Figura 1.

En la región el clima es árido y semiárido y las precipitaciones generalmente no alcanzan a superar los 250 mm/año. Sin embargo, los cauces que atraviesan la traza del oleoducto poseen cuencas con rasgos geomorfológicos e hidrográficos tales que los eventos contados de

precipitaciones convectivas que se producen por año suelen generar procesos erosivos significativos.



Figura 1.- Área de Estudio. Croquis de Ubicación

En la Figura 2 se indica con un mayor nivel de precisión el área de ubicación de esta serie de cañones. La mayoría de los mismos exhibe cuencas elongadas con una dirección predominante del flujo en el sentido N-S.

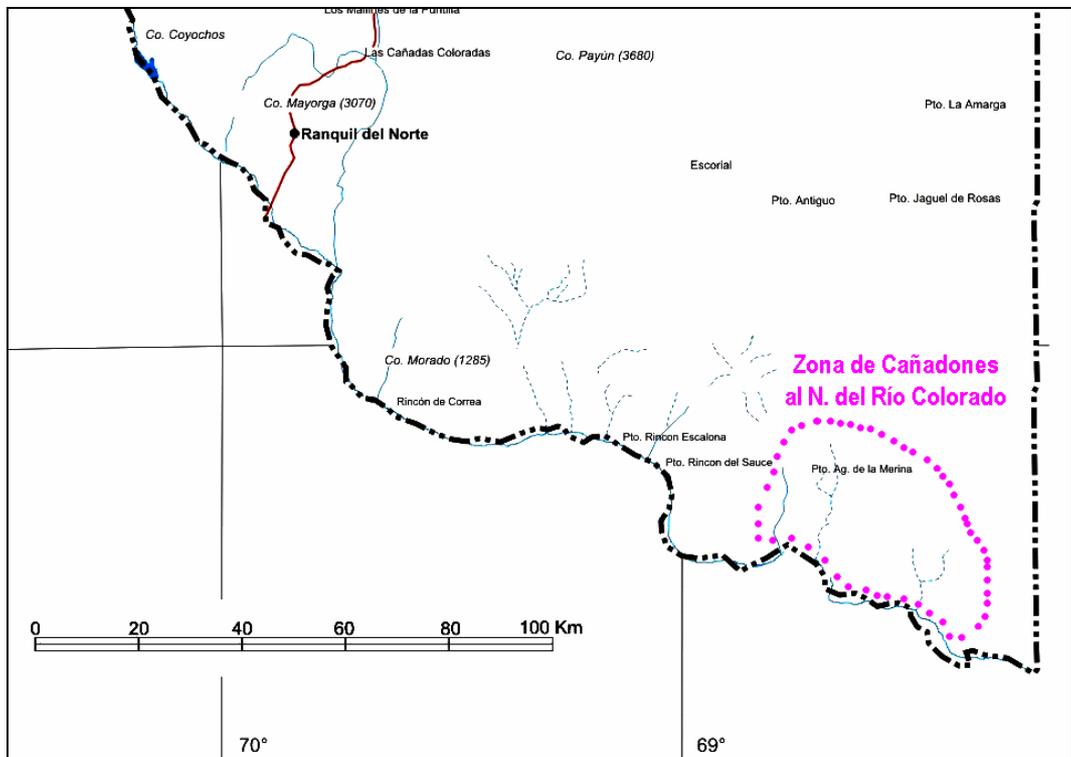


Figura 2.- Localización específica del área donde se ubican los cañones tributarios sobre la margen izquierda del Río Colorado

OBJETIVOS

El objetivo de la investigación es el de desarrollar un criterio metodológico para la evaluación del riesgo aluvional al que puede estar sometido un conducto subterráneo que atraviesa un curso efímero. La valoración del riesgo ayuda a decidir la aplicación de medidas estructurales para mejorar los estándares de integridad estructural del ducto en la zona de cruces.

DESCRIPCIÓN DE LA PROBLEMÁTICA

Los conductos de transporte de fluido se disponen enterrados a lo largo de una franja de terreno o “pista” (servidumbre de paso). Habitualmente, como la profundidad de colocación de la tubería (tapada) es aproximadamente constante, el trazado altimétrico de la misma tiende a seguir la topografía del terreno natural.

En esta situación, las líneas de tuberías se encuentran expuestas a los procesos de erosión, tanto longitudinal o transversal en relación a la pista (es decir, a su propio alineamiento).

En la Figura 3 se esquematiza el proceso de potenciales erosiones longitudinales que se pueden presentar, mientras que en la Figura 4 se ilustran las erosiones transversales.

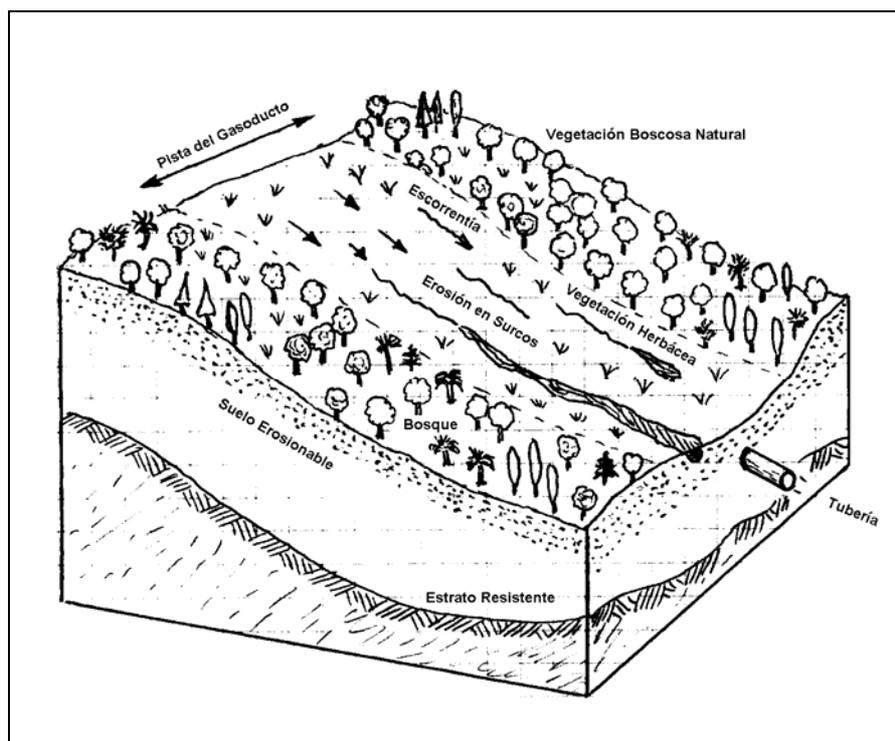


Figura 3.- Esquema pictórico del proceso de erosión longitudinal en la pista de mantenimiento de gasoducto. La erosión en forma de surcos de dimensiones longitudinalmente crecientes se genera como consecuencia de la aceleración del flujo de escorrentía superficial sobre la pista. En los tramos de pendientes significativas y de desarrollo lineal importante, el flujo vá incrementando su tirante y velocidad, lo que aumenta la capacidad erosiva del mismo y se comienzan a desarrollar surcos que se van progresivamente profundizando y ensanchando, hasta adquirir dimensiones del orden de la tapada local de la conducción, poniendo en riesgo su estabilidad.

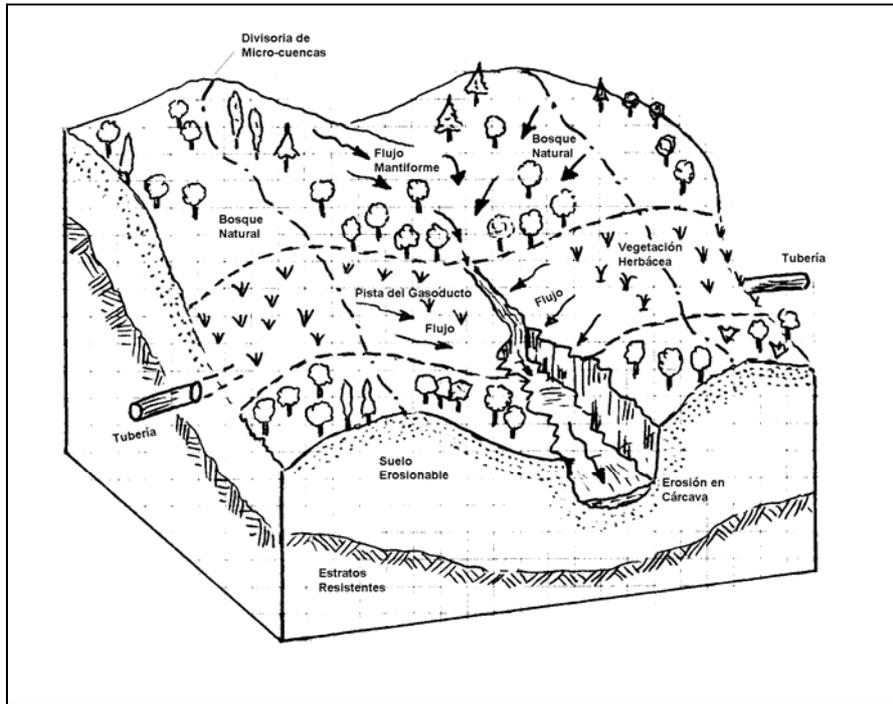


Figura 4.- Esquema pictórico del proceso de erosión transversal en la pista de mantenimiento de gasoducto. El agua precipitada en la micro-cuenca superficial en la que se encuentra localizado el segmento de pista afectado, se concentra como consecuencia del micro-relieve local. La escorrentía superficial atraviesa la traza de la pista por las vaguadas topográficas, y como consecuencia de la velocidad y la tensión de cizallamiento del flujo se forman surcos y cárcavas de importantes dimensiones que llegan a afectar la estabilidad de la tubería. El proceso de erosión en cárcava es muy complejo y en la formación y evolución de tales formas de erosión intervienen factores hidrológicos, hidráulicos, geotécnicos, fitológicos, hidrogeológicos, etc.

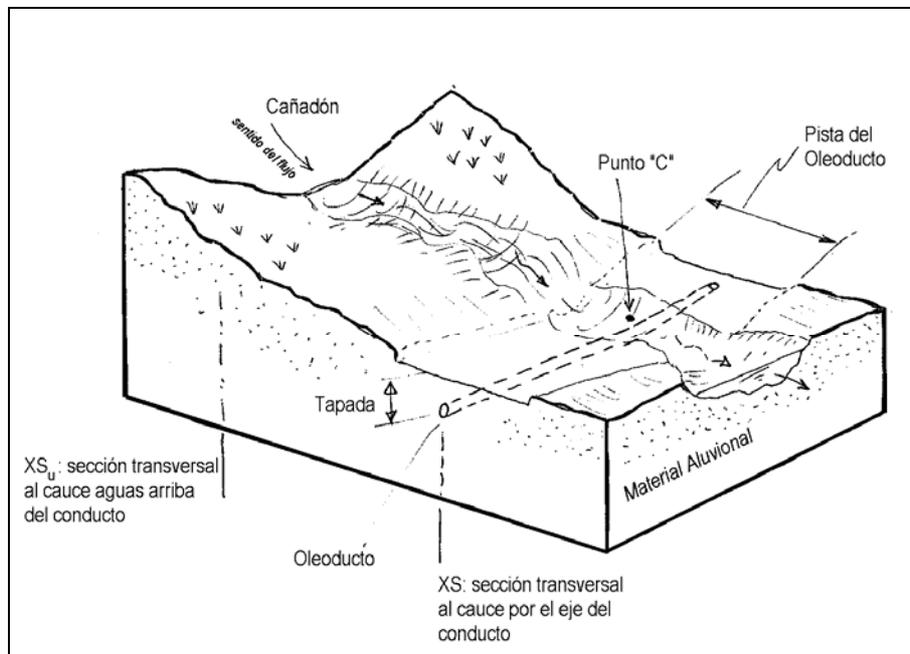


Figura 5.- Esquema de las erosiones transversales en zonas áridas y semi-áridas

Si bien las figuras 3 y 4 ilustran detalladamente estos procesos, en las denominadas zonas áridas y semi-áridas generalmente hay una carencia generalizada de vegetación (sólo

matorrales bajos en algunos casos y vegetación herbácea en la mayoría) (Figura 5). En virtud de ello, la exposición del material aluvional a los posibles procesos erosivos es mucho mayor. Asimismo, la ocurrencia de las crecidas en estos cursos de régimen hidrológico efímero se da generalmente en forma de hidrogramas empuntados.

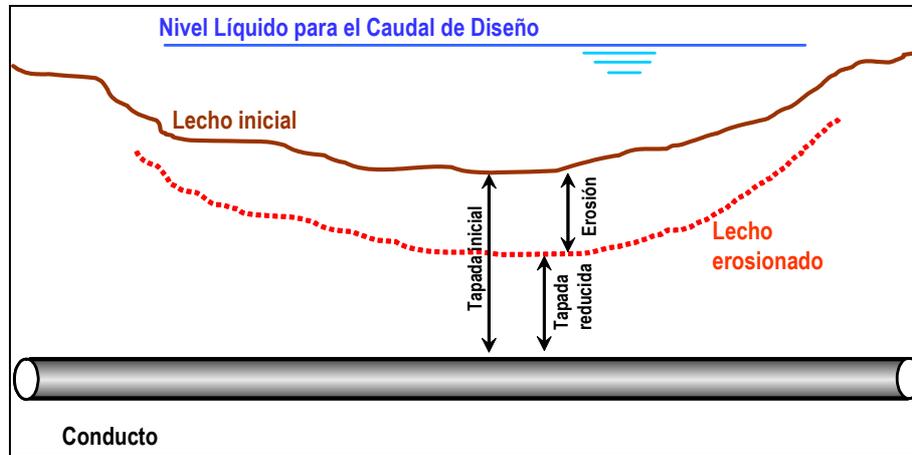


Figura 6.- Esquema detallado del proceso de erosión general que afecta la tubería

En esta situación, los procesos erosivos que prevalecen (por su magnitud frente a los otros componentes de la erosión) son los asociados a la erosión general (Figura 6). En los casos en que la magnitud de la erosión alcance un orden comparable con la tapada, las probabilidades de destape de la tubería son muy elevadas y en esa situación cobra importancia el análisis del “riesgo aluvional”.

CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA Y ESTUDIOS BÁSICOS

Los cruces a estudiar se presentan en la tabla siguiente, en la cual se codifica cada uno de ellos y se indica la progresiva de ubicación de los puntos de cruce de la traza del oleoducto en relación a los cursos que la atraviesan:

Tabla 1.- Cruces a estudiar

Punto	Progresiva
P78	55977
P75	54352
P73	47673
P70	45674
P46	21700
P43	21456
P17	18624
P4	6515

Por simplicidad de notación, en lo sucesivo se designarán tanto a los cauces fluviales de los cañadones como a sus cuencas de aporte con la misma nomenclatura que el punto de cruce propiamente dicho.

En una primera instancia se analizaron los antecedentes disponibles clasificados de acuerdo a las temáticas específicas que se consideran de interés en relación a los objetivos del estudio. Los mismos se presentan a continuación.

Para la confección de la cartografía se consideraron las cartas del Instituto Geográfico Militar (IGM) de la zona (ver croquis de ubicación del área de estudio), así como también otras fuentes de cartografía digital. Entre ellas pueden citarse varias secuencias de Imágenes Landsat TM (años 1990, 2000 y 2008) que permiten visualizar la fisiografía general del área de estudio y las características más significativas de las cuencas hidrográficas de los cañadones considerados.



Figura 7.- Zona de Cañadones del sector Oeste (W)

A modo de ejemplo de este recurso gráfico, en la Figura 7 se presenta una escena de la sub-zona correspondiente al grupo de cañadones del sector Oeste (W). En la misma pueden visualizarse a grandes rasgos las cuencas hidrográficas con sus redes de drenaje y las trazas de los caminos y pista del oleoducto.

