



XXIII SEMINARIO NACIONAL DE HIDRÁULICA E HIDROLOGÍA IBAGUÉ, 15 AL 17 DE AGOSTO DE 2018.

DISEÑO DEL REALINEAMIENTO DEFINITIVO DEL ARROYO SAN ANTONIO. DIMENSIONAMIENTO DE LAS ESTRUCTURAS PARA LA DEFINICIÓN DEL LECHO Y ORILLAS

Ing. Héctor Alfonso Rodríguez Díaz, M.Sc.

Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, Bogotá D.C. - Colombia, alfonso.rodriguez@escuelaing.edu.co

Ing. Héctor Matamoros Rodríguez, M.Sc.

Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, Bogotá D.C. - Colombia, hector.matamoros@escuelaing.edu.co

Ing. William Ricardo Aguilar Piña, M.Sc.

Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, Bogotá D.C. - Colombia, william.aguilar@escuelaing.edu.co

Ing. Frank Velasco Ávila, M.Sc.

Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, Bogotá D.C. - Colombia, frank.velasco@escuelaing.edu.co

Ing. Andrés Humberto Otálora Carmona, M.Sc.

Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, Bogotá D.C. - Colombia, andres.otalora@escuelaing.edu.co

Ing. Romeo Romeo Quintero, M.Sc.

Drummond, Valledupar - Colombia, RRamos@drummondLtd.com

RESUMEN:

En toda actividad minera a cielo abierto se presenta, en diferente grado, la alteración de las condiciones naturales del sistema intervenido, por tanto, es necesario la implementación de planes de mitigación del impacto al medio ambiente para mantener la continuidad y dinámica del recurso hídrico. La empresa Drummond Ltd. realiza actualmente una explotación minera en el sur del departamento del Cesar. El Arroyo San Antonio discurre por la zona de explotación y es necesario estudiar, definir y diseñar un canal de realineamiento para un tramo de la corriente, de tal manera que este sistema de drenaje mantenga sus condiciones y se aseguren las condiciones ambientales tal como se establece en el plan de manejo ambiental propuesto por Drummond Ltd. Con el propósito de preservar las características morfológicas, hidrológicas, hidrográficas y geométricas de la corriente se han realizado los análisis y estudios del realineamiento del Arroyo San Antonio. La concepción meandriforme del nuevo canal permiten simular las condiciones naturales de la corriente para conservar los procesos fluviales. Para asegurar una cierta estabilidad se han realizado análisis, estudios y diseños que han permitido proponer obras sobre el lecho y las orillas del nuevo canal de realineamiento.

ABSTRACT:

In all open-pit mining activities show different alterations of the natural conditions of the system intervened, therefore, it is necessary to implement mitigation plans for the preserving the environment and the dynamics of rivers. In particular, The Drummond Ltd. company developing a mining operation in the south of the department of Cesar. The San Antonio River is a natural stream that runs through the exploitation area. It is necessary study, define and design the realignment of a section of the stream to give continuity to the drainage system and as part of the environmental management plan proposed by Drummond Ltd. Company. These activities had been designed to preserve the morphological, hydrological, hydrographic and geometric characteristics of the natural stream and the realignment the San Antonio River. Its meandriform conception allows to keep up the natural conditions of the stream maintain the fluvial processes. The studies, designs and works on the bed and banks of the new realignment channel allowing its stability in the time.

PALABRAS CLAVES: *Realineamiento, Diseño Meandriforme, procesos fluviales.*



INTRODUCCIÓN

Drummond Ltd. actualmente realiza la explotación minera a cielo abierto en la zona denominada PRIBBENOW. Para el desarrollo de esta explotación, ha sido necesario modificar algunos drenajes naturales de la zona y específicamente diseñar y construir el canal de realineamiento temporal del Arroyo San Antonio para conducir las aguas de la cuenca hasta un punto de entrega nuevamente en el mismo arroyo. Para el avance minero propuesto, es necesario definir un realineamiento del canal principal de drenaje hacia el sur de la zona. Para este proyecto de ingeniería denominado Realineamiento No. 4, los estudios hidrológicos, morfológicos y de hidráulica fluvial tienen en cuenta la confluencia del embalse de Paujil con la parte alta de la cuenca del Arroyo San Antonio, el Caño Piedras, el Arroyo Malanquez y otros elementos dinámicos del sistema.

Para el desarrollo de este proyecto de ingeniería se analizó la información hidro-climatológica, se construyeron diferentes hietogramas con el propósito de estimar los caudales máximos y los hidrogramas producidos en las subcuencas de la zona de estudio, información necesaria para el tránsito hidráulico a través del nuevo canal proyectado, así como para los diseños de diferentes obras hidráulicas propuestas para mejorar la estabilidad en planta y perfil del nuevo realineamiento y de la zona. La investigación también han considerado las entrega de diferentes cauces a este nuevo realineamiento No. 4 y por tanto, las obras necesarias para asegurar el adecuado manejo de la escorrentía.

A nivel esquemático el modelo general, que busca reproducir las condiciones actuales de flujo en la red de drenaje, considera un tránsito hidrológico en la parte media y alta de la cuenca del Arroyo San Antonio, localizadas en la zona de la Serranía del Perijá, hasta el inicio del nuevo canal de realineamiento; un tránsito hidráulico desde los puntos de inicio de este canal de desviación hasta el punto de entrega aguas abajo y finalmente un tránsito hidrológico desde el punto de entrega del canal de realineamiento al Arroyo San Antonio hasta la zona de llanura de inundación en su descarga al Río Cesar.

El alcance general del presente trabajo también incluye el diseño del canal de realineamiento y las obras para el manejo de la escorrentía de acuerdo con el alineamiento establecido por Drummond Ltd.

INFORMACIÓN TOPOGRÁFICA Y DE LA ZONA. PARÁMETROS

Se dispone de la topografía en estado natural y antrópico de los cauces de interés sobre la cuenca del Arroyo San Antonio, información útil para la delimitación de las cuencas hidrográficas y para la obtención de los parámetros morfométricos requeridos en el tránsito hidrológico. En las zonas de llanura se ha utilizado la información topográfica suministrada por Drummond Ltd. correspondiente a secciones de 250 metros de ancho cada 500 metros sobre el trazado del nuevo realineamiento el cual se ha definido sobre predios de su propiedad.

