

Tabla 11. Parámetros Geotécnicos Sector la Alcaravanes

PROF (m)	CAPA	ESPESOR (m)	$\gamma_h$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_{sat}$ (kN/m <sup>3</sup> )	Cohesión Cu (kPa)	Ángulo Fricción ( $\phi$ )	Clasif. USCS
0,0-2,5	Capa de Lleno con orgánico	2,5	15,0	16,0	20	10	MH
2,5-4,0	Limo arcillo-arenoso color pardo	1,5	16,0	17,0	30	12	ML
4,0-4,5	Arena limo, con abundante mica, color gris	0,5	14,0	15,0	12	5	ML
4,5-6,0	Arena limosa, color gris clara, con micas	1,5	16,0	17,0	5	34	SM
6,0-8,0	Arena limosa, gris, con algunos fragmentos	2,0	18,0	19,0	10	36	SM

## 5 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Los cauces aluviales son susceptibles a erosionarse cuando los esfuerzos cortantes que genera el flujo superan los esfuerzos resistivos del material del lecho y las bancas del canal, lo que conlleva a la modificación de la sección y de la dinámica de la corriente. El lecho y las orillas del canal pueden presentar agradación por sedimentación ó regresión (Foto 5) por arrastre de partículas (erosión); estos cambios de las secciones del río son influenciados por las variables hidrológicas que gobiernan la cuenca y, a su vez, se reflejan en las variables hidráulicas (velocidad, esfuerzos) del flujo y del transporte de material.

La sinuosidad de un canal en toda su historia puede variar según se modifiquen las tasas de erosión y sedimentación. En la naturaleza difícilmente se encuentran cauces con alineamiento recto, ya que el canal en sus procesos de erosión y sedimentación busca un equilibrio dinámico que se refleja en los patrones de alineamiento sinuoso (debido a que el cauce busca disipar la energía del flujo en su recorrido por el valle) y de allí, la formación de meandros. De acuerdo con esto hay un gran interés por conocer las tendencias de movilidad de cauces sinuosos que definen su alineamiento en el tiempo analizando las variables que tienen mayor influencia y las causas particulares de formación de meandros. Para esto, se hace necesario conocer cómo se modifica la dinámica del flujo en condiciones particulares debido a las acciones antrópicas (reducción de la capacidad hidráulica del canal) ó a cambios en el nivel base.



Foto 5. Procesos de agradación y degradación del cauce de la quebrada la Marinilla sector Simona Duque (izquierda) y sector La Ramada (derecha).

## 6 PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN

### 6.1 TOPOGRAFÍA

En el proyecto “Ajustes Y Actualizaciones a los Estudios y Diseños para el Control de las Inundaciones de la Quebrada La Marinilla en Jurisdicción de los Municipios de Marinilla y El Santuario – Antioquia”, la Universidad de Antioquia contrató una comisión topográfica para realizar el levantamiento de la quebrada. Entre los componentes principales de tal actividad estaba el levantamiento de secciones transversales cada 30m (extendidas hacia las márgenes unos 200m) y la geometría de puentes existentes sobre el cauce.

Con esta información se ingresó al modelo Hec Ras la geometría de los tramos de estudio (La Ramada, Simona Duque y Alcaravanes) y se interpolaron las secciones transversales cada 2m con el objetivo de tener una topografía en detalle del lecho y las márgenes del canal.

La Figura 12 a Figura 14 presentan la geometría en planta de los tramos del canal modelados en Hec Ras. La línea azul oscura en la figura representa el eje del canal y las líneas azules más claras indican las secciones transversales.