También puede apreciarse la fisiografía general de la zona, diferenciándose las cabeceras de las cuencas de los sectores, en donde se evidencia la presencia de áreas de deposición de materiales y conos de deyección. En la parte inferior se aprecia un segmento del curso del Río Colorado.



Figura 8.- Zona de Cañadones del Sector Este (E)

En la Figura 8 se indica la zona de cañadones del sector Este (E). En la parte inferior de la escena aparece el curso del Río Colorado. Se observa claramente que en este caso son cuencas más pequeñas que las del sector Oeste, y también puede apreciarse que en su mayoría

no llegan a descargar en forma franca sobre la margen izquierda del Río Colorado, sino que forman zonas de derrames más al norte.

En la parte superior de las cuencas se observan los campos petrolíferos, los pozos y la red de caminos de operación en ese sector.

Estas imágenes fueron procesadas digitalmente, en conjunción con otras fuentes de cartografía digital para producir los mapas de cuencas que se presentan más adelante en el presente trabajo.

Para el análisis de la información topográfica se compilaron las cartas topográficas correspondientes al sector, editadas por el Instituto Geográfico Militar (IGM), algunas de ellas en escala 1:250.000 y otras en escala 1:50.000. Estas cartas constituyeron el material de base para identificar algunos rasgos fisiográficos a escala regional; por ejemplo, pendientes regionales características, cordones montañosos, grandes divisorias de aguas, etc. Sin embargo, dado que los cañadones poseen cuencas relativamente pequeñas, estas escalas resultaron inadecuadas para poder delinear las cuencas correspondientes a cada uno ellos.

En virtud de lo mencionado previamente, para poder delimitar las cuencas de drenaje que aportan escorrentía a la traza se confeccionó un modelo digital del terreno (DTM) a partir del procesamiento digital de imágenes de radar SRTM (Shuttle Radar Topographic Mission) usando celdas 90 m x 90 m. Usando técnicas GIS se pudo confeccionar el mapa de cuencas usado en los estudios hidrológicos.

Con respecto a la geomorfología, considerando los grandes dominios morfo-climáticos y biogeográficos de la región del sur mendocino, se puede articular el territorio en tres unidades bien diferenciadas, cada una de ellas dividida en sub-unidades de menor jerarquía, determinadas estas últimas fundamentalmente por las variaciones del relieve. El área de estudio se ubica claramente en la sub-zona denominada "Payunia o Patagonia Mendocina", que abarca el oeste y el sur, y bajo la acción del anticiclón del Pacífico, coincide con las Provincias Fitogeográficas Andina y Patagónica.

Un aspecto interesante para destacar es el conjunto de procesos morfodinámicos y morfogenéticos que están modelando estas estructuras: por una parte los que están más influenciados por factores exógenos (climáticos): erosión hídrica, eólica, escurrimiento, geocriogénesis (acción del hielo) y los que están determinados por factores endógenos (tectónica, vulcanismo). Estos últimos determinan riesgos naturales tan importantes como el riesgo sísmico y volcánico, mientras que los primeros son relevantes en los riesgos de degradación de suelos y desertificación.

La región está caracterizada geológicamente por la presencia casi exclusiva de rocas en su mayor parte de composición basáltica, que imprime a la zona un paisaje mesetiforme con superposición de construcciones volcánicas típicas.

Esta unidad no es considerada como una provincia geológica o geomorfológica independiente, sino que se le asigna la categoría de Nivel Morfoestructural primario, debido a sus grandes dimensiones areales. Algunos autores incluyen a esta unidad dentro de las zonas deprimidas del sur mendocino, por su condición de planicie más o menos uniforme con

 MACIZOS VOLCANICOS DE LA PAYUNIA	PROCESOS DOMINANTES
CENTROS VOLCANICOS POLIGENICOS (ESTRATO - VOLCANES PLIOCENO - CUATERNARIOS) 1. Macizo volcánico del Payún  Antigo núcleo Paleopleistoceno andesítico-trauítico	
 Caldera Neopleistocena-holocena	
 Cráter	  
 Coladas trauíticas de la explanada del Payún Matru (escoriales, brechas y lavas pumíceas eoholocenas)	
2. Macizos volcánicos desmantelados del Terciario superior  Sierra de El Nevado (andesitas miopliocénicas)  Sierras de Chachahuen y del Cerro "El Zaino" (andesitas pliocenas)	  
PLANICIES ESTRUCTURALES LAVICAS 1. Planicies basálticas 1.1. Mesetas pliocenas muy modificadas por erosión fluvial y remoción en masa  Altiplanicie del Payún Mesetas residuales  a) basaltos terciarios (efusivas básicas)  b) andesitas terciarias (efusivas mesosilíceas)	    
 1.2. Mesetas Neopleistocenas y conos piroclásticos (con escoriales, cob. de aluvio, arena y cuencas de deflación)	 
1.3. Mesetas holocenas y conos piroclásticos adventicios a) Planicie de "coladas apiladas" con sucesión de elev. y depr. con alta cob. de arena y cuencas de deflación b) Coladas de corto recorrido, escoriales. Segundo basalto posglacial c) Coladas de lava tipo aa. Relieve irregular, intransitable. Último basalto posglacial	 
2. Planicie ignimbrítico-tobácea eoholocena a) Con cobertura de aluvio y arena	  
RELIEVE PREBASALTICO  Sierra de Cara Cura y Reyes. Ambiente de Cordillera Principal en Payunia Predominio de relieve kárstico en areniscas continentales calizas y yeso cretácico-jurásico	 
 Huayquerías (bad-lands) del Río Colorado, en sedimentitas cretácicas	

Figura 9b.- Referencias del Mapa geomorfológico del Area de Estudio

Bajo la denominación de planicies estructurales lávicas se engloba una amplia gama de mesetas o "bardas", y sus correspondientes volcanes adventicios, marginadas por fenómenos de remoción en masa y deslizamientos rotacionales.

Los suelos son en general arenosos, muy permeables, o de rocas efusivas, de alta porosidad. Sólo los suelos arenosos permiten el crecimiento de arbustos y pastos como Sporobolus, Stipa, Poa, Neosparton (solupe). Estas comunidades están adaptadas a una extrema aridez.

Finalmente, en el mapa se destaca el relieve prebasáltico, remanente en las Sierras de Cara Cura y Reyes, en el extremo sur. Formadas por areniscas continentales, calizas y yeso cretácico-jurásico, representan al ambiente de Cordillera Principal en la Payunia, predominando las formas y procesos del relieve kárstico. La margen izquierda del valle del río Colorado aparece totalmente disectada por un sistema de huayquerías (bad-lands) elaboradas en las sedimentitas cretácicas.

El clima del área de la Payunia es frío y árido. La zona recibe la influencia de los vientos del Océano Pacífico sur, que provoca precipitaciones fundamentalmente invernales que rondan los 250 milímetros anuales, aunque también en verano llegan los vientos del Océano Atlántico que provocan algunas lluvias.

La zona se caracteriza por fuertes vientos, especialmente en primavera, del sector Oeste - Sur Oeste. El desarrollo de la vegetación es xerófila, característica de la Región fitogeográfica de monte.

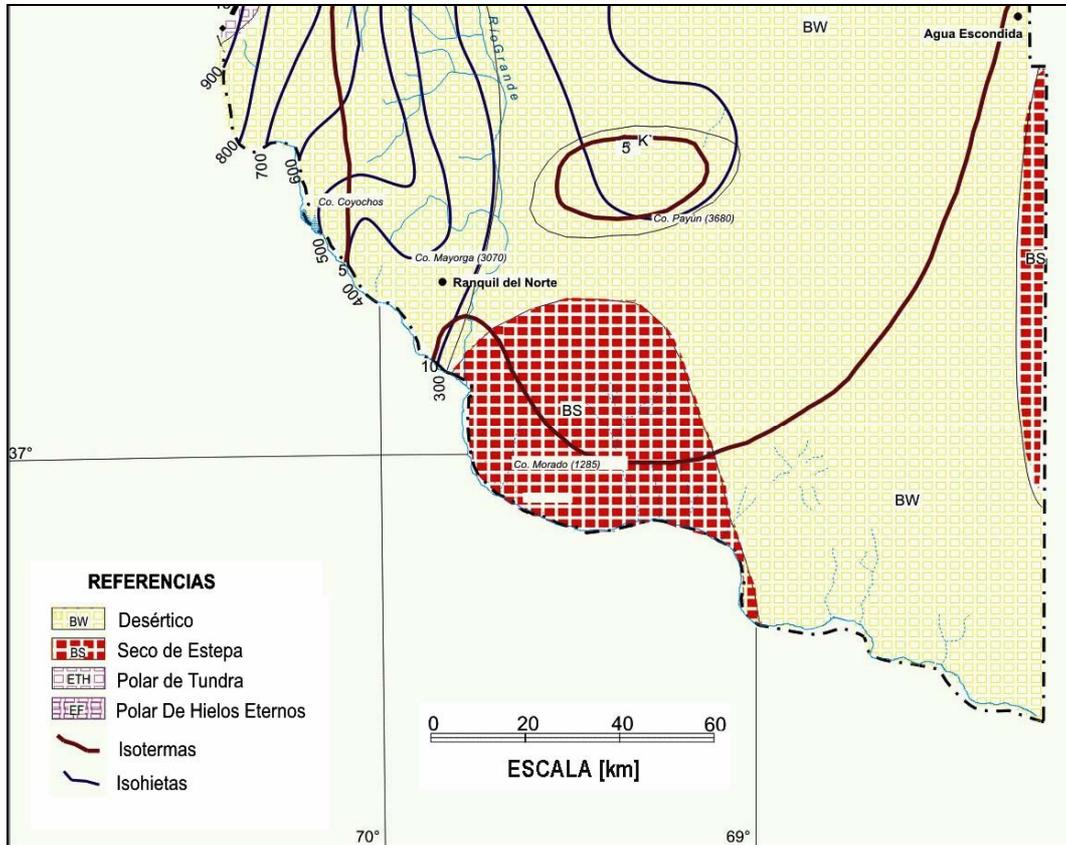


Figura 10.- Mapa climático del Área de Estudio

La aridez del clima y los suelos pobres debido especialmente a la actividad volcánica, cubiertos por arenas, influyen en el desarrollo de la vegetación siendo baja y de escasa cobertura media. En general dominan los pastizales en suelos arenosos, y los matorrales en las escorias cubiertas por arenas y en las laderas de volcanes y cerros.

En la zona de estudio predominan fenómenos de tipo "aluvional" en cauces secos que esporádicamente transportan agua y gran cantidad de sedimentos.

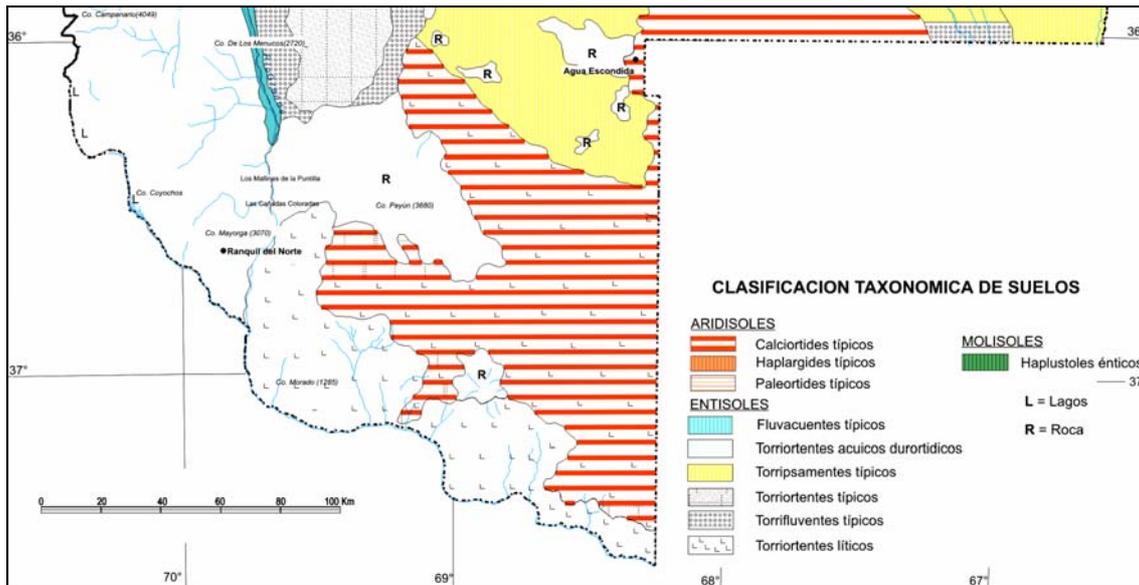


Figura 11.- Mapa de suelos del Área de Estudio

Como puede observarse, los suelos predominantes en la zona de estudio son principalmente los "torriortentes líticos", que en superficie presentan una estructura esquelética y a los efectos de los estudios de procesos erosivos, se trata de materiales granulares altamente erosionables por corrientes de agua de tipo fluvial.

En los valles predominan Entisoles de distintas texturas que podrían llegar a ser aptos para la realización de la actividad agrícola con suministro de riego. En la meseta se encuentran Aridisoles con suelos de poco espesor, arenoso-pedregosos y alto porcentaje de calcáreo y yeso; tienen alta permeabilidad en algunos sectores y en otros disminuye por presencia de horizontes endurecidos (petrocálcico).

A partir del análisis de la cartografía digital (usando técnicas GIS) se procedió a la delimitación de las cuencas de aporte de cada uno de los cañadones, teniendo en cuenta la divisoria topográfica de las mismas y delineando las redes de drenaje de cada una de ellas.

En la Figura 8 se presenta el resultado del análisis conducente a la delimitación de cuencas hidrográficas de cada uno de los cañadones.

A partir del mapa general de cuencas, a través de un procesamiento sencillo con herramientas GIS, se puede extraer información morfométrica en forma cuantitativa, lo cual permite evaluar los principales parámetros que pueden mostrar ciertas tendencias que permitan inferir a priori las funciones de respuesta hidrológica de la cuenca.

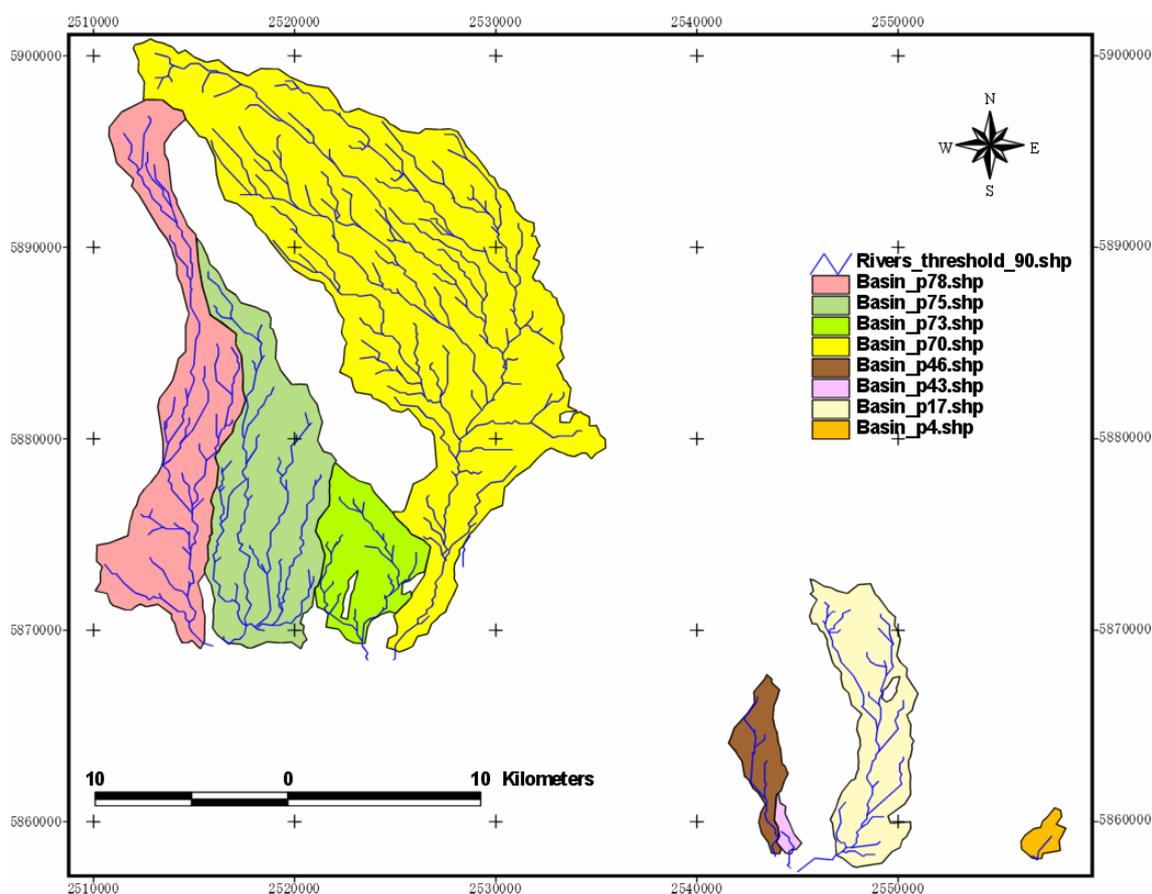


Figura 12.- Mapa de Cuencas

En la tabla siguiente se presentan los parámetros básicos de las 8 cuencas bajo análisis. Los mismos son: área de la cuenca, perímetro, longitud del curso principal, altitudes máxima y mínima y pendiente media ponderada en forma areal.