Esta información es necesaria teniendo en cuenta que los hidrogramas generados con el modelo HMS son utilizados para el tránsito hidráulico de crecientes por el canal proyectado. A partir de la información disponible es posible implementar un modelo que combina un tránsito hidrológico en algunos tramos de la red de drenaje, especialmente los puntos iniciales y finales y un tránsito hidráulico en el tramo del realineamiento.

Así las cosas, se construyó un modelo geográfico integrado de cuencas y sistemas de drenaje que incluye el realineamiento. Se utilizó la información disponible de los modelos digitales de terreno de la NASA con el reacondicionamiento del terreno realizado con la fotointerpretación de cauces efectuado por Drummond Ltd.

INFORMACIÓN DE CAUCES FOTO RESTITUIDOS EN ESTADO NATURAL

De acuerdo con el trabajo realizado en los estudios previos en los que se determinó la oferta hídrica en estado natural para la Cuenca del Arroyo San Antonio, la red de drenaje se componía de 81 tramos con una longitud aproximada de 249 kilómetros. En la Figura **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**1 se presenta un mapa del drenaje general de la zona y la delimitación de la cuenca hidrográfica.

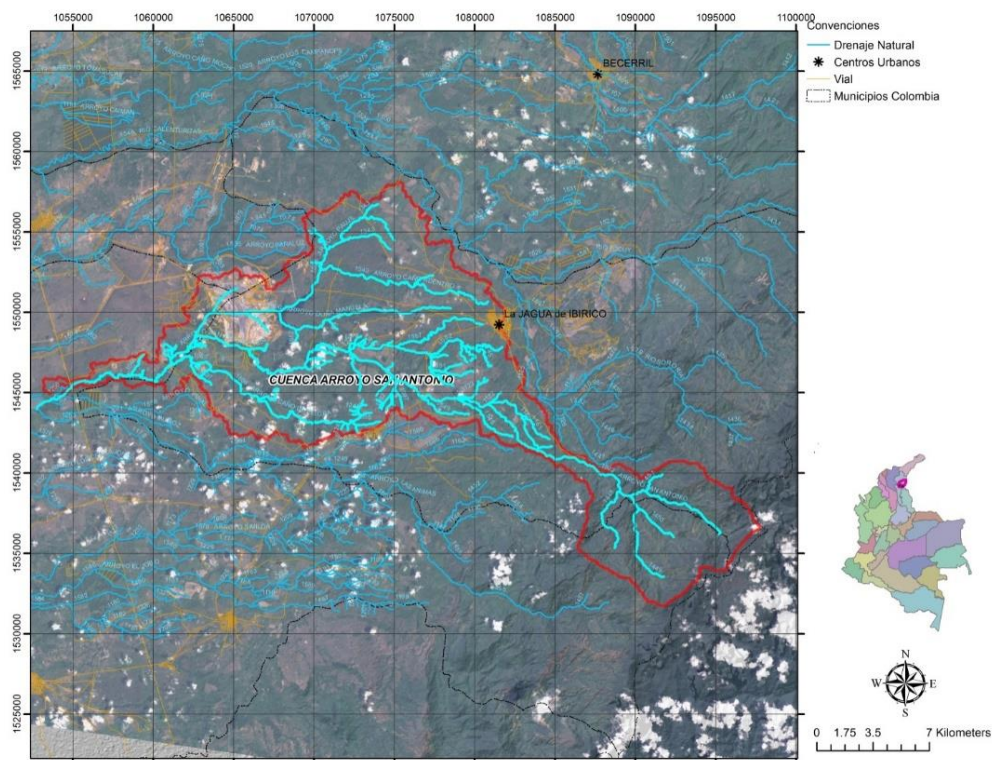


Figura 1.- Red de Drenaje Natural con identificador HydroID.



ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS PARA LOS EJES DEL REALINEAMIENTO Y FACTIBILIDAD DEL CANAL Y SECCIONES TRANSVERSALES. TRAZADO EN PLANTA Y PERFIL.

Se estudiaron y definieron las diferentes características hidráulicas del nuevo canal de realineamiento de acuerdo con las condiciones topográficas, geológicas, geotécnicas y morfológicas para asegurar su estabilidad, debido, entre otros aspectos, el cambio obligado en las condiciones de la escorrentía en el área de explotación minera. Para la realización de estos análisis y teniendo en cuenta la información disponible y suministrada por Drummond Ltd., resultó muy importante la visita detallada a la zona de la explotación especialmente en los puntos de inicio y entrega del nuevo canal. Como resultado de los estudios y los diseños propuestos para el nuevo canal, ha sido necesario implantar obras de estabilización del lecho y protección de orillas.

Con el trazado definido para el canal de realineamiento se han establecido unas condiciones que permiten el avance de la explotación minera hacia el sur occidente del frente minero actual. La construcción de este canal es necesario desviar las aguas del Canal Paujil y de la cuenca alta del Arroyo San Antonio hacia el sur, interceptar el cauce del Caño Piedras (tributario del actual canal del realineamiento). Adicionalmente el nuevo canal de realineamiento se desvía en dirección oriente-occidente e intercepta el cauce del Caño Melanquez que discurre en dirección noroccidente, que tributa más adelante sus aguas al Caño Piedras. La intervención sobre el Caño Melanquez se presenta más delante de un box existente y por tanto su nueva descarga debe realizarse en el nuevo canal de realineamiento. A partir de este punto el canal de realineamiento continúa hacia el occidente y su alineamiento toma dirección noroccidente, para empalmar con el cauce natural del Arroyo San Antonio. A partir de este punto de entrega, el cauce del Arroyo San Antonio mantiene su condición natural, es decir transporta los caudales de escorrentía de toda la cuenca que provienen de los cauces del embalse Paujil, cuenca alta de San Antonio, caño Piedras y caño Melanquez.