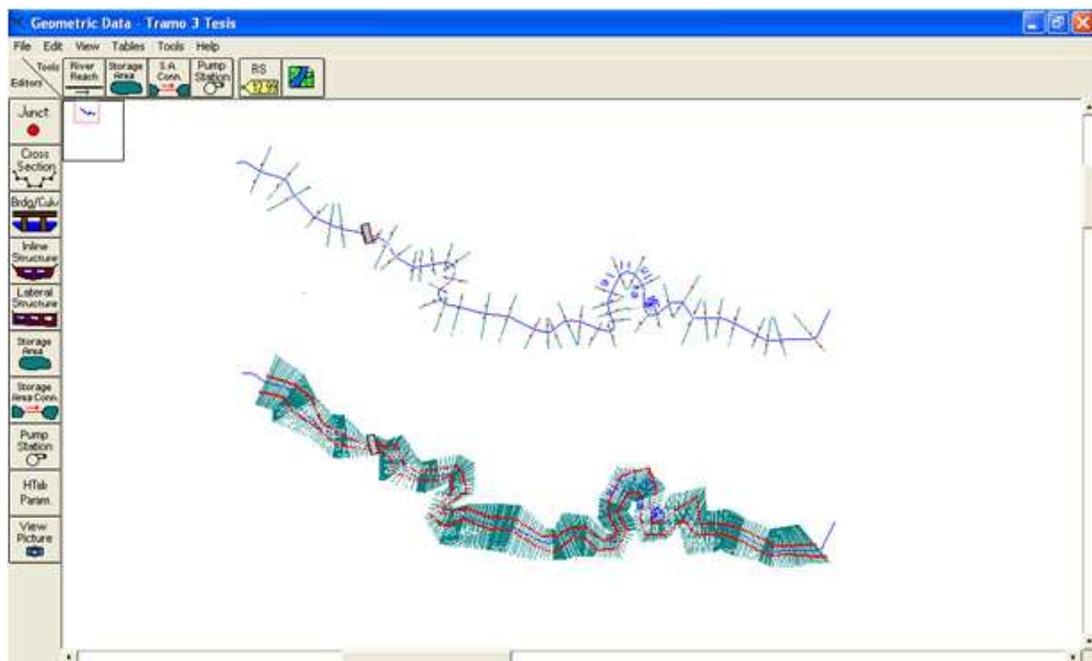


Figura 12. Esquema en planta geometría tramo La Ramada. Topografía original (parte superior) e interpolada cada 2m (parte inferior).

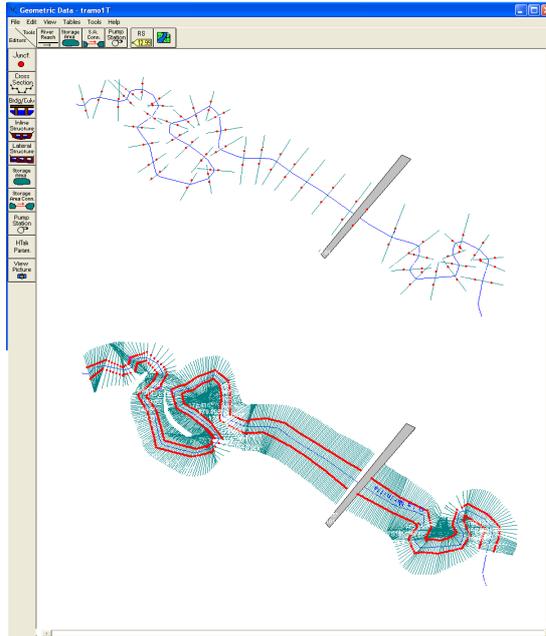


Figura 13. Esquema en planta geometría tramo Simona Duque. Topografía original (parte superior) e interpolada cada 2m (parte inferior).

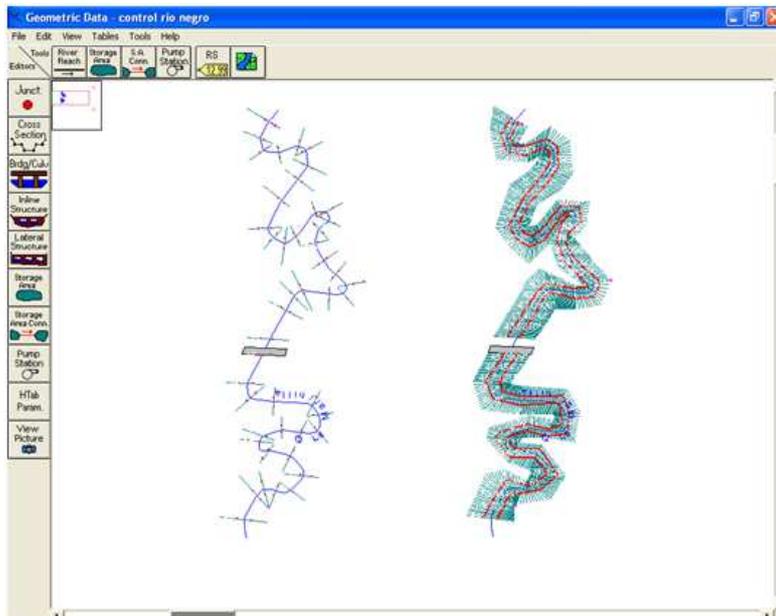


Figura 14. Esquema en planta geometría tramo Alcaravanes. Topografía original (izquierda) e interpolada cada 2m (derecha)

## 6.2 HIDROLOGÍA E HIDRÁULICA

Para la simulación geomorfológica del cauce en cada uno de los tramos de estudio se transita el flujo en régimen no permanente mediante el uso de datos de caudal medio diario (Figura 15) registrados en la estación limnigráfica Puente La Feria con código 23087660 y localizada en las coordenadas 853014 Este, 1174217 Norte. Con estos pares de valores se simuló el embalse y desembalse del flujo durante 17 años para analizar los cambios morfológicos sobre el canal.