Una serie de procedimientos de cálculo adicionales permite evaluar algunos parámetros significativos de interés para el análisis de algunos aspectos hidrológicos y su relación con los procesos aluvionales.

Los mismos se calculan y comentan en las secciones que siguen.

Tabla 2.- Principales características morfométricas de las 8 cuencas estudiadas.

Cuenca	Area	Perímetro	Long. C.P.	Altitud Maxima	Altitud Mínima	Pendiente Media
	A	P	L	Z _{max}	Z _{min}	S _m
	Km ²	Km	Km	m	m	%
P4	3.37	8.329	3.206	756	700	2.356
P17	47.02	44.193	17.975	926	609	2.935
P43	2.01	7.691	3.836	675	583	2.363
P46	12.72	21.529	11.299	851	584	4.775
P70	267.11	104.61	48.488	1949	666	4.564
P73	32.31	32.212	12.543	882	683	2.625
P76	83.13	53.389	26.489	1175	646	3.591
P78	83.69	70.593	34.314	1952	662	5.442

El área de las cuencas se indica en la segunda columna de la Tabla 2. Puede apreciarse la gran variabilidad (casi dos órdenes de magnitud) en las áreas de la cuencas. En ese contexto, siguiendo los lineamientos propuestos por Ponce (1989) las cuencas P4, P43 y P46 se pueden clasificar como “pequeñas”, mientras que las restantes se tipifican como “cuencas medianas”.

Se destaca en particular la cuenca P70 por su tamaño, lo cual también puede apreciarse en el mapa general de cuencas.

Los parámetros de forma principales se calcularon a partir de las ecuaciones que se presentan en la Tabla 3, en la cual también se indica el significado de cada cantidad.

Tabla 3.- Parámetros de Forma. Definiciones

Algunos métodos para expresar la forma de la cuenca		
	método	autor
Factor de Forma (F)	$F = A/L$	Horton (1932)
Circularidad (C)	$C = A/A_c$	Miller (1953)
Elongación (E)	$E = D_c/L$	Schumm (1956)
Lemniscata (K)	$K = L/4A$	Chorley, Malm y Pogorzelski (1957)

Donde: **A**, área de la cuenca; **L**, longitud máxima de la cuenca medida desde el punto de salida al límite de la cuenca, cerca de la cabecera del cauce más largo en línea recta; **A_c**, área del círculo con igual perímetro de la cuenca; **D_c**, diámetro del círculo con área equivalente a la cuenca.

FUENTE: *Drainage basins. Form, processes and geomorphological approach*. GREGORY, K.J. and P.E. WALLING, 1973.

Tabla 4.- Parámetros de Forma calculados para las 8 cuencas

Cuenca	Factor de Forma	Circularidad	Elongación	Lemniscata
	F	C	E	K
P4	1.0512	0.6105	0.6461	0.2378
P17	2.6159	0.3025	0.4305	0.0956
P43	0.5240	0.4270	0.4170	0.4771
P46	1.1258	0.3449	0.3562	0.2221
P70	5.5088	0.3067	0.3803	0.0454
P73	2.5759	0.3913	0.5114	0.0971
P76	3.1383	0.3665	0.3884	0.0797
P78	2.4389	0.2110	0.3008	0.1025

CARACTERIZACIÓN FLUVIO-MORFOLÓGICA DE LOS CAUCES

Para caracterizar la geometría transversal de los cauces de los cañadones en las secciones de cruces se organizó y llevó a cabo una campaña de relevamientos topográficos. En los mismos se seleccionó un segmento de curso de 500 metros de longitud (300 m aguas arriba de la sección de cruce con el ducto y 200 m aguas abajo).

En cuanto a la geometría transversal, el análisis de la forma que exhiben estos perfiles permite apreciar las características de geometría hidráulica de los cauces. En general, se trata de cursos hidráulicamente “anchos”, con razones de aspecto “grandes”, es decir, relaciones ancho/profundidad mayores a 100 en todos los casos. Estas configuraciones son típicas de cauces torrenciales efímeros.

Con los mismos datos de los relevamientos topográficos, se confeccionaron los perfiles longitudinales de los cauces en el segmento de 500 metros de longitud en la vecindad inmediata de la traza.

La pendiente longitudinal local se determinó a partir de regresiones lineales sobre los puntos relevados en campaña. Un aspecto notable es la marcada uniformidad de las pendientes de los cauces en cercanías de la traza. Las pendientes longitudinales locales varían entre 1.60% y 2.0%, con excepción del cañadón P46 que tiene una pendiente del 2.72%.

Con respecto a la Forma en Planta, la morfología de los cursos fluviales efímeros es de tipo trenzado o “braided”, con valores de sinuosidad $< 1,5$ de acuerdo a la clasificación de Leopold et al. (1964), típicos de climas áridos, con descargas extremas y de rápida variación y vegetación escasa. Transportan gran cantidad de materiales como carga de fondo que junto con la falta de competencia local de la corriente - por pérdida de caudal y fluctuación de la descarga - serían los factores principales en la formación de las típicas barras de arenas o gravas (Fahnestock, 1963). Las barras caracterizadas en los cauces son de tipo longitudinal, transversal y de punta (point bar); la ausencia de barras diagonales indica que se trata de lechos inestables que se modifican en cada crecida (Smith, 1974).

En estos cauces se distinguen dos zonas bien diferenciadas unidas por una de transición: (1) Cabecera con pendiente mayor al 10%, baja relación ancho/profundidad y con tendencia erosiva. (2) Zona baja con pendiente menor al 10%, alta relación ancho/profundidad - favorecida localmente por márgenes fácilmente erosionables-, con tendencia al aluvionamiento generalizado.

La mayor parte de los cursos de agua discurren en el sentido N-S sobre terrenos conformados por suelos friables altamente erosionables. Estos cursos son en general tributarios directos del Río Colorado, aunque muchos se dispersan en conos de deyección antes de llegar en forma franca sobre la margen izquierda del río.

La totalidad de los cañadones son cauces de régimen hidrológico efímero, con cuencas en las que las precipitaciones anuales alcanzan valores de lluvia relativamente bajos, pero concentrados en un número pequeño de tormentas aisladas, lo cual genera eventos pluviosos caracterizados por lapsos de gran intensidad, con un potencial erosivo significativo aumentado por las pendientes fuertes que se registran de N a S.

Se han observado importantes trazas de procesos de erosión en algunas zonas próximas a los cruces. También en algunas zonas se observan significativos procesos de agradación, con abundante deposición de materiales aluvionales gruesos en las zonas de quiebre de pendientes desde los montes a las mesetas.

El análisis fluvio-morfológico de los cursos se llevó a cabo a partir los lineamientos de Schumm (1977), Brice (1975), Brice & Blodgett (1978), y Rosgen (1996) para la clasificación de ríos.

Se observa claramente que los tramos estudiados se encuentran emplazados en zonas de deposición de los materiales de arrastre que se movilizan cuando se activan hidráulicamente los cauces, lo que hace que los mismos tiendan a adquirir una configuración planimétrica de tipo trenzada o multi-curso (“braided”, según la denominación en inglés).

Con respecto a la clasificación morfológica de los cauces, las imágenes dan muestras evidentes que se trata de cauces trenzados, como múltiples vías de escurrimiento para la mayoría de los caudales que escurren.

En cuanto a las condiciones de estabilidad de los cañadones, el diagrama de estabilidad relativa de Schumm (1977) indica claramente que los mismos se corresponden con cauces tipo “5”, con preponderancia de carga de lecho en cuanto a la modalidad de transporte dominante y con un grado de estabilidad relativa bajo, es decir, se trata esencialmente de un tipo de cauce muy inestable, e impredecible en cuanto a las vías preferenciales de flujo de una crecida a otra.

Por su parte, si se considera el clasificador cualitativo (basado en forma en planta) de Brice (1975), los cursos bajo análisis se ubican en el rango de los cauces trenzados, con un grado tipo “3” (>65%) y con un carácter de trenzado tipo “C” (mayormente cubierto de barras e islas de forma diversa). Es decir, el cauce se clasifica como de tipo “3-C” según este sistema, con un elevado grado de inestabilidad y una morfología de trenzada en la cual no se puede identificar el thalweg, es decir, una región del cauce en la que se concentren los mayores caudales unitarios. Por lo tanto, tampoco se tiene indicios del ancho estable de los cauces para los caudales morfológicamente dominantes.

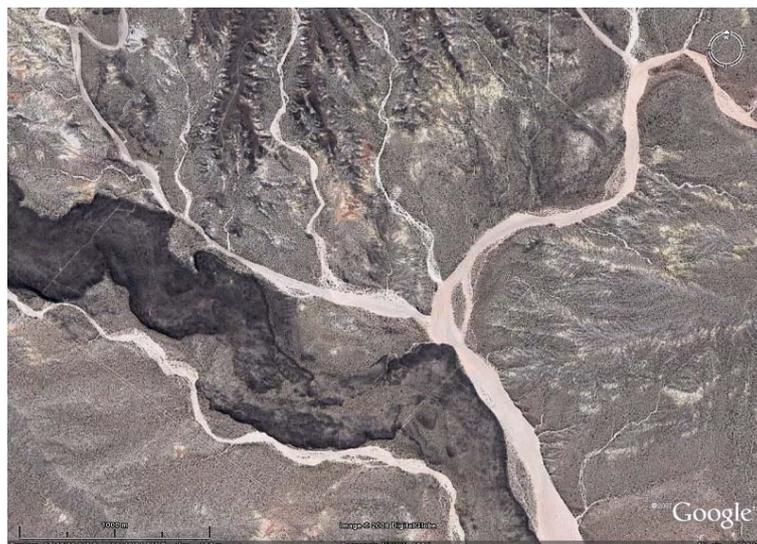


Fig. 13.- Zona de los cañadones P75-P78.

Considerando el clasificador extendido de Brice & Blodgett (1978), en el que también se pueden obtener elementos adicionales para caracterizar el comportamiento de los cauces, en

este caso, se trata de cauces aluvionales, cuasi-rectilíneos, anchos, generalmente trezados (> 35%), sin barrancas laterales claramente marcadas, es decir, los cauces están contenidos en sus respectivos abanicos aluviales.

Los materiales sedimentarios dominantes están constituidos por una diversidad de tamaños, desde limos y arenas, hasta cantos dispersos, pasando por todo el espectro de gravas.

El modo dominante de transporte es de carga de fondo, con procesos de acorazamiento para caudales bajos a moderados, pero con tasas de transporte muy altas una vez que se superan las tensiones críticas de arrastre durante las crecidas importantes.

Con estas características, puede afirmarse que los cursos se comportan de manera inestable, aunque conservando globalmente el ancho del cauce trezado (del orden de 300 m a 500 m en la mayoría de los casos).

En términos del comportamiento hidrodinámico, dependiendo de la forma en que se combinen las barras elongadas, se pueden generar marcadas concentraciones de las líneas de corriente en determinados sectores durante las crecidas, lo que potencia los procesos de erosión general en esas vías preferenciales..

COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO DE LOS CAUCES

A partir de los estudios hidrológicos se estimaron los caudales de diseño adoptados, que son los que se indican a continuación (Tabla 5).

Tabla 5.- Caudales de Diseño adoptados para las 8 cuencas en estudio.

Cuenca	Denominación	Caudal de Diseño
		Q
		m ³ /s
1	P4	4.00
2	P17	30.00
3	P43	4.00
4	P46	15.00
5	P70	150.00
6	P73	25.00
7	P75	50.00
8	P78	65.00

La modelación del funcionamiento hidráulico de los cañadones se llevó a cabo con HEC-RAS, a partir de lo cual se estimó el perfil hidráulico del tramo, la función de descarga en la sección del ducto y distribución lateral de velocidades. A partir de esta última, se calcula la máxima erosión general probable para el caudal de diseño (recurrencia de 50 años). La erosión general se calculó a través de la aplicación de la relación genérica siguiente:

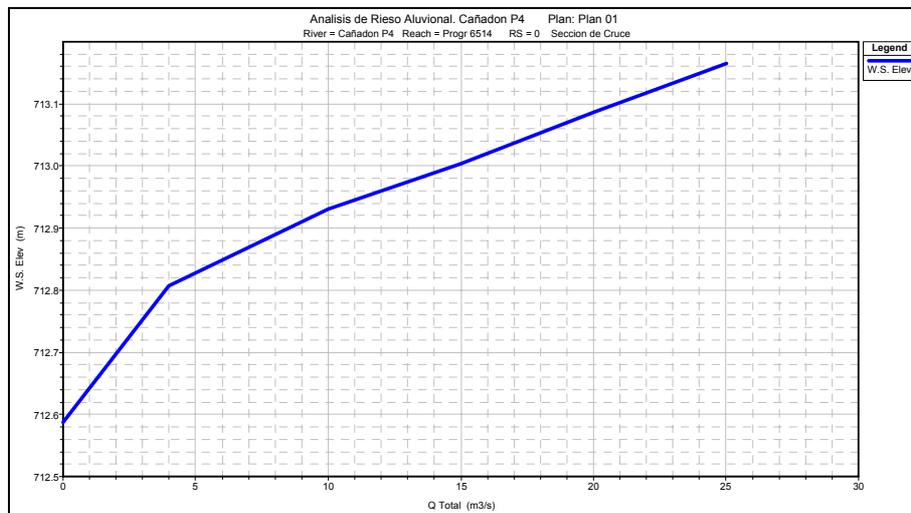
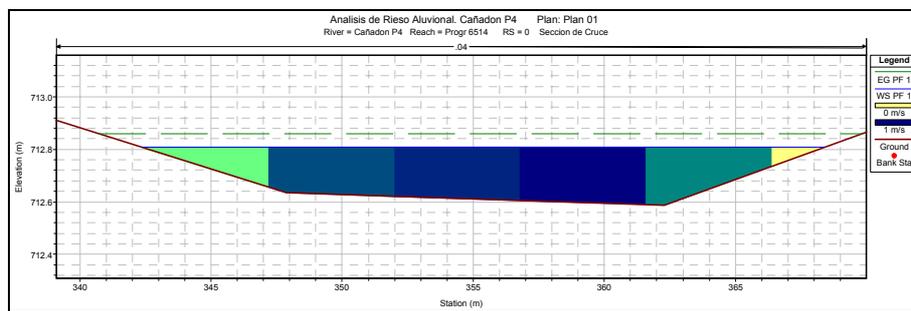
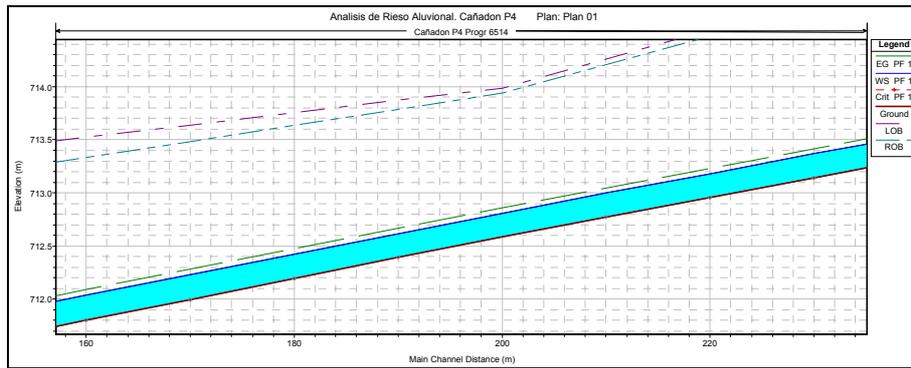
$$h_s = c_0 q^{c_1} / d^{c_2}$$

donde h_s es la profundidad media en una franja vertical del cauce, q es el caudal por unidad de ancho en esa franja y d es el tamaño mediano de las partículas de sedimento del lecho en la sección. Las constantes c_0 , c_1 y c_2 adquieren diferentes valores según sea el método considerado. Por ejemplo, la ecuación de Lischtvan & Lebediev (muy usada en Latinoamérica) para el rango de las arenas (y usando unidades SI) las constantes resultan 0.333, 0.710 y 0.199, respectivamente. Teniendo en cuenta el material arenoso grueso presente en todos los lechos de los cañadones, se adoptó como tamaño característico del mismo $d = d_{84} = 2.0$ mm para todos los cauces.