Con el diseño del realineamiento que incluye su trazado en planta y en perfil y una serie de obras de control, manejo y protección del lecho se modifican las condiciones actuales de la escorrentía en el área de influencia actual de la explotación minera. Para visualizar el detalle de estas modificaciones, en la Tabla 1 se presenta una comparación entre las condiciones actuales y las condiciones después de la intervención, producto del realineamiento. Se puede observar que el nuevo realineamiento tiene una longitud un 22.3% mayor que la actual; las velocidades por el nuevo canal están comprendidas entre 0.63 m/s y 1.13 m/s, velocidades menores que las que se tienen en los realineamientos actuales. Se puede advertir que la pendiente del nuevo realineamiento es un 23.16% menor que el promedio de la pendiente del realineamiento actual, con el propósito de conseguir una pendiente similar a la del lecho del arroyo San Antonio en esta zona. La comparación de las secciones transversales permite observar que para el caudal dominante ($T_r = 2.33$ años) la base, la altura y los taludes del canal son menores que la del realineamiento actual (25 m y 35 m para la base, 1.5 m y 3 m para la altura, 1:1 y 2:1 para los taludes, respectivamente) situación que se ve compensada con una sección más generosa para los caudales de creciente que se transportan por el valle, a pesar de que los diseños corresponden a periodos de retorno diferentes.

Tabla 1.- Comparación entre los cauces del Realineamiento No. 2 y No.3 (actuales) y el Realineamiento No.

4

Arroyo	Longitud (m)	Sección Típica	Velocidad Media Máx. Tr: 2.33 (m/s)	Velocidad Media Mín. Tr: 2.33 (m/s)	Pendiente Media Longitudinal (m/m)
Realineamiento No. 4*	8990.1	Cauce Principal: Sección Trapezoidal, Base menor 25m, Base Mayor 28m, Talud 1:1, Altura 1.5m Creciente Tr: 50 años: Sección Trapezoidal, Base menor 80m, Base Mayor 88m, Talud 2:1, Altura 2.0m	1.13	0.11	0.00133537
Realineamiento Existente **	7379.38	Cauce Principal: Sección Trapezoidal, Base menor 25m, Base Mayor 28m, Talud 1:1, Altura 1.5m Creciente Tr: 50 años: Sección Trapezoidal, Base menor 80m, Base Mayor 88m, Talud 2:1, Altura 2.0m	2.00	0.41	0.001754286
* Información medida sobre planos de diseño y modelos hidráulicos de ECI					
** Información extraída del estudio "Desviación Arroyo San Antonio Final" Canal #2 DRUMMOND					

DISEÑO HIDRÁULICO DEL CANAL DE REALINEAMIENTO.

La geología regional del valle del río Cesar en el área de influencia del proyecto muestra que superficialmente se encuentra una llanura aluvial con una sucesión de terrazas producto de los procesos aluviales desarrollados durante el cuaternario. En general las capas superiores del suelo están conformadas por arenas finas limosas o limos arenosos con cierta plasticidad, materiales que poseen ángulos de reposo alrededor de 30° y con la posibilidad de que este valor aumente considerablemente en tanto aumenta el contenido de material arcilloso. Con base en las observaciones de campo se ha determinado que, para garantizar la estabilidad de los taludes del canal, en ausencia de flujo, los taludes laterales para la sección hasta el caudal dominante pueden adoptarse entre 2:1 con un ángulo de $25,56^\circ$ y 3:1 con un ángulo de $18,43^\circ$, valores menores al ángulo de reposo del material y asumiendo una condición desfavorable de no existencia de cobertura vegetal.

El material que conforma las orillas y que transporta el arroyo San Antonio, tal como se observó durante una de las visitas técnicas realizadas a la zona, tiene plasticidad y cohesión, condición que incrementa considerablemente el ángulo de reposo y la estabilidad del material de las orillas, que se refleja en taludes más verticales. Con base en estas consideraciones se amplían las posibilidades para utilizar ángulos de reposo del material, que con un buen margen de seguridad dan la posibilidad de usar taludes laterales en el cauce principal de aguas medias y para el caudal dominante de 1 a 1 o 0.75 a 1.

Teniendo en cuenta estas consideraciones y las condiciones temporales de la escorrentía, para el diseño de la sección transversal del realineamiento se planteó una sección compuesta, tal como correspondería a la sección transversal de un cauce natural. El canal principal (aguas medias y caudal dominante, caudal con periodo de retorno de 2.33 años) se ha proyectado con una sección trapezoidal y con taludes laterales 1:1, de manera que estos caudales sean transportados adecuadamente y

aseguren la estabilidad geotécnica de dicha sección. El canal de inundación con una sección más amplia, se diseña con taludes laterales de 2:1 para caudales con periodo de retorno de 50 años.

La pendiente longitudinal del eje del realineamiento debe asegurar la estabilidad del lecho y para ello es necesario conseguir velocidades y esfuerzos cortantes adecuados, consecuentes con el material existente, para evitar procesos de profundización del lecho del canal y erosión de las paredes del mismo. Igualmente, en lo posible es necesario disminuir los costos generados por los movimientos de tierra durante la etapa de construcción. Los análisis realizados relacionados con el equilibrio dinámico del sistema sugieren una pendiente media de 0.00105 m/m. Para la definición de la pendiente media resultó básica la visita de campo, la evaluación de las características mecánicas y granulométricas del material de la zona y los análisis de las condiciones geomorfológicas existentes en el canal Paujil y en el Arroyo San Antonio en condiciones naturales y antrópicas, relacionadas con la longitud de los cauces y su sinuosidad.

Para ajustar los diseños del realineamiento a la cota inicial actual en la confluencia del canal Paujil y el arroyo San Antonio en la denominada cuenca alta y a la cota de la nueva entrega sobre el arroyo San Antonio aguas abajo de la zona de explotación minera, fue necesario plantear doce pequeñas estructuras, entre el K6+738.72 y K7+288.83. La ubicación de las mismas se ha planteado con la posibilidad de mejorar y optimizar los costos y los procesos de construcción. Igualmente es importante mencionar que estas estructuras a pesar de ser escalonadas no interfieren con el desarrollo y reproducción de la fauna existente en los arroyos, principalmente el blanquillo y bocachico, especies reportadas en la información disponible.

El perfil longitudinal del canal se estableció con base en las cotas de fondo del canal actual, al inicio y final del mismo, luego de la confluencia del Canal Paujil y El Arroyo San Antonio cuenca alta. De acuerdo con las características del material sobre el cual se debe construir el canal, se adoptó una velocidad alrededor de 0.6 m/s para el caudal con un periodo de retorno $T_r=2.33$ años, valor recomendado de acuerdo con el material disponible para el lecho del canal. También de acuerdo con estas características se estableció un coeficiente de rugosidad de Manning de 0.02, profundidades de la lámina de agua de entre 0.4 m y 1.3 m y taludes de 1:1. En el proceso de diseño para establecer la sección transversal adecuada se utilizaron los métodos de la velocidad permisible y de la fuerza tractiva implementados en HEC-RAS. De los análisis realizados se concluye que, para los parámetros adoptados, el esfuerzo cortante debe ser inferior a 15 Pa.