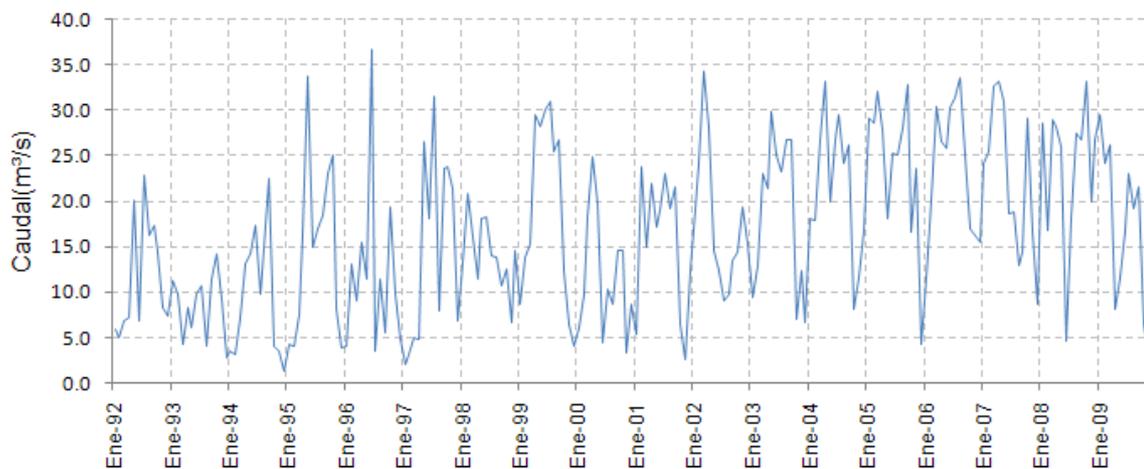


Figura 15. Variación del caudal en el tiempo, estación puente La Feria.

En el sector Alcaravanes se modeló el escenario T3E2 en el que incluyen las fluctuaciones del nivel del río Negro, para esto se simuló la confluencia de esta corriente con la quebrada La Marinilla en el modelo Hec Ras transitando una serie de caudales máximos diarios registrados en la estación Puente Real (código 2308715) localizada a 7km aguas arriba de dicha confluencia. Estos datos de caudal se corrigieron para obtener su magnitud en el sitio de la confluencia a través de la metodología de rendimiento hidrológico que se describe a continuación:

Para cuencas sobre un mismo cauce y que sean hidrológicamente similares se cumple la siguiente expresión:

$$\frac{Q_1}{A_1} = \frac{Q_2}{A_2}$$

Donde A1 es el área de la cuenca del río Negro hasta antes de la confluencia con La Marinilla y A2 es el área de la cuenca hasta la estación Puente Real. Q2 es el caudal registrado en dicha estación y Q1 es el caudal que se quiere estimar. En la Figura 16 se presenta la serie de caudales máximos obtenidos en el río Negro en el sitio de la confluencia de la quebrada La Marinilla.

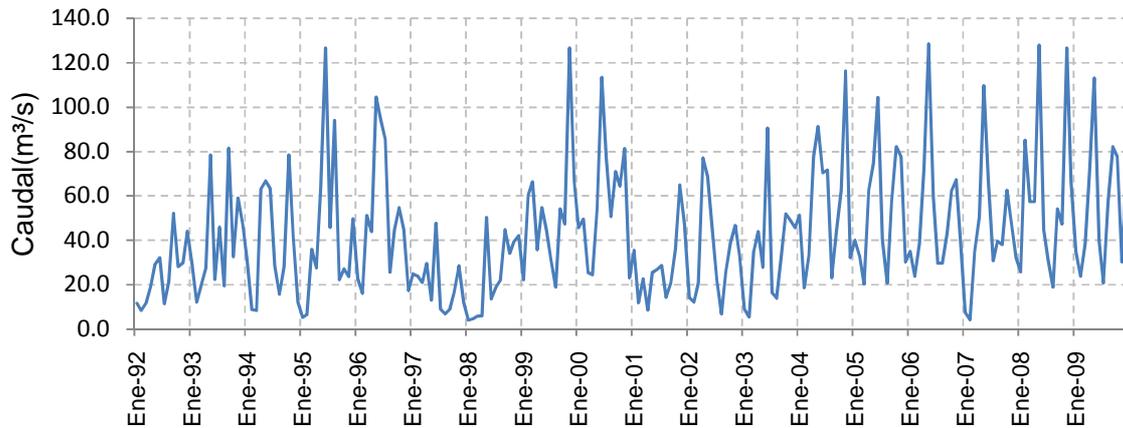


Figura 16. Variación del caudal en el tiempo, estación puente Real.

Finalmente estos datos de nivel obtenidos en el canal de la quebrada se utilizaron como condiciones de frontera en la simulación del escenario T3E2.