A continuación se presentan los resultados para cada uno de los cauces, en forma gráfica y tabular. Para cada cauce se presenta:

- Gráfico del perfil hidráulico en el tramo de 500 metros simulado para el caudal de diseño
- Sección transversal con la indicación del nivel hidráulico máximo y la distribución lateral de velocidades
- Representación gráfica de la función de descarga (curva $h-Q$) en la sección de cruce con el ducto
- Tabla con el cálculo de la profundidad de erosión general, distribuida lateralmente para toda la sección
- Gráfico de la sección transversal antes y después de sufrir la erosión general, con la indicación de la máxima profundidad de erosión y la cota mínima alcanzada por el lecho.

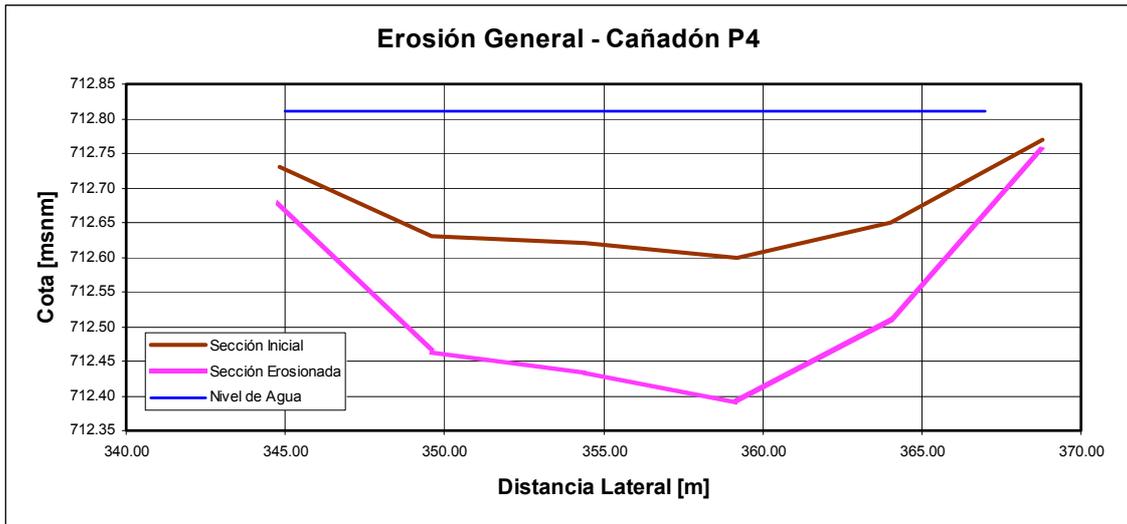
Cañadón Cruce P4



Cálculo de la Erosión General. Método LLT

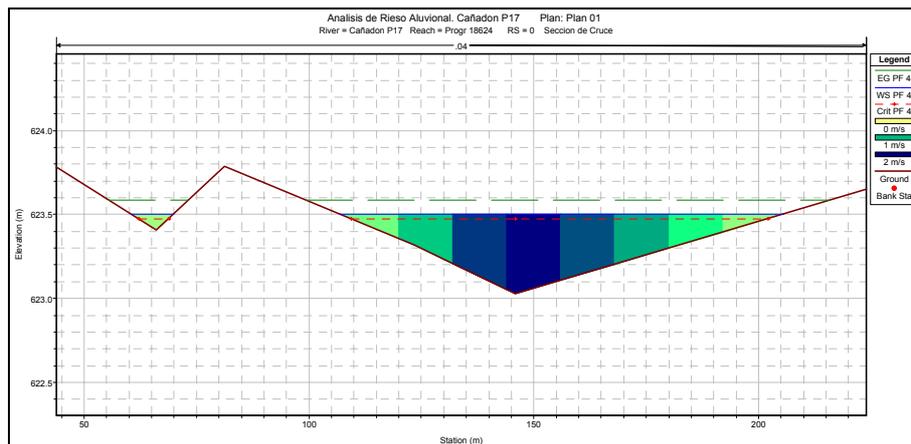
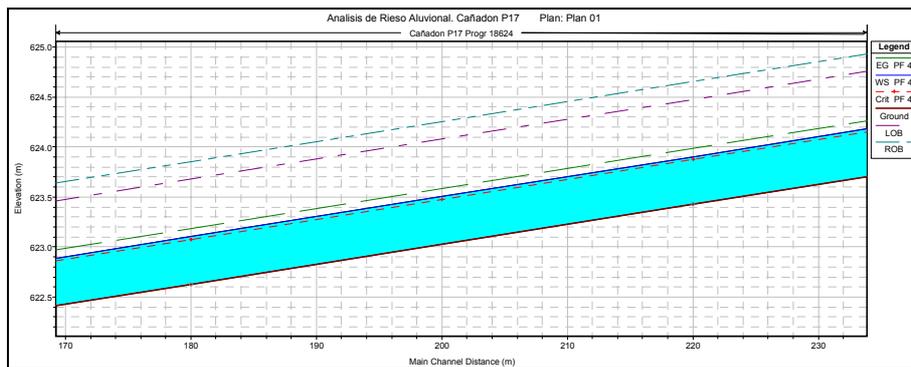
$Q = 4 \text{ m}^3/\text{s}$ $d = 0.002 \text{ m}$
Cota Pelo Agua
 $Z_0 = 712.81 \text{ msnm}$ $(d84)$

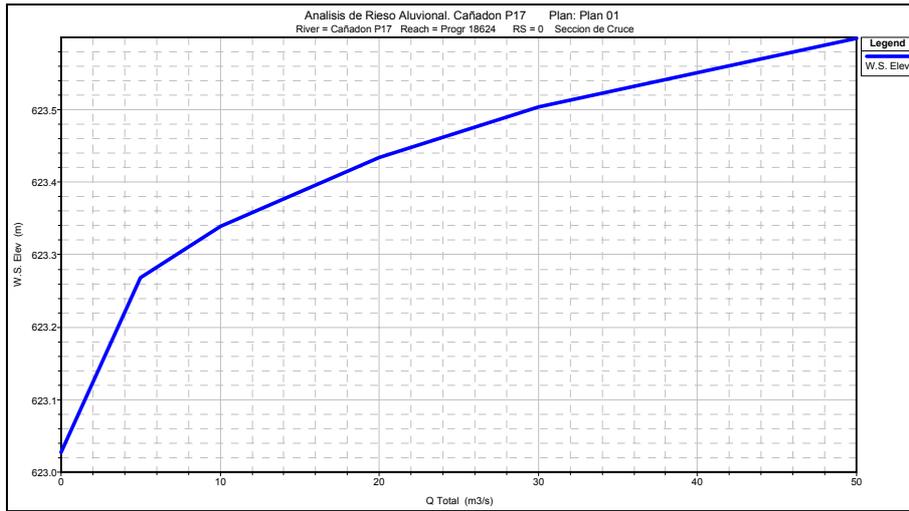
Nº	Pos	b_{lqz} (m)	b_{der} (m)	Q (m³/s)	A (m²)	P (m)	%Q Conv	h Depth(m)	V (m/s)	Vc (m/s)	b m	Z _b msnm	q m³/s	h _s m	Z _s msnm	Δh _s m
1	Chan	342.40	347.20	0.22	0.37	4.80	5.42	0.08	0.59	0.51	344.80	712.73	0.05	0.13	712.68	0.05
2	Chan	347.20	352.00	0.88	0.85	4.80	21.99	0.18	1.03	0.59	349.60	712.63	0.19	0.35	712.46	0.17
3	Chan	352.00	356.80	1.02	0.93	4.80	25.47	0.19	1.09	0.59	354.40	712.62	0.21	0.37	712.44	0.18
4	Chan	356.80	361.60	1.15	1.01	4.80	28.84	0.21	1.15	0.60	359.20	712.60	0.24	0.42	712.39	0.21
5	Chan	361.60	366.40	0.71	0.75	4.80	17.63	0.16	0.94	0.57	364.00	712.65	0.15	0.30	712.51	0.14
6	Chan	366.40	371.20	0.03	0.07	2.01	0.64	0.04	0.35	0.46	368.80	712.77	0.01	0.06	712.75	0.02



$E = 0.21 \text{ m}$; Cota Mín. = 712.39 m

Cañadón Cruce P17

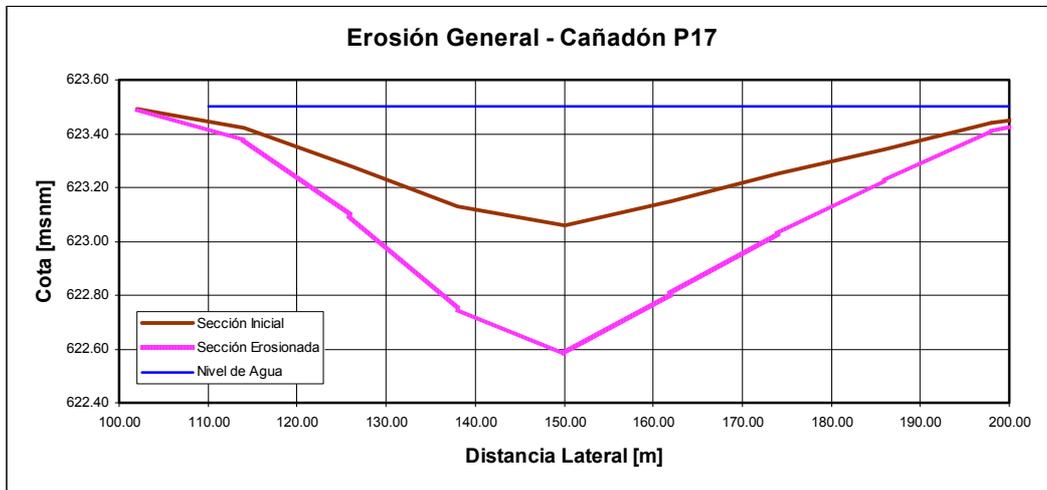




Cálculo de la Erosión General. Método LLT

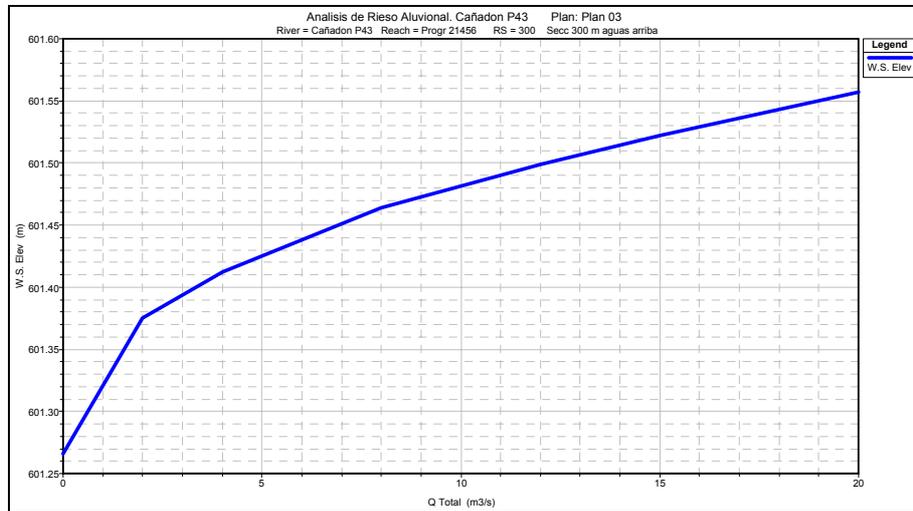
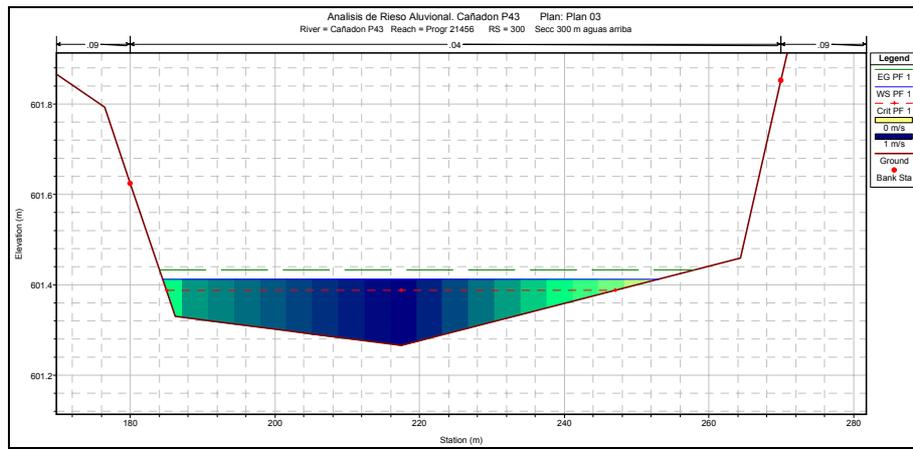
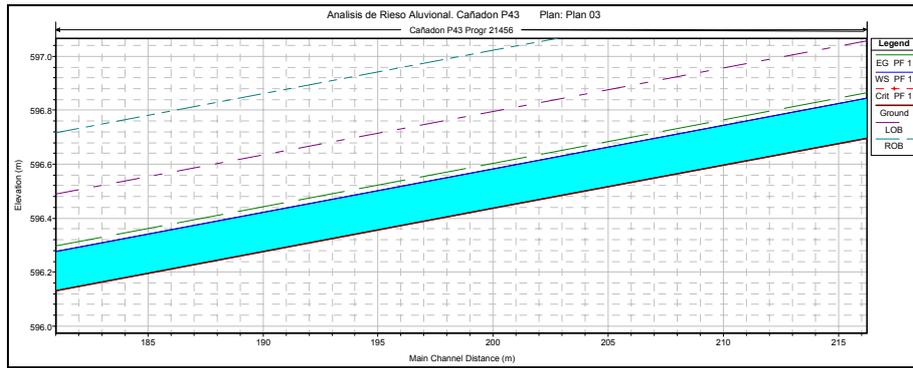
Q = 30 m³/s d = 0.002 m
 Cota Pelo Agua (d84)
 Z₀ = 623.5 msnm