Para el caudal de 55.2 m³/s, correspondiente a un periodo de retorno de 2.33 años, las profundidades de la lámina de agua, para un talud 1:1, están entre 1 m y 1.5 m. Tal como se observa en la Figura 2, se obtuvo una sección máxima en la base de 16.7 m de ancho y 1.5 metros de altura con un acorazamiento del fondo con partículas de tamaño máximo 18.2 mm y en los taludes de 10 mm.

Con base en los cálculos anteriores, las condiciones naturales observadas y la necesidad de que el canal desarrolle su sinuosidad para las condiciones de caudal medio y dominante, se adoptó, para las condiciones correspondientes al caudal dominante, un canal trapezoidal de 25 m de ancho en la base y taludes laterales de 1:1, coincidente con las condiciones naturales del río en este sector y del canal de realineamiento anterior en la zona que se observó estable. Este ancho de la base, superior al obtenido para el caudal dominante, también asegura velocidades y esfuerzos cortantes menores cuando se transporta este caudal.

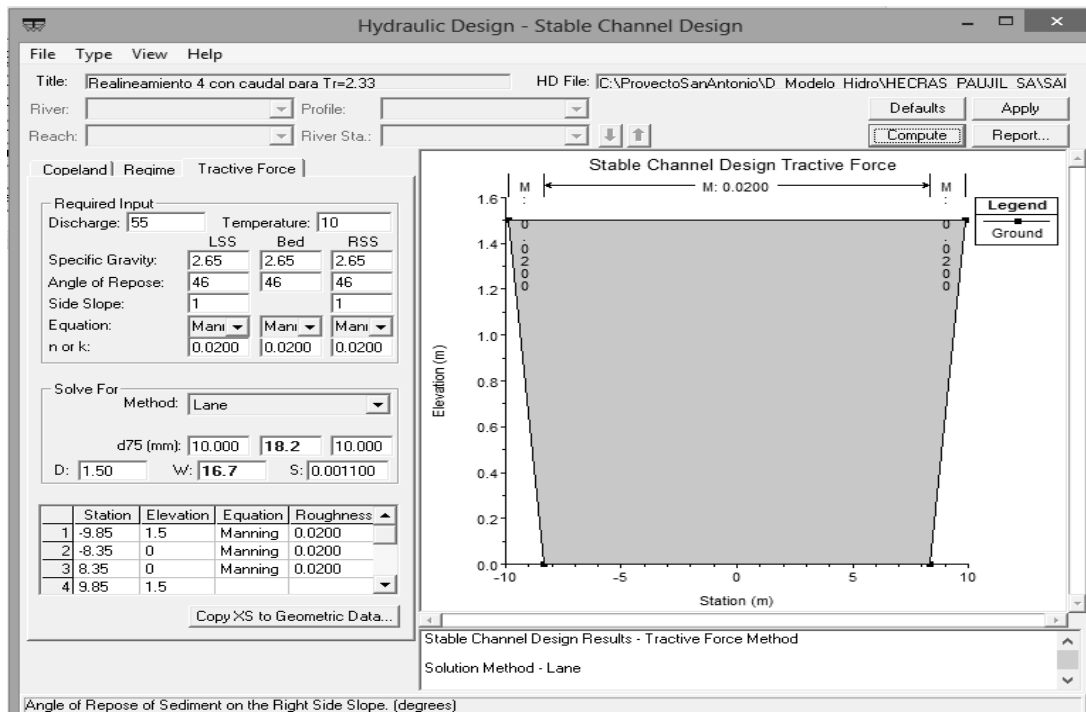


Figura 2.- Diseño de la sección transversal para el realineamiento del arroyo San Antonio. Caudal dominante.

Definida la sección para transportar caudales hasta con periodo de retorno 2.33 años, se evaluaron las condiciones para el transporte de los caudales superiores. Con base en las condiciones naturales existentes se planteó una sección trapezoidal compuesta, conformada por una sección trapezoidal inferior, de 25 m en la base, taludes de 1:1 y 1.5 m de alto y una sección trapezoidal superior de 80 m de base y 2 m de altura con taludes de 2:1, para asegurar esfuerzos cortantes compatibles con el material disponible y permitir la fácil revegetalización de la llanura de inundación. Esta sección para condiciones de flujo uniforme genera una profundidad de la lámina de agua de 2.16 m. Esta sección permite transportar de forma segura caudales con periodos de retorno inferiores o iguales a los 50 años. La sección se evaluó hasta para un caudal de 248 m³/s.

Establecida la sección compuesta se procedió a realizar una verificación de estas dimensiones utilizando la herramienta HEC-RAS. De acuerdo con lo anterior, para un coeficiente de rugosidad de 0.02, un caudal de 248 m³/s (periodo de retorno de 50 años), la herramienta calcula el ancho de la llanura de inundación a la altura de la superficie libre. En la Figura 3 se observa que para un ancho de la llanura de inundación de 70 m la superficie libre del agua alcanza una altura de 3.25 m quedando un borde libre de 0.25 m. Estas dimensiones tienen el inconveniente de transportar el flujo con una altura de la lámina de agua y unos esfuerzos cortantes relativamente altos, razón por la cual se adoptó como sección definitiva la planteada en la condición inicial. Al realizar la modelación con una lámina de agua similar a la propuesta se obtiene un ancho para la llanura de inundación similar al propuesto inicialmente, es decir 80 m.

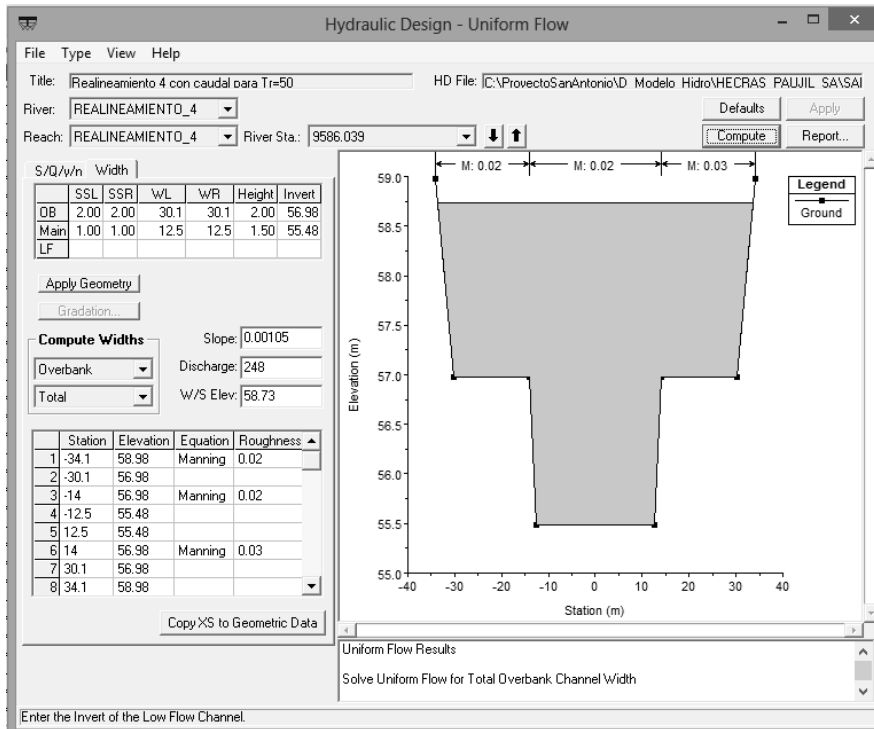


Figura 3.- Simulación hidráulica con Hec-Ras para el canal de realineamiento del arroyo San Antonio.

De acuerdo con las consideraciones y análisis realizados la sección establecida para el realineamiento del arroyo San Antonio, con el propósito de permitir la ampliación del frente minero hacia el sur, se presentan en la Figura 4. Se adoptó una sección trapezoidal compuesta cuya base es de 25 m, altura de 1.5 m y taludes 1:1 y una sección superior de 80 m de base y 2 m de altura con taludes de 2:1.

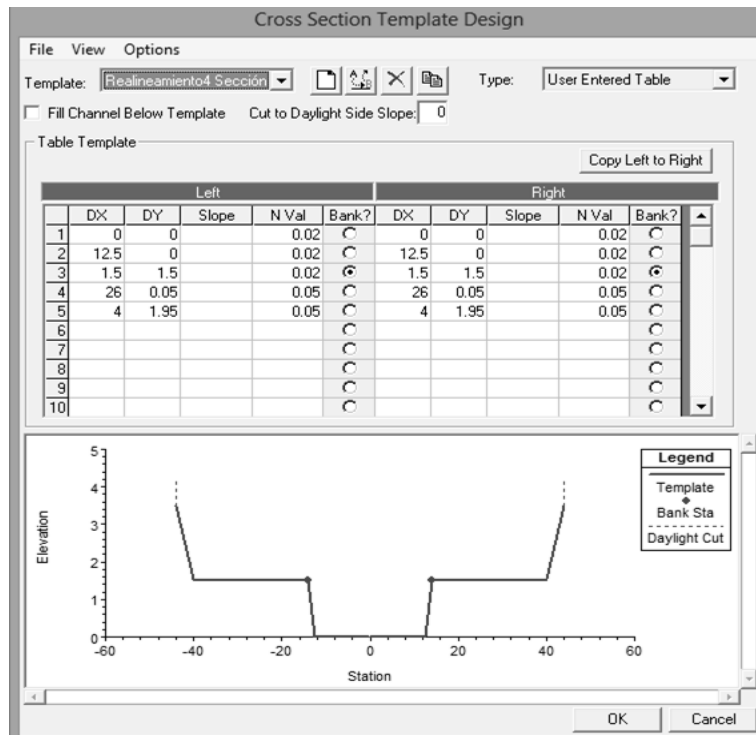


Figura 4. - Sección transversal compuesta adoptada para el realineamiento

Definida la sección, tal como se presenta en la figura 5, se procedió a su implantación sobre el alineamiento establecido por Drummond Ltd. a partir de la generación del modelo digital de terreno (MDT).

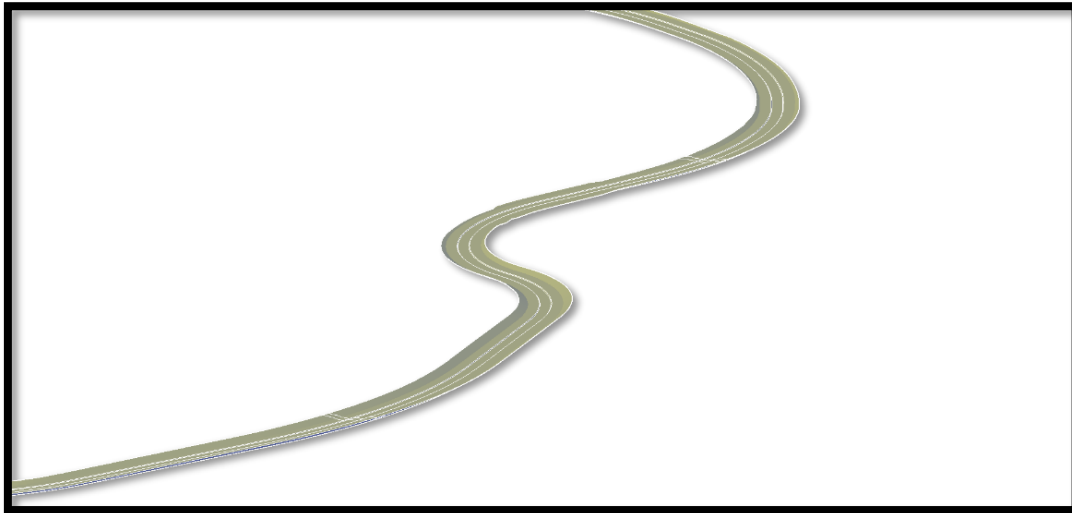


Figura 5.- Modelo general de Terreno para Análisis Topográfico y Modelación en Hec-Ras.

Para evaluar las condiciones hidráulicas del canal y verificar sus dimensiones se realizó la modelación en condiciones de flujo permanente para los caudales medio, dominante y máximo. Los resultados del perfil de flujo en todo el realineamiento se muestran en la Figura 6.