N°	Pos	b _{teq} (m)	b _{der} (m)	Q (m ³ /s)	A (m ²)	P (m)	%Q Conv	h Depth(m)	V (m/s)	Vc (m/s)	b m	Z _b msnm	q m ² /s	h _s m	Z _s msnm	Δh _s m
4	Chan	96.00	108.00	0.00	0.01	1.16	0.00	0.01	0.10	0.36	102.00	623.49	0.00	0.01	623.49	0.00
5	Chan	108.00	120.00	0.50	0.95	12.00	1.68	0.08	0.53	0.51	114.00	623.42	0.04	0.12	623.38	0.04
6	Chan	120.00	132.00	2.72	2.62	12.00	9.08	0.22	1.04	0.61	126.00	623.28	0.23	0.40	623.10	0.18
7	Chan	132.00	144.00	6.67	4.48	12.00	22.23	0.37	1.49	0.66	138.00	623.13	0.55	0.75	622.75	0.38
8	Chan	144.00	156.00	8.74	5.27	12.00	29.12	0.44	1.66	0.68	150.00	623.06	0.73	0.92	622.58	0.48
9	Chan	156.00	168.00	5.89	4.16	12.00	19.63	0.35	1.41	0.65	162.00	623.15	0.49	0.69	622.81	0.34
10	Chan	168.00	180.00	3.44	3.02	12.00	11.47	0.25	1.14	0.62	174.00	623.25	0.29	0.47	623.03	0.22
11	Chan	180.00	192.00	1.55	1.87	12.00	5.17	0.16	0.83	0.57	186.00	623.34	0.13	0.27	623.23	0.11
12	Chan	192.00	204.00	0.32	0.72	12.00	1.08	0.06	0.44	0.49	198.00	623.44	0.03	0.09	623.41	0.03
13	Chan	204.00	216.00	0.00	0.01	1.57	0.00	0.01	0.10	0.36	210.00	623.49	0.00	0.01	623.49	0.00



E = 0.48 m; Cota Mín = 622.58

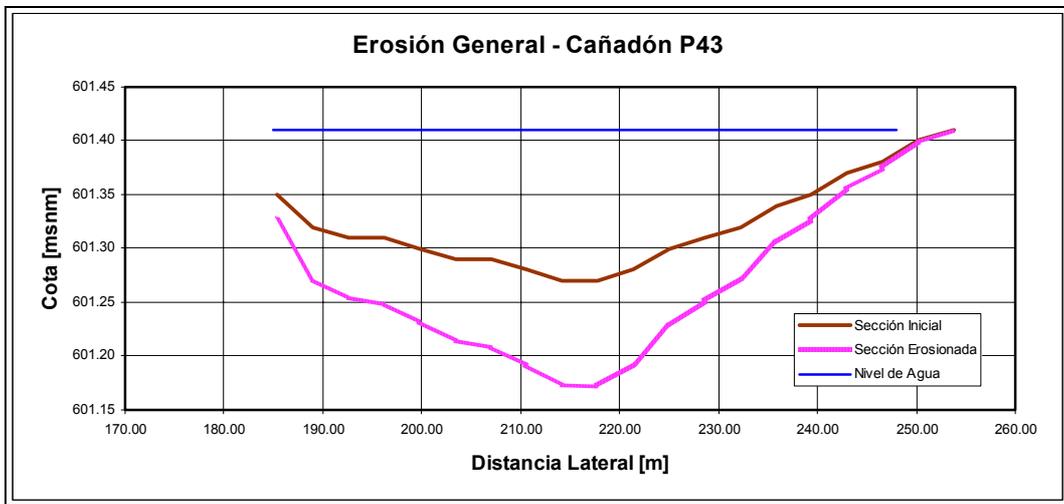
Cañadón Cruce P43



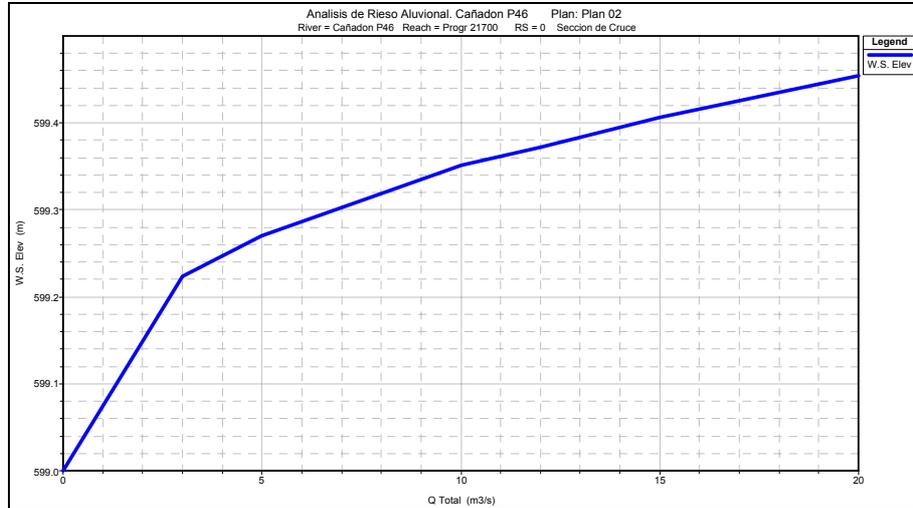
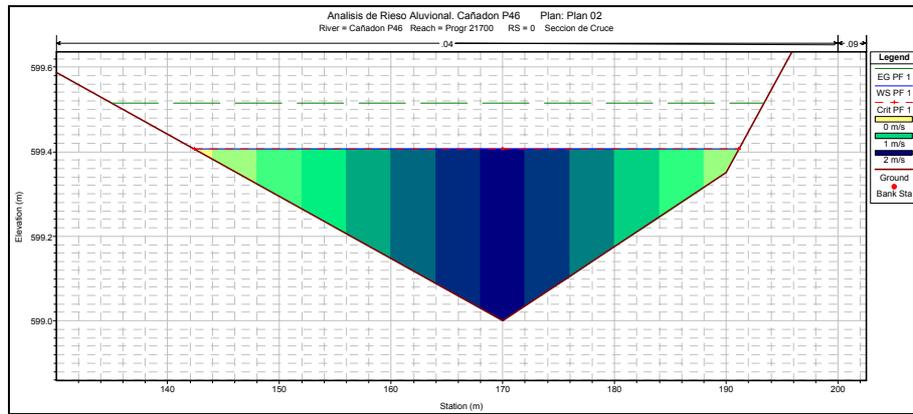
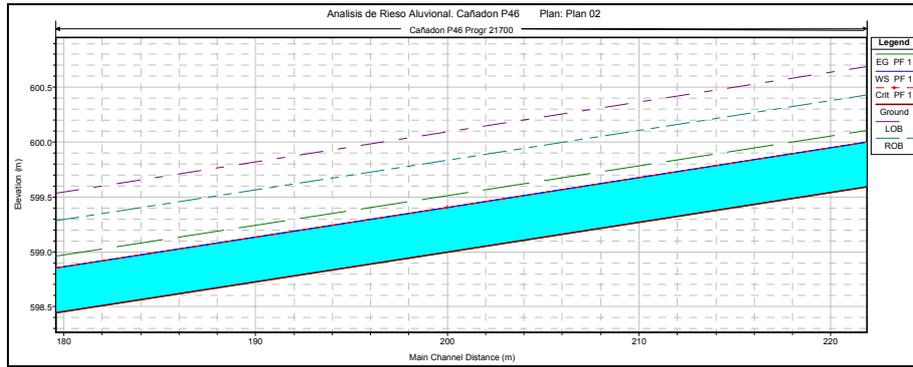
Cálculo de la Erosión General. Método LLT

Q = 4 m³/s **d = 0.002 m**
Cota Pelo Agua
Z₀ = 601.41 msnm

N°	Pos	b _{reg} (m)	b _{der} (m)	Q (m ³ /s)	A (m ²)	P (m)	%Q Conv	h Depth(m)	V (m/s)	Vc (m/s)	b m	Z _b msnm	q m ² /s	h _s m	Z _s msnm	Δh _s m
1	Chan	183.60	187.20	0.06	0.15	2.71	1.60	0.06	0.42	0.49	185.40	601.35	0.03	0.08	601.33	0.02
2	Chan	187.20	190.80	0.18	0.32	3.60	4.47	0.09	0.57	0.52	189.00	601.32	0.05	0.14	601.27	0.05
3	Chan	190.80	194.40	0.20	0.34	3.60	5.11	0.10	0.60	0.53	192.60	601.31	0.06	0.16	601.25	0.06
4	Chan	194.40	198.00	0.23	0.37	3.60	5.79	0.10	0.63	0.53	196.20	601.31	0.06	0.16	601.25	0.06
5	Chan	198.00	201.60	0.26	0.40	3.60	6.50	0.11	0.66	0.54	199.80	601.30	0.07	0.18	601.23	0.07
6	Chan	201.60	205.20	0.29	0.42	3.60	7.25	0.12	0.69	0.55	203.40	601.29	0.08	0.20	601.21	0.08
7	Chan	205.20	208.80	0.32	0.45	3.60	8.02	0.12	0.72	0.55	207.00	601.29	0.09	0.20	601.21	0.08
8	Chan	208.80	212.40	0.35	0.47	3.60	8.83	0.13	0.74	0.56	210.60	601.28	0.10	0.22	601.19	0.09
9	Chan	212.40	216.00	0.39	0.50	3.60	9.67	0.14	0.77	0.56	214.20	601.27	0.11	0.24	601.17	0.10
10	Chan	216.00	219.60	0.40	0.51	3.60	10.07	0.14	0.78	0.56	217.80	601.27	0.11	0.24	601.17	0.10
11	Chan	219.60	223.20	0.34	0.47	3.60	8.59	0.13	0.74	0.56	221.40	601.28	0.10	0.22	601.19	0.09
12	Chan	223.20	226.80	0.28	0.41	3.60	7.02	0.11	0.68	0.54	225.00	601.30	0.07	0.18	601.23	0.07
13	Chan	226.80	230.40	0.22	0.36	3.60	5.58	0.10	0.62	0.53	228.60	601.31	0.06	0.16	601.25	0.06
14	Chan	230.40	234.00	0.17	0.31	3.60	4.27	0.09	0.56	0.52	232.20	601.32	0.05	0.14	601.27	0.05
15	Chan	234.00	237.60	0.12	0.25	3.60	3.11	0.07	0.49	0.50	235.80	601.34	0.03	0.10	601.31	0.03
16	Chan	237.60	241.20	0.08	0.20	3.60	2.10	0.06	0.42	0.49	239.40	601.35	0.03	0.08	601.33	0.02
17	Chan	241.20	244.80	0.05	0.15	3.60	1.26	0.04	0.34	0.46	243.00	601.37	0.01	0.05	601.36	0.01
18	Chan	244.80	248.40	0.02	0.09	3.60	0.59	0.03	0.25	0.43	246.60	601.38	0.01	0.04	601.37	0.01
19	Chan	248.40	252.00	0.01	0.04	3.60	0.15	0.01	0.14	0.36	250.20	601.40	0.00	0.01	601.40	0.00
20	Chan	252.00	255.60	0.00	0.00	0.95	0.00	0.00	0.04	0.00	253.80	601.41	0.00	0.00	601.41	0.00



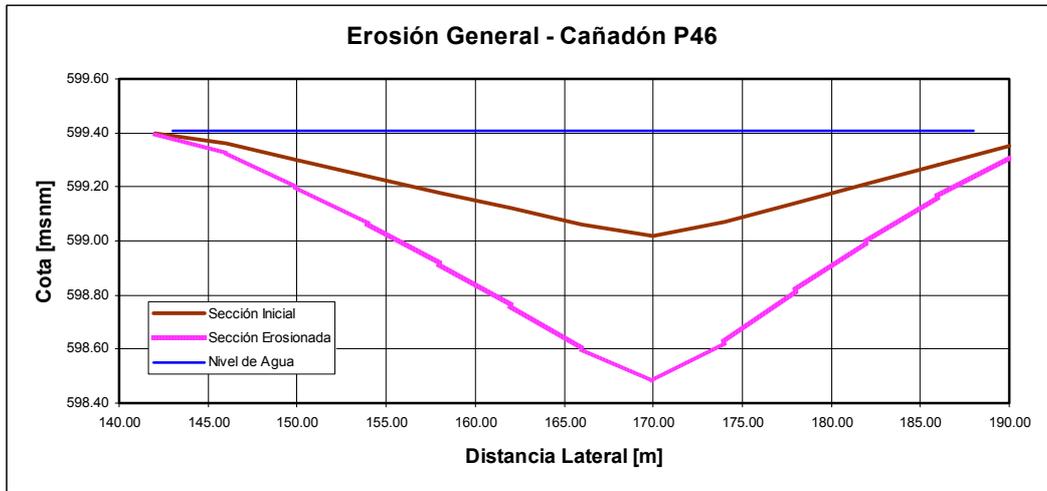
Cañadón Cruce P43



Cálculo de la Erosión General. Método LLT

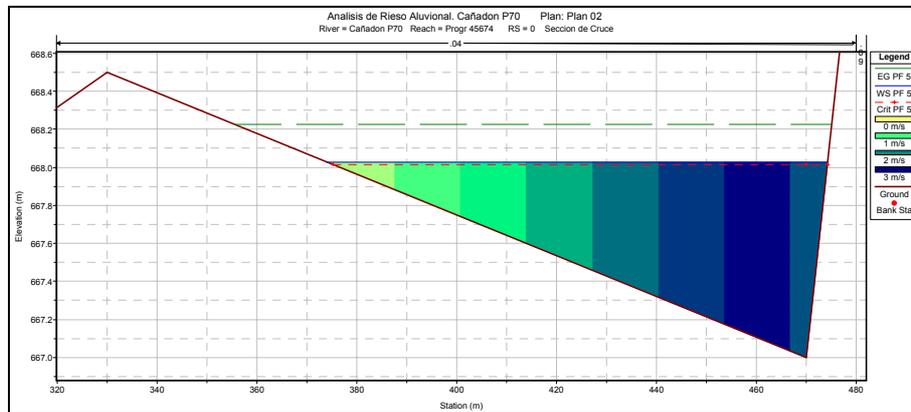
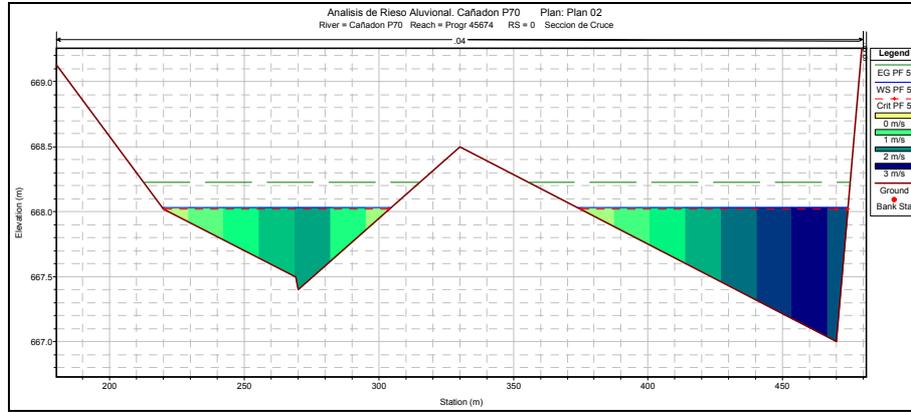
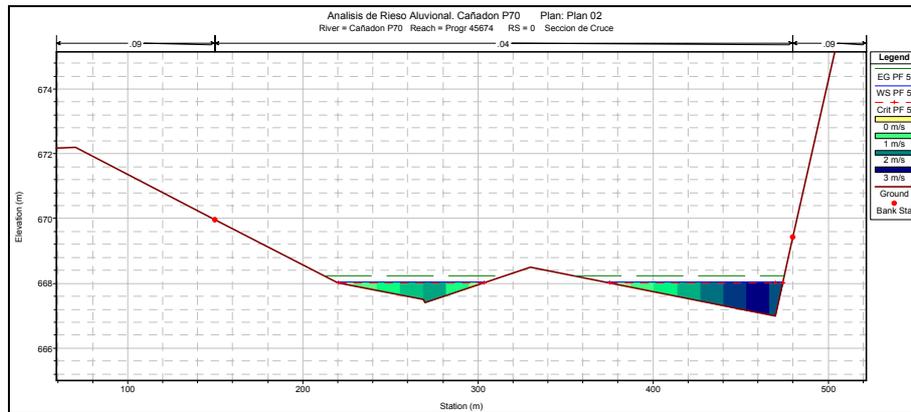
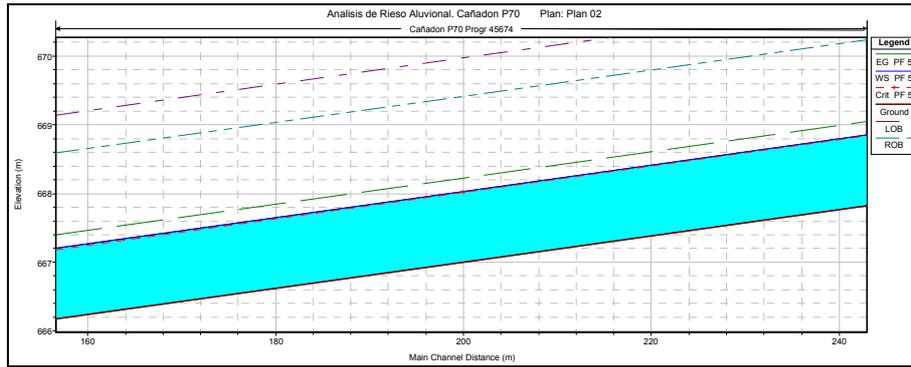
Q = 15 m³/s **d = 0.002 m**
Cota Pelo Agua
Z₀ = 599.41 msnm