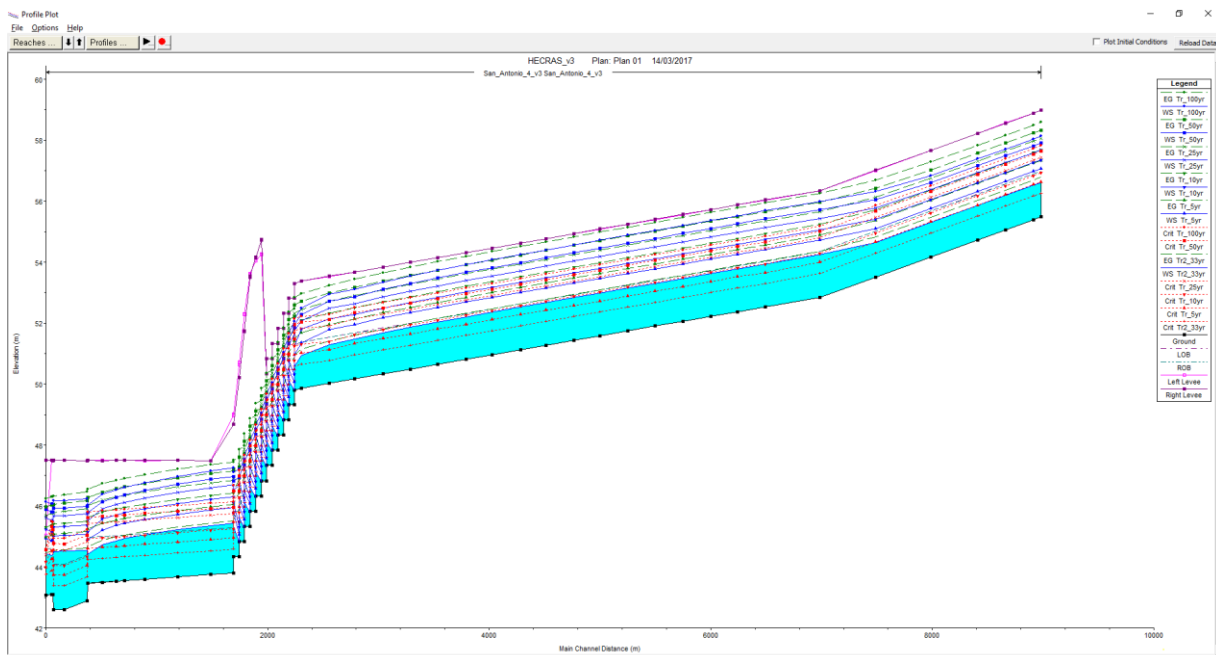


Figura 6.- Perfil del flujo en el realineamiento No.4 para condiciones de flujo uniforme.

Como consideración adicional de diseño del realineamiento se destacan los resultados de la velocidad promedio en cada sección transversal a lo largo del canal. Dicha valor no puede exceder los límites máximos de velocidad que puede soportar la partícula del material que compone los hombros y el fondo del canal. En la Figura 7 se presenta la velocidad promedio en cada sección transversal a lo largo del canal para un caudal de 2.33 años de periodo de retorno, caudal que corresponde al caudal dominante.

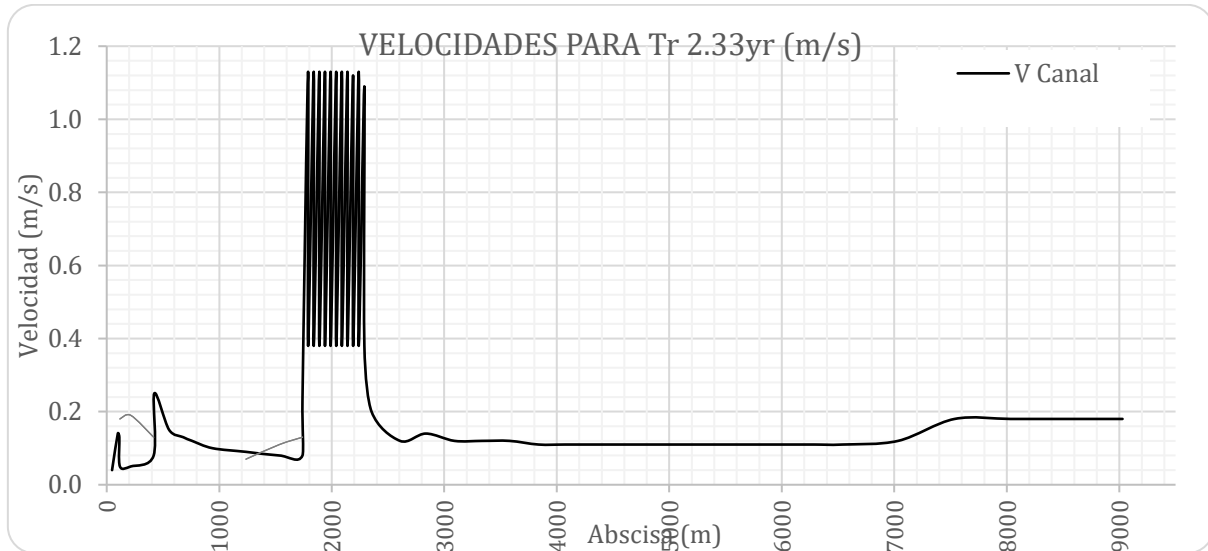


Figura 7.- Velocidades para el realineamiento. Caudal dominante.

Para el periodo de retorno de 2.33 años, la velocidad mínima en el canal es de 0.11 m/s y máximo de 1.13 m/s. En la zona del canal de realineamiento no se presentan flujos laterales por la zona de llanura de inundación.

Para el periodo de retorno de 50 años la velocidad mínima en el canal es de 0.15 m/s y máximo de 0.63 m/s. En la zona del canal de realineamiento se presentan flujos laterales hacia la zona de llanura de inundación con velocidades a la izquierda entre 0.50 y 0.88 m/s y a la derecha entre 0.57 y 0.88 m/s, tal como se muestra en la Figura 8.

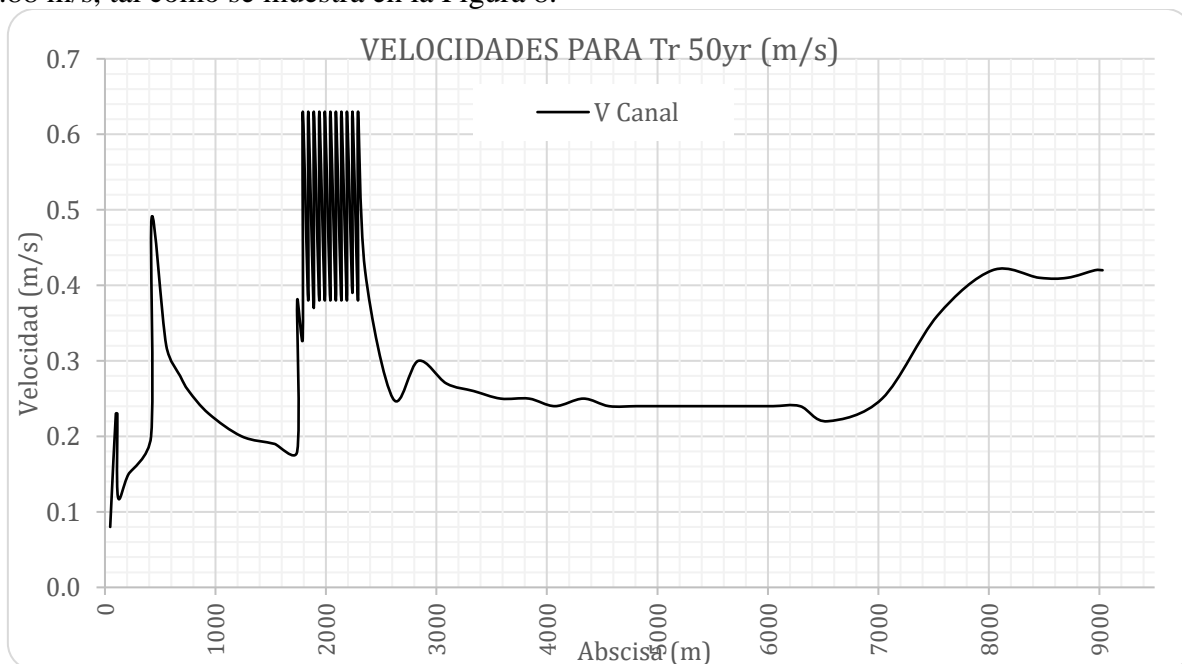


Figura 8.- Velocidades para el realineamiento. Caudal Tr= 50 años

Finalmente, en la Tabla 2 y en la Tabla 3 se resumen las variables hidráulicas más relevantes del diseño del alineamiento para algunas secciones transversales, tales como las secciones de inicio y final del cauce natural del San Antonio y del tramo final del canal Paujil.

Tabla 2.- Velocidades, esfuerzos cortantes y geometría del canal en la zona de la cuenca alta en diferentes puntos y para diferentes caudales, flujo uniforme.

River Sta	Profile	Q Total (m3/s)	Min Ch El (m)	W.S. Elev (m)	Crit W.S. (m)	E.G. Elev (m)	E.G. Slope (m/m)	Vel Chnl (m/s)	Flow Area (m2)	Top Width (m)	Froude # Chl	Shear LOB (N/m2)	Shear Chan (N/m2)	Shear ROB (N/m2)
379.2368	PF 1	2.45	56.04	56.33	56.33	56.38	0.006367	1.02	2.4	18.4	0.9		8.1	
	PF 2	37.4	56.04	56.9	56.9	57.22	0.004778	2.48	15.1	24.62	1.01		28.43	
	PF 3	156.8	56.04	58.54		58.88	0.001207	2.56	61.15	33.02	0.6		21.23	
240.7881	PF 1	2.45	53.62	55.75		55.76	0.000016	0.2	11.96	10.28	0.06		0.16	
	PF 2	37.4	53.62	56.84		56.94	0.000465	1.43	26.07	15.47	0.35		7	
	PF 3	156.8	53.62	58.21		58.69	0.001287	3.09	50.76	20.12	0.62		28.52	
136.8891	PF 1	2.45	54.34	55.75		55.76	0.000004	0.1	24.57	24.15	0.03		0.04	
	PF 2	37.4	54.34	56.88		56.9	0.000086	0.69	54.55	29.28	0.16		1.52	
	PF 3	156.8	54.34	58.42		58.53	0.000225	1.52	103.25	33.72	0.28		6.36	

Tabla 3.- Velocidades, esfuerzos cortantes y geometría en el canal Paujil en diferentes puntos y para diferentes caudales. Flujo uniforme.