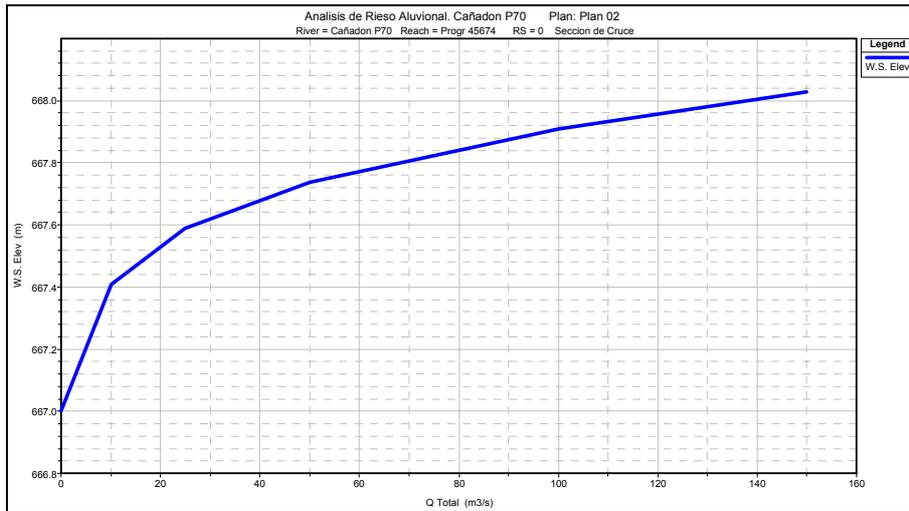
N°	Pos	b _{eg} (m)	b _{ger} (m)	Q (m ³ /s)	A (m ²)	P (m)	%Q Conv	h Depth(m)	V (m/s)	Vc (m/s)	b m	Z _b msnm	q m ² /s	h _s m	Z _s msnm	Δh _s m
1	Chan	140.00	144.00	0.00	0.02	1.62	0.02	0.01	0.19	0.36	142.00	599.40	0.00	0.01	599.40	0.00
2	Chan	144.00	148.00	0.11	0.21	4.00	0.71	0.05	0.50	0.47	146.00	599.36	0.03	0.08	599.33	0.03
3	Chan	148.00	152.00	0.37	0.45	4.00	2.47	0.11	0.83	0.54	150.00	599.30	0.09	0.21	599.20	0.10
4	Chan	152.00	156.00	0.75	0.68	4.00	4.98	0.17	1.09	0.58	154.00	599.24	0.19	0.35	599.06	0.18
5	Chan	156.00	160.00	1.22	0.92	4.00	8.16	0.23	1.33	0.61	158.00	599.18	0.31	0.49	598.92	0.26
6	Chan	160.00	164.00	1.79	1.15	4.00	11.93	0.29	1.55	0.63	162.00	599.12	0.45	0.65	598.76	0.36
7	Chan	164.00	168.00	2.44	1.39	4.00	16.25	0.35	1.75	0.65	166.00	599.06	0.61	0.81	598.60	0.46
8	Chan	168.00	172.00	2.96	1.56	4.00	19.72	0.39	1.90	0.67	170.00	599.02	0.74	0.93	598.48	0.54
9	Chan	172.00	176.00	2.31	1.35	4.00	15.39	0.34	1.72	0.65	174.00	599.07	0.58	0.78	598.63	0.44
10	Chan	176.00	180.00	1.57	1.07	4.00	10.43	0.27	1.47	0.63	178.00	599.14	0.40	0.60	598.81	0.33
11	Chan	180.00	184.00	0.94	0.79	4.00	6.28	0.20	1.20	0.60	182.00	599.21	0.24	0.42	598.99	0.22
12	Chan	184.00	188.00	0.45	0.51	4.00	3.01	0.13	0.89	0.56	186.00	599.28	0.12	0.25	599.16	0.12
13	Chan	188.00	192.00	0.09	0.18	3.16	0.63	0.06	0.53	0.49	190.00	599.35	0.03	0.10	599.31	0.04



E = 0.54 m; Cota min = 598.48

Cañadón Cruce P70

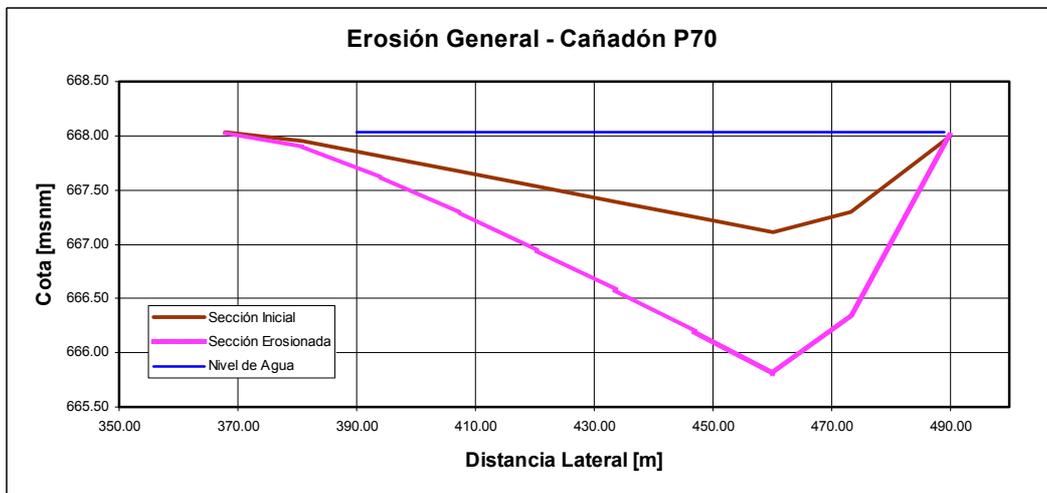




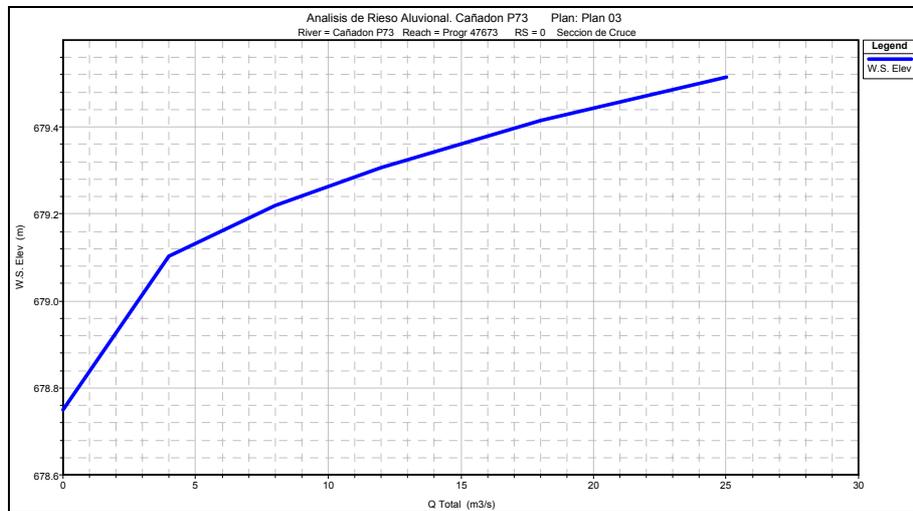
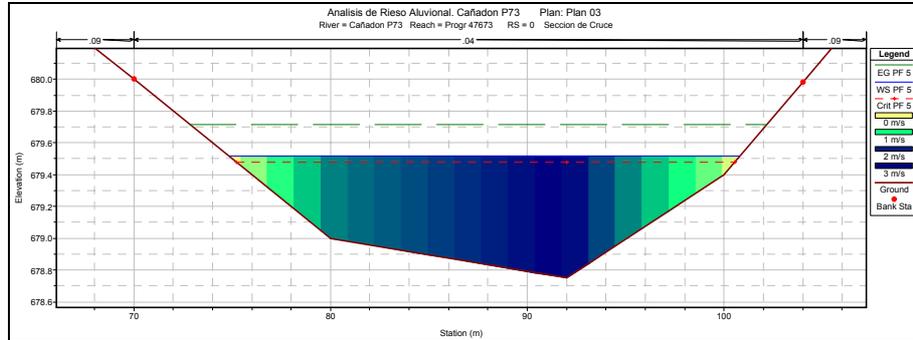
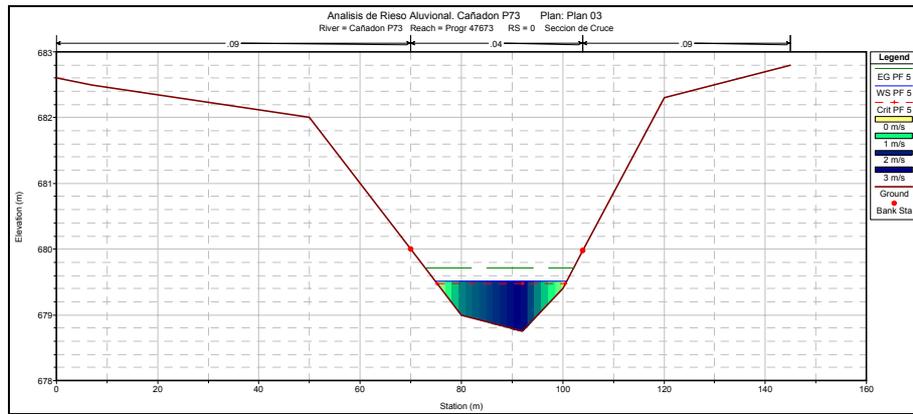
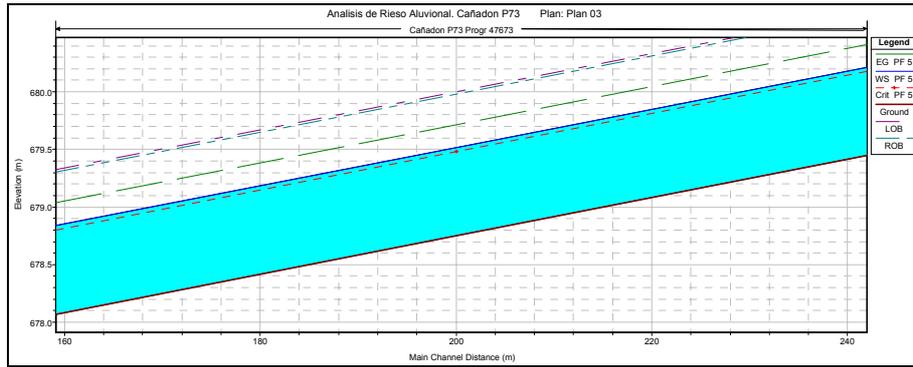
Cálculo de la Erosión General. Método LLT

Q = 150 m³/s **d = 0.002 m**
Cota Pelo Agua (d84)
Z₀ = 668.03 msnm

N°	Pos	b _{lqz} (m)	b _{der} (m)	Q (m ³ /s)	A (m ²)	P (m)	%Q Conv	h Depth(m)	V (m/s)	Vc (m/s)	b m	Z _b msnm	q m ³ /s	h _s m	Z _s msnm	Δh _s m
12	Chan	361.20	374.40	0.00	0.00	0.49	0.00	0.00	0.06	0.00	367.80	668.03	0.00	0.00	668.03	0.00
13	Chan	374.40	387.60	0.52	1.00	13.20	0.35	0.08	0.52	0.51	381.00	667.95	0.04	0.12	667.91	0.04
14	Chan	387.60	400.80	3.03	2.87	13.20	2.02	0.22	1.05	0.61	394.20	667.81	0.23	0.41	667.62	0.19
15	Chan	400.80	414.00	6.98	4.74	13.20	4.65	0.36	1.47	0.66	407.40	667.67	0.53	0.73	667.30	0.37
16	Chan	414.00	427.20	12.14	6.60	13.20	8.09	0.50	1.84	0.69	420.60	667.53	0.92	1.08	666.95	0.58
17	Chan	427.20	440.40	18.35	8.47	13.20	12.25	0.64	2.17	0.72	433.80	667.39	1.39	1.45	666.58	0.81
18	Chan	440.40	453.60	25.61	10.34	13.20	17.08	0.78	2.48	0.75	447.00	667.25	1.93	1.83	666.20	1.05
19	Chan	453.60	466.80	33.78	12.20	13.20	22.52	0.92	2.77	0.77	460.20	667.11	2.55	2.23	665.80	1.31
20	Chan	466.80	480.00	12.68	5.43	7.58	8.46	0.73	2.34	0.74	473.40	667.30	1.71	1.68	666.35	0.95