River Sta	Profile	Q Total (m3/s)	Min Ch El (m)	W.S. Elev (m)	Crit W.S. (m)	E.G. Elev (m)	E.G. Slope (m/m)	Vel Chnl (m/s)	Flow Area (m2)	Top Width (m)	Froude # Chl	Shear LOB (N/m2)	Shear Chan (N/m2)	Shear ROB (N/m2)
3046.975	PF 1	1.22	58.95	59.39		59.41	0.000679	0.62	1.98	5.97	0.34		2.16	
	PF 2	7.6	58.95	60.13		60.18	0.000526	0.95	8.04	10.37	0.34		3.86	
	PF 3	36.3	58.95	61.25		61.38	0.000664	1.55	23.45	17.05	0.42		8.58	
2896.656	PF 1	1.22	58.39	59	59	59.15	0.007499	1.75	0.7	2.28	1.01		18.96	
	PF 2	7.6	58.39	59.67	59.67	59.97	0.005783	2.41	3.15	5.45	1.01		28.63	
	PF 3	36.3	58.39	60.65	60.65	61.13	0.004451	3.08	11.78	12.21	1		38.73	
2737.055	PF 1	1.22	57.98	58.86		58.87	0.000075	0.28	4.31	7.92	0.12		0.39	
	PF 2	7.6	57.98	59.44		59.47	0.000307	0.77	9.81	11.3	0.27		2.5	
	PF 3	36.3	57.98	60.41		60.53	0.000657	1.53	23.71	17.36	0.42		8.41	
2694.38	PF 1	1.22	58.25	58.8	58.7	58.85	0.002213	0.98	1.25	4.52	0.59		5.81	
	PF 2	7.6	58.25	59.18	59.18	59.42	0.005463	2.16	3.53	7.67	1.01		23.86	
	PF 3	36.3	58.25	59.98	59.98	60.44	0.004389	3	12.09	13.55	1.01		37.14	
2596.773	PF 1	1.22	58.17	58.4	58.4	58.47	0.008396	1.17	1.05	8.11	1.04		10.57	
	PF 2	7.6	58.17	58.88		58.96	0.001779	1.3	5.87	12.02	0.59		8.4	
	PF 3	36.3	58.17	59.89		60.03	0.000962	1.63	22.23	20.13	0.5		10.19	
2442.955	PF 1	1.22	57.72	58.12		58.13	0.000701	0.58	2.12	7.19	0.34		1.98	
	PF 2	7.6	57.72	58.74		58.79	0.000693	1.02	7.44	10.37	0.39		4.65	
	PF 3	36.3	57.72	59.76		59.88	0.000861	1.55	23.49	21	0.47		9.13	
430.9671	PF 1	1.22	55.84	56.38	56.22	56.4	0.001078	0.71	1.72	5.96	0.42		2.99	
	PF 2	7.6	55.84	56.96		57.04	0.001128	1.23	6.16	9.3	0.48		6.97	
	PF 3	36.3	55.84	58.53		58.62	0.000474	1.29	28.12	20.36	0.35		6	
181.3325	PF 1	1.22	55.48	55.74	55.74	55.84	0.007011	1.36	0.89	4.7	1		12.79	
	PF 2	7.6	55.48	56.88		56.9	0.000261	0.72	10.62	12.01	0.24		2.13	
	PF 3	36.3	55.48	58.51		58.54	0.000151	0.81	46.28	35.43	0.21	0.3	2.24	0.27



CONCLUSIONES

1. De acuerdo con las investigaciones realizadas, el eje del canal definitivo propuesto por Drummond Ltd. es factible desde el punto de vista geomorfológico y de la dinámica fluvial.
2. La zona proyectada para la construcción del realineamiento en general corresponde a la de la cuenca del arroyo antes de la explotación minera; la pendiente media del lecho es muy similar a la que tenía el Arroyo antes de la intervención, con lo cual la longitud de su trazado resulta adecuada.
3. Los análisis realizados han permitido definir para la sección transversal del canal de realineamiento una sección compuesta muy similar a la del canal natural, es decir, una sección correspondiente al caudal dominante y una sección para la llanura de inundación de tal manera que sea posible amortiguar considerablemente las crecientes del Arroyo. El ancho proyectado para la llanura de inundación es suficientemente generoso y las dimensiones finales deberán ajustarse y definirse en la etapa de diseño.
4. Teniendo en cuenta que el lecho se construirá sobre un relleno conformado por material que se excavó durante la explotación minera y con el fin de controlar los procesos sobre el cauce derivados de su dinámica principalmente en aguas medias y bajas (cambio en la sinuosidad, trenzamientos, deposición, acreción y erosión de las orillas) se han previsto obras de control a lo largo del cauce que son de muy bajo costo y que se pueden mantener fácilmente ya que se han proyectado utilizando materiales disponibles en la zona.
5. Es necesario revisar y analizar, ya que no está dentro del alcance de la presente investigación, el comportamiento de las aguas subterráneas presentes en la zona y cuál es su influencia en los rellenos proyectados y en la estabilidad del canal.
6. Para asegurar la estabilidad e impermeabilidad del canal proyectado es muy conveniente, desde ya, en la etapa de los diseños definitivos, tener en cuenta las recomendaciones geotécnicas generales indicadas en la presente investigación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Hurtado, M., A.** (2009). “Estimación de los campos mensuales históricos de precipitación en el territorio colombiano”. Tesis de Maestría, Maestría en Ingeniería. Universidad Nacional de Colombia, Medellín.
- Corpocesar** (2009). “Informe de línea Base – Implementación Decreto 155 de 2004”, periodo 2008 – 2009.
- Universidad Nacional de Colombia sede Medellín (UNAL).** (2003). “Manual de usuario de HidroSIG - Versión 3.0 Beta”. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas, Escuela de Geociencias y Medio Ambiente. Medellín. 109p.
- Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito** (2012). “Informe de consultoría para la evaluación de estudios hidrológicos e hidráulicos en las cuencas en estado natural que conforman el área minera del centro del Cesar. caudales máximos y mínimos”. Bogotá D.C.
- Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito** (2013). “Informe de consultoría para la evaluación hidrológica de caudales máximos en estado antrópico de la cuenca arroyo las ánimas en el departamento del Cesar”. Bogotá.
- US Army Corps of Engineers** (2009). HEC-DSSVue HEC Data Storage System Visual Utility Engine, User’s Manual. USA.



- US Army Corps of Engineers.** (2010). HEC-GeoHMS, “Geospatial Hydrologic Modeling Extension”, User’s Manual. USA.
- US Army Corps of Engineers.** (2010). HEC-GeoRAS GIS, “Tools for Support of HEC-RAS using ArcGIS 10”, User’s Manual. USA.
- US Army Corps of Engineers.** (2010). HEC-GeoRAS GIS, “Tools for Support of HEC-RAS using ArcGIS 10”, User’s Manual. USA.
- US Army Corps of Engineers.** (2008). “Hydrologic Modeling System HEC-HMS, Applications Guide”. USA.
- US Army Corps of Engineers.** (2010). “Hydrologic Modeling System HEC-HMS”, Quick Start Guide. USA.
- US Army Corps of Engineers.** (2000). “Hydrologic Modeling System HEC-HMS”, Technical Reference Manual. USA.
- US Army Corps of Engineers.** (2010). “Hydrologic Modeling System HEC-HMS”, User’s Manual. USA.
- US Army Corps of Engineers.** (2010). “River Analysis System HEC-RAS”, Applications Guide. USA.
- US Army Corps of Engineers.** (2010). “River Analysis System HEC-RAS”, Hydraulic Reference Manual. USA.
- US Army Corps of Engineers.** (2010). “River Analysis System HEC-RAS”, Hydraulic Reference Manual. USA.
- US Army Corps of Engineers.** (2010). “River Analysis System HEC-RAS”, Release Notes. USA.
- US Army Corps of Engineers.** (2010). “River Analysis System HEC-RAS”, User’s Manual. USA.