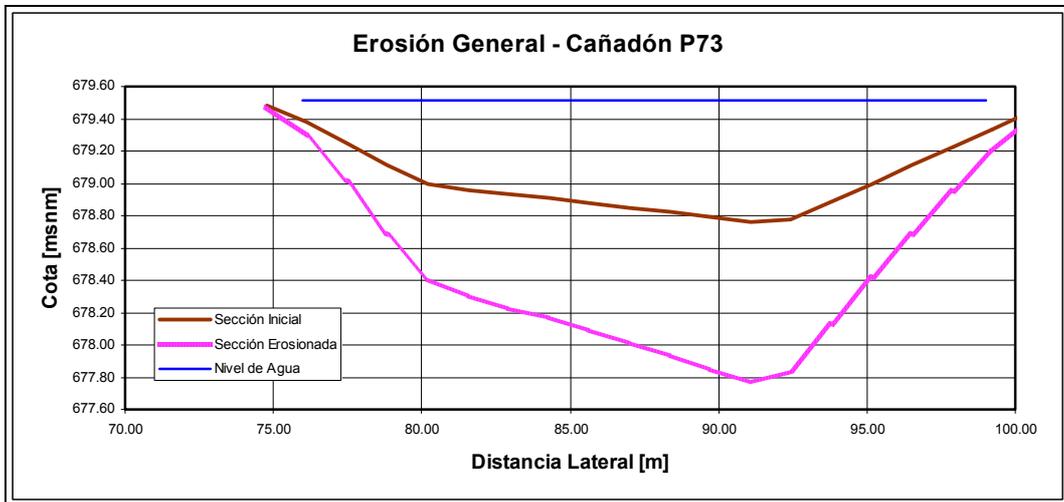
Cañadón Cruce P73



Cálculo de la Erosión General. Método LLT

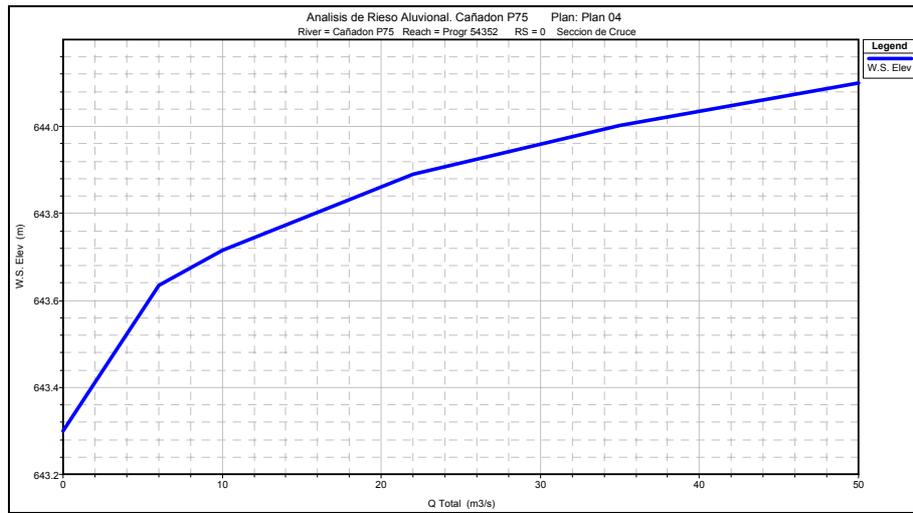
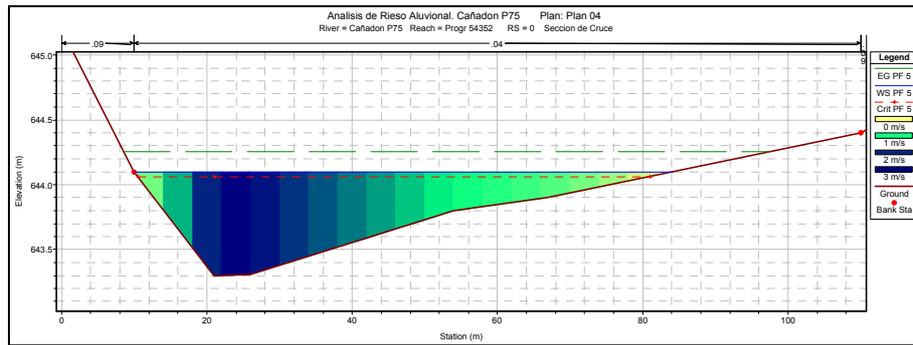
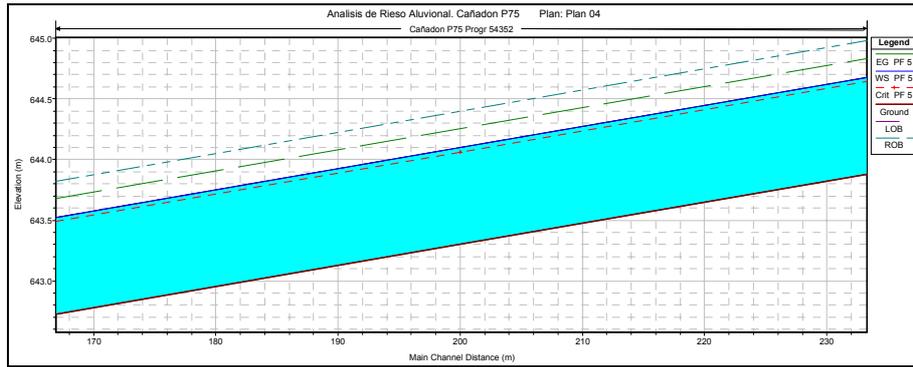
Q = 25 m³/s **d = 0.002 m**
Cota Pelo Agua
Z₀ = 679.51 msnm **(d84)**

N°	Pos	b _{luz} (m)	b _{der} (m)	Q (m3/s)	A (m2)	P (m)	%Q Conv	h Depth(m)	V (m/s)	Vc (m/s)	b m	Z _b msnm	q m ² /s	h _s m	Z _s msnm	Δh _s m
1	Chan	74.08	75.44	0.00	0.02	0.59	0.02	0.03	0.28	0.43	74.76	679.48	0.01	0.04	679.47	0.01
2	Chan	75.44	76.80	0.13	0.17	1.37	0.51	0.13	0.73	0.56	76.12	679.38	0.09	0.22	679.29	0.09
3	Chan	76.80	78.16	0.42	0.36	1.37	1.70	0.26	1.19	0.62	77.48	679.25	0.31	0.50	679.01	0.24
4	Chan	78.16	79.52	0.85	0.54	1.37	3.40	0.40	1.57	0.67	78.84	679.11	0.63	0.82	678.69	0.42
5	Chan	79.52	80.88	1.29	0.70	1.36	5.18	0.51	1.86	0.70	80.20	679.00	0.95	1.10	678.41	0.59
6	Chan	80.88	82.24	1.45	0.74	1.36	5.79	0.55	1.94	0.71	81.56	678.96	1.07	1.20	678.31	0.65
7	Chan	82.24	83.60	1.57	0.78	1.36	6.29	0.58	2.01	0.71	82.92	678.93	1.17	1.28	678.23	0.70
8	Chan	83.60	84.96	1.70	0.82	1.36	6.82	0.60	2.07	0.72	84.28	678.91	1.24	1.34	678.17	0.74
9	Chan	84.96	86.32	1.84	0.86	1.36	7.36	0.63	2.14	0.72	85.64	678.88	1.35	1.42	678.09	0.79
10	Chan	86.32	87.68	1.98	0.90	1.36	7.92	0.66	2.20	0.73	87.00	678.85	1.45	1.49	678.02	0.83
11	Chan	87.68	89.04	2.12	0.94	1.36	8.49	0.69	2.26	0.73	88.36	678.82	1.56	1.57	677.94	0.88
12	Chan	89.04	90.40	2.27	0.98	1.36	9.08	0.72	2.33	0.74	89.72	678.79	1.68	1.66	677.85	0.94
13	Chan	90.40	91.76	2.42	1.01	1.36	9.68	0.75	2.39	0.74	91.08	678.76	1.79	1.74	677.77	0.99
14	Chan	91.76	93.12	2.32	0.99	1.36	9.27	0.73	2.34	0.74	92.44	678.78	1.71	1.68	677.83	0.95
15	Chan	93.12	94.48	1.77	0.84	1.36	7.08	0.62	2.10	0.72	93.80	678.89	1.30	1.38	678.13	0.76
16	Chan	94.48	95.84	1.27	0.69	1.36	5.10	0.51	1.84	0.70	95.16	679.00	0.94	1.10	678.41	0.59
17	Chan	95.84	97.20	0.85	0.54	1.36	3.39	0.40	1.57	0.67	96.52	679.11	0.63	0.82	678.69	0.42
18	Chan	97.20	98.56	0.49	0.39	1.36	1.97	0.29	1.26	0.63	97.88	679.22	0.37	0.56	678.95	0.27
19	Chan	98.56	99.92	0.22	0.24	1.36	0.88	0.18	0.91	0.59	99.24	679.33	0.16	0.32	679.19	0.14
20	Chan	99.92	101.28	0.03	0.05	0.88	0.10	0.06	0.46	0.49	100.60	679.45	0.03	0.09	679.42	0.03



E = 0.99 m; Cota Mín = 677.77 m

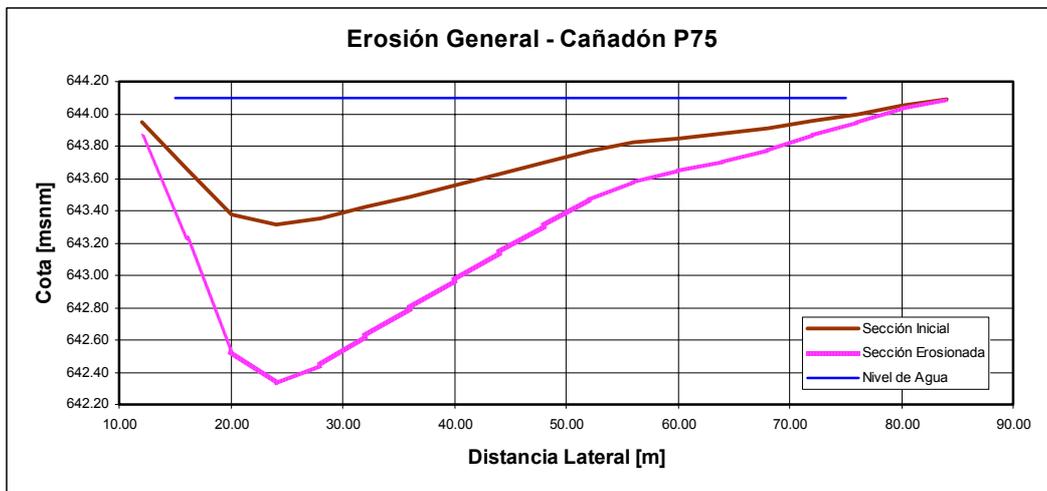
Cañadón Cruce P75



Cálculo de la Erosión General. Método LLT

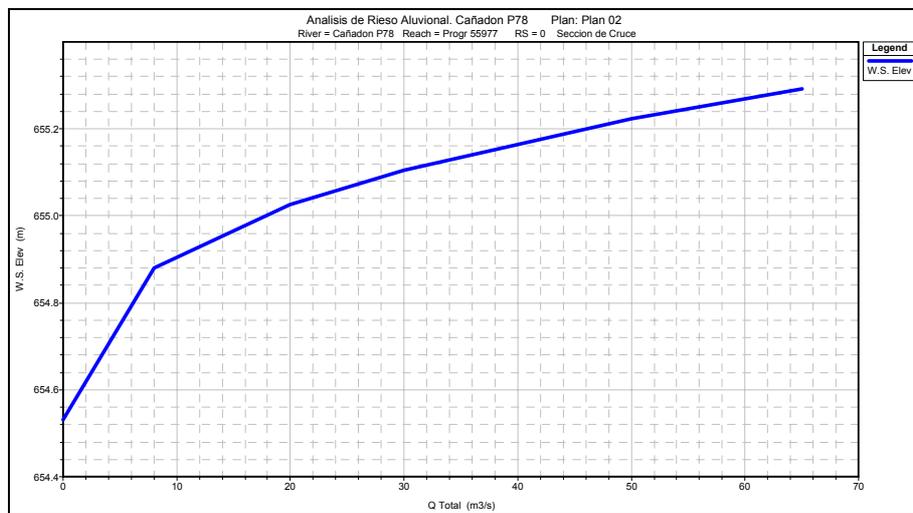
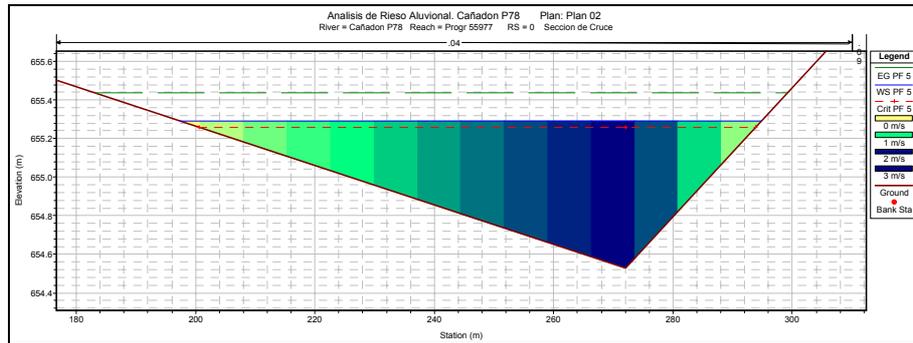
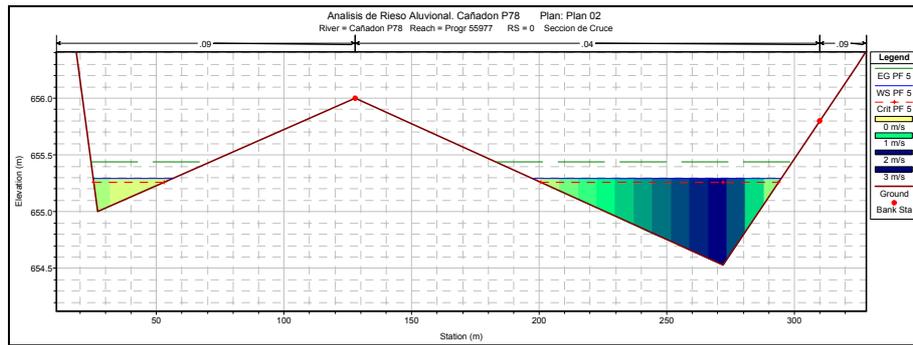
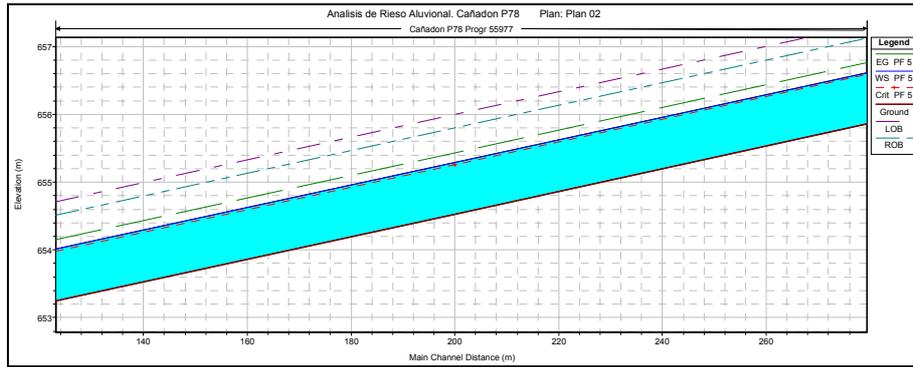
Q = 50 m³/s d = 0.002 m
Cota Pelo Agua
 Z₀ = 644.1 msnm (d84)

N°	Pos	b _{izd} (m)	b _{der} (m)	Q (m ³ /s)	A (m ²)	P (m)	%Q Conv	h Depth(m)	V (m/s)	Vc (m/s)	b m	Z _b msnm	q m ² /s	h _s m	Z _s msnm	Δh _s m
1	Chan	10.00	14.00	0.43	0.58	4.01	0.87	0.15	0.75	0.57	12.00	643.95	0.11	0.24	643.86	0.09
2	Chan	14.00	18.00	2.71	1.75	4.01	5.43	0.44	1.55	0.68	16.00	643.66	0.68	0.87	643.23	0.43
3	Chan	18.00	22.00	6.22	2.87	4.01	12.45	0.72	2.17	0.74	20.00	643.38	1.56	1.57	642.53	0.85
4	Chan	22.00	26.00	7.37	3.18	4.00	14.74	0.79	2.32	0.75	24.00	643.31	1.83	1.76	642.34	0.97
5	Chan	26.00	30.00	6.78	3.02	4.00	13.55	0.75	2.24	0.74	28.00	643.35	1.68	1.66	642.44	0.91
6	Chan	30.00	34.00	5.76	2.74	4.00	11.52	0.68	2.10	0.73	32.00	643.42	1.43	1.48	642.62	0.80
7	Chan	34.00	38.00	4.81	2.46	4.00	9.63	0.61	1.96	0.72	36.00	643.49	1.20	1.30	642.80	0.69
8	Chan	38.00	42.00	3.94	2.18	4.00	7.87	0.54	1.81	0.70	40.00	643.56	0.98	1.13	642.97	0.59
9	Chan	42.00	46.00	3.13	1.90	4.00	6.26	0.47	1.65	0.69	44.00	643.63	0.78	0.96	643.14	0.49
10	Chan	46.00	50.00	2.40	1.62	4.00	4.80	0.40	1.48	0.67	48.00	643.70	0.59	0.79	643.31	0.39
11	Chan	50.00	54.00	1.75	1.34	4.00	3.50	0.33	1.31	0.65	52.00	643.77	0.43	0.63	643.47	0.30
12	Chan	54.00	58.00	1.33	1.14	4.00	2.66	0.28	1.17	0.63	56.00	643.82	0.33	0.52	643.58	0.24
13	Chan	58.00	62.00	1.10	1.01	4.00	2.20	0.25	1.08	0.62	60.00	643.85	0.27	0.45	643.65	0.20
14	Chan	62.00	66.00	0.89	0.89	4.00	1.77	0.22	1.00	0.61	64.00	643.88	0.22	0.39	643.71	0.17
15	Chan	66.00	70.00	0.67	0.75	4.00	1.33	0.19	0.89	0.59	68.00	643.91	0.17	0.32	643.78	0.13
16	Chan	70.00	74.00	0.42	0.57	4.00	0.83	0.14	0.74	0.56	72.00	643.96	0.10	0.23	643.87	0.09
17	Chan	74.00	78.00	0.21	0.38	4.00	0.43	0.10	0.56	0.53	76.00	644.00	0.06	0.15	643.95	0.05
18	Chan	78.00	82.00	0.07	0.19	4.00	0.14	0.05	0.36	0.47	80.00	644.05	0.02	0.07	644.03	0.02
19	Chan	82.00	86.00	0.00	0.03	2.19	0.01	0.01	0.15	0.36	84.00	644.09	0.00	0.01	644.09	0.00

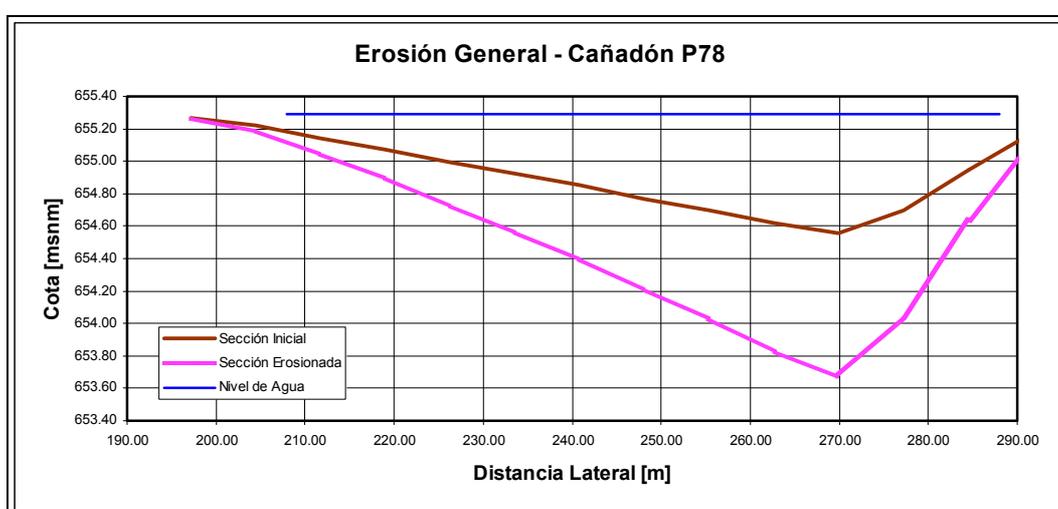


E = 0.97 m; Cota Mín = 642.34 m

Cañadón Cruce P78



Cálculo de la Erosión General. Método LLT																
				Q = 65 m³/s		d = 0.002 m										
				Cota Pelo Agua		(d84)										
				Z₀ = 655.29 msnm												
N°	Pos	b _{liza} (m)	b _{der} (m)	Q (m3/s)	A (m2)	P (m)	%Q Conv	h Depth(m)	V (m/s)	Vc (m/s)	b m	Z _b msnm	q m ² /s	h _s m	Z _s msnm	Δh _s m
14	Chan	193.52	200.80	0.01	0.06	3.44	0.02	0.02	0.18	0.41	197.16	655.27	0.00	0.02	655.27	0.00
15	Chan	200.80	208.08	0.25	0.53	7.28	0.38	0.07	0.47	0.50	204.44	655.22	0.03	0.10	655.19	0.03
16	Chan	208.08	215.36	0.81	1.07	7.28	1.25	0.15	0.76	0.57	211.72	655.14	0.11	0.25	655.04	0.10
17	Chan	215.36	222.64	1.61	1.61	7.28	2.47	0.22	1.00	0.61	219.00	655.07	0.22	0.39	654.90	0.17
18	Chan	222.64	229.92	2.60	2.15	7.28	4.01	0.30	1.21	0.64	226.28	654.99	0.36	0.56	654.73	0.26
19	Chan	229.92	237.20	3.79	2.69	7.28	5.83	0.37	1.41	0.66	233.56	654.92	0.52	0.72	654.57	0.35
20	Chan	237.20	244.48	5.14	3.23	7.28	7.91	0.44	1.59	0.68	240.84	654.85	0.70	0.89	654.40	0.45
21	Chan	244.48	251.76	6.65	3.77	7.28	10.23	0.52	1.76	0.70	248.12	654.77	0.92	1.08	654.21	0.56
22	Chan	251.76	259.04	8.32	4.31	7.28	12.79	0.59	1.93	0.71	255.40	654.70	1.14	1.26	654.03	0.67
23	Chan	259.04	266.32	10.13	4.85	7.28	15.58	0.67	2.09	0.73	262.68	654.62	1.40	1.46	653.83	0.79
24	Chan	266.32	273.60	11.87	5.34	7.28	18.26	0.73	2.22	0.74	269.96	654.56	1.62	1.62	653.67	0.89
25	Chan	273.60	280.88	8.18	4.27	7.28	12.59	0.59	1.92	0.71	277.24	654.70	1.13	1.25	654.04	0.66
26	Chan	280.88	288.16	3.36	2.50	7.28	5.16	0.34	1.34	0.65	284.52	654.95	0.46	0.66	654.63	0.32
27	Chan	288.16	295.44	0.47	0.74	6.66	0.72	0.11	0.63	0.54	291.80	655.18	0.07	0.17	655.12	0.06



E = 0.89 m; Cota Mín = 653.67 m

TIPIFICACIÓN DE LOS INDICADORES DE RIESGO

Lo que se denomina “riesgo aluvional” se puede tipificar desde diferentes puntos de vista y en el marco de varias escalas de análisis. Por ejemplo, se puede proceder a nivel de cuenca, a nivel de cauces, a nivel de un tramo de cauce o una sección en particular, etc.

En el caso del impacto de los procesos aluvionales sobre obras de cruce, concretamente conductos, la tipificación puede hacerse también desde diferentes ópticas. En un trabajo reciente, Tchilinguirian et al. (2003) han desarrollado una metodología para tipificar el riesgo poniendo énfasis en los procesos erosivos sobre la pista del ducto, tanto por efecto de la escorrentía longitudinal a lo largo de la pista como por la acción de cauces que la atraviesan. En este caso, el análisis se focaliza exclusivamente en el riesgo potencial inducido por el flujo concentrado de escorrentía conducida por los cañadones en la sección de cruce, en cuanto a la posibilidad de poner al descubierto al conducto una vez que los procesos erosivos alcanzan magnitudes del orden de la “tapada”.

Puesto que ya se han calculado cuantitativamente las magnitudes de las erosiones generales máximas esperables para las condiciones hidrológicas de diseño, los indicadores de riesgo a aplicar en este caso deberán expresarse a través de una comparación entre el valor de la erosión y la profundidad de ubicación de la cota de extradós del conducto, o “tapada”.

Según los planos conforme a obras, la tapada varía aproximadamente entre 1.20 m y 1.60 m en todas las secciones de cruces con cauces. Asimismo, debe tenerse en cuenta que los valores de erosiones calculados son puramente “determinísticos” sino que están asociados a un cierto margen de incertidumbre producto de una serie de situaciones que no se pueden cuantificar con precisión en la modelación a partir de la cual se originan los cálculos.

Por ejemplo, en todos los casos se adoptó un material característico $d = 2.0$ mm. Como se sabe, el tamaño de material es variable de sección en sección y también varía en una misma sección a través del tiempo, producto de la naturaleza de los procesos de deposición de sedimentos granulares al final de las crecidas y de la fuente de suministro de esos materiales en las áreas de generación en la cuenca. La incidencia de la incertidumbre en el tamaño de sedimento viene dada por la forma en que este aspecto interviene en la fórmula de cálculo, en este caso, la erosión varía con $d^{-0.2}$ a constancia del caudal específico q . Es decir, si se comete un error y el tamaño de sedimento resultara un 30% menor, la erosión se incrementaría sólo un 7.4%, lo cual no representa una magnitud alarmante.

Sin embargo, la incertidumbre en la distribución lateral de velocidades, y por ende, del caudal unitario, tiene un impacto sobre la erosión mucho más importante. En efecto, la erosión varía con $q^{0.71}$, de modo tal que si por alguna singularidad el flujo se concentra en un sector de la sección transversal de modo que se genera un incremento en el caudal específico del 30%, el aumento en la erosión será del 20.5%. Debe tenerse en cuenta que el modelo HEC-RAS es por naturaleza unidimensional y el mismo usa un algoritmo interno para generar la distribución lateral de velocidades. En la práctica se pueden producir un sinnúmero de situaciones (presencia de bloques de suelos, rocas, troncos, etc.) que pueden producir concentraciones de flujo que aumenten la erosión. Por lo tanto, las incertidumbres en este aspecto son mucho mayores.

Teniendo en cuenta los aspectos mencionados, se han elaborado los siguientes criterios de calificación del riesgo de erosión (Tabla 6).

Tabla 6.- Criterios de valoración de riesgo para cada cruce

Denominación	Símbolo	Criterio de valoración del Riesgo
Muy bajo	B-	La erosión es menor que el 20% de la tapada mínima
Bajo	B+	La erosión se ubica entre un 20% y 35% de la tapada mínima
Medio moderado	M-	La erosión se ubica entre un 35% y 50% de la tapada mínima
Medio alto	M+	La erosión se ubica entre un 50% y 65% de la tapada mínima
Moderadamente alto	A-	La erosión se ubica entre un 65% y 80% de la tapada mínima
Muy alto	A+	La erosión es mayor que el 80% de la tapada mínima

CLASIFICACIÓN DE LOS CAUCES EN CUANTO AL RIESGO ALUVIONAL

Considerando los criterios de riesgo aluvional antes establecidos se procedió a la clasificación de cada uno de los cruces. En la Tabla 7 se presenta la calificación final, indicándose además

los valores de erosión general máxima probable para el caudal de diseño y la cota mínima alcanzada por el thalweg de la sección erosionada para tal condición hidráulica.

Tabla 7.- Clasificación Final de Riesgo de cada cruce

Punto	Progresiva	Erosion	Cota Mín.	Riesgo
P78	55977	0.89	653.67	A-
P75	54352	0.97	642.34	A+
P73	47673	0.99	677.77	A+
P70	45674	1.31	665.80	A+
P46	21700	0.54	598.48	M+
P43	21456	0.10	601.17	B-
P17	18624	0.48	622.58	M+
P4	6515	0.21	712.39	B-

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se ha analizado el comportamiento hidrológico, hidráulico y morfodinámico de ocho cañadones que atraviesan la traza del oleoducto en puntos considerado críticos en relación a la posibilidad de ocurrencia de procesos aluvionales que pueden generar riesgos sobre la estabilidad de la estructura del conducto.

Los cañadones son unos cursos fluviales efímeros de morfología de tipo trenzado, típicos de climas áridos, con descargas extremas y de rápida variación y vegetación escasa. Transportan gran cantidad de materiales como carga de fondo durante eventos de escorrentía generados por tormentas convectivas intensas.

Los suelos típicos de la zona de estudio están constituidos por materiales granulares altamente erosionables ante la acción de corrientes de agua de tipo fluvial.

Las características hidrológicas de la región muestran eventos de escorrentía con competencia para generar importantes procesos de erosivos en los lechos de los cauces. Se han establecido las lluvias de diseño, se han modelado hidráulicamente los cauces y se han calculado las erosiones generales posibles en cada uno de ellos.

Asimismo, se ha desarrollado una metodología para la valoración de los riesgos a que se ve expuesto el conducto por procesos erosivos en cada cruce con un cañadón.

Se recomienda la implementación de esquemas ingenieriles para el control de los procesos erosivos en los cruces con riesgo muy alto. Por su parte, se recomienda evaluar la conveniencia de disponer medidas de protección en cruces tipificados como de riesgo ‘moderadamente alto’, desarrollando estudios más detallados.

Los dispositivos a diseñar son los típicos para el control de la erosión general en cauces aluvionales, es decir, mantas flexibles continuas o combinación de mantas con dispositivos del tipo “rastrillos”, dentellones, o similares.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Brice, J. C.** (1975). "Airphoto interpretation of the form and behavior of alluvial rivers." *Final Report to the U.S. Army Research Office*, Washington, D.C.
- Brice, J. C., and Blodgett, J. C.** (1978). "Countermeasures for hydraulic problems at bridges, vol. I. analysis and assessment. (Final report. Jun 75 – Sep 78)." *Report no. FHWA/RD-78/162*, Federal Highway Administration, Washington, D.C.
- Brice, J. C.** (1982). "Stream channel stability assessment." *Report no. FHWA/RD-82/021*, Federal Highway Administration, Washington, D.C.
- Chang, H. H.** (1988). *Fluvial Processes in River Engineering*. J. Wiley and Sons, New York, USA.
- Dufilho, A.C., Horne, F., Navedo, R. & Polla, G.** (2001). "Diseño de obras de control de aluviones basada en simulación de procesos hidrológicos torrenciales en cuencas de la Patagonia". *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.5, n.2, p.198-203, 2001. Campina Grande, PB, DEAg/UFPB – [<http://www.agriambi.com.br>].
- Farias, H.D.** (2008). "Estudio de Riesgo Aluvional. Cruces del Oleoducto ECN-JCP-PH con varios cañadones al Norte del Río Colorado. Provincias de Mendoza y Neuquén". *Informe preparado para Serman & Asociados S.A. y elevado a Petroandina Resources Ltd.*
- Julien, P.Y.** (1995). *Erosion and Sedimentation*. Cambridge University Press, NY, USA.
- 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.
- Polansky, J.** (1954). *Rasgos geomorfológicos del territorio de la provincia de Mendoza*. Ministerio Economía, Instituto Investigaciones Económicas y Tecnológicas. Cuadernos de Investigaciones y Estudios, 4: 4-10, Mendoza.
- Rosgen, D.L.** (1994). "A classification of natural rivers". *CATENA*. Elsevier Science B.V.. Vol. 22, pp. 169-199.
- Rosgen, D.** (1996). *Applied River Morphology*. Wildland Hydrology, Pagosa Springs, Colorado, USA.
- Schumm, S. A.** (1977). *The Fluvial System*. Blackburn Press, UK & USA.
- Tchilinguirian, P., Guirin, A. & Genovesi, L.** (2003). "Método de Evaluación y Mitigación del Riesgo de Erosión Aplicado a Poliductos en Ecosistemas del Monte Patagónico". *II Congreso Hidrocarburos*, Buenos Aires, 29 jun./2 de jul. 2003, CD C749 4 0013812, Instituto Argentino del Petroleo y del Gas (IAPG), Buenos Aires, Argentina [<http://biblioteca.iapg.org.ar/iapg/ArchivosAdjuntos/CONAID2/home.pdf>].
- Van den Berg, J.H.** (1995). "Prediction of alluvial channel pattern of perennial rivers". *Geomorphology*, Vol. 12, No. 259-279.
- Yalin, M.S. & Ferreira Da Silva, A.M.** (2001). *Fluvial Processes*. IAHR Monograph, A. A. Balkema Publishers, Rotterdam, The Netherlands.