En la Figura 17 - Figura 19 se presentan los niveles del flujo (obtenidos mediante el modelo Hec Ras) en cada uno de los tramos estudiados. Estos niveles se utilizaron como condiciones de frontera en el modelo CCHE2D en cada una de las simulaciones.

En la Figura 19 se aprecia el incremento de la lámina de agua (línea azul) a partir del punto B (Puente Alcaravanes), esto se debe al control que ejerce el nivel base; en este caso el río Negro que durante las avenidas ocasiona el remanso del flujo en la quebrada La Marinilla que incluso amortiguándose en su llanura de inundación, es claro el incremento progresivo del nivel del flujo aguas arriba de la confluencia.

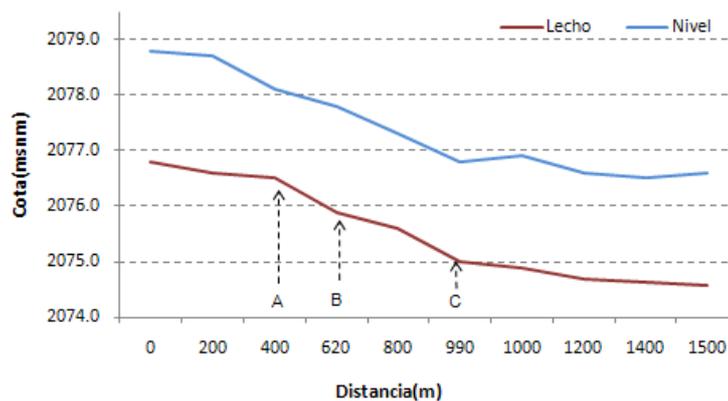


Figura 17. Nivel del flujo obtenido en Hec Ras tramo La Ramada

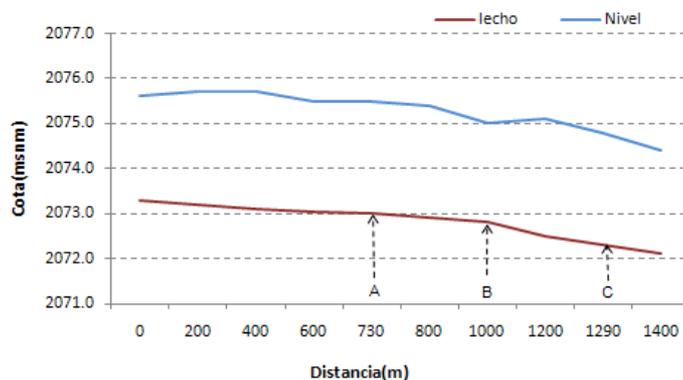


Figura 18. Nivel del flujo obtenido en Hec Ras tramo Simona Duque

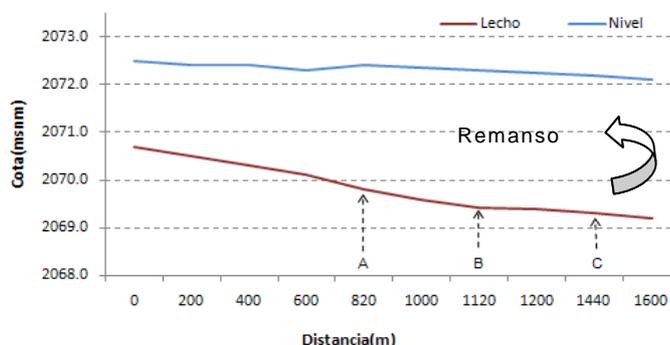


Figura 19. Nivel del flujo obtenido en Hec Ras tramo Alcaravanes.

### 6.3 ANALISIS DE IMAGENES Y CARTOGRAFÍA

Para determinar la evolución del cauce de la quebrada La Marinilla en los tramos de estudio se utilizó cartografía, fotografías aéreas y topografía de los años 1971, 1992 y 2009 respectivamente. Esta información se adquirió en la planoteca de la gobernación de Antioquia, del centro de documentación de CORNARE y del levantamiento topográfico realizado en el estudio "Ajustes Y Actualizaciones a los Estudios y Diseños para el Control de las Inundaciones de la Quebrada La Marinilla en Jurisdicción de los Municipios de Marinilla y El Santuario – Antioquia". A continuación (Tabla 12) se presenta una descripción de esta información.

Tabla 12. Cartografía utilizada para el análisis histórico de la evolución del cauce.

Cartografía	1971	1992	2009
Fuente	Fotogrametría aérea Colombiana S.A	CORNARE	CORNARE
Descripción	Plano Aerofotogramétrico Planchas 1 y 5	Foto Aérea (fal-285, f-17n, 171)	Levantamiento Topográfico
Escala	1:2000	1:10.000	1:1000

Con la información antes citada se georeferenciaron tres puntos comunes de las imágenes (años 1971 y 1992) en el software Arc Gis 9.2, definiendo una nueva escala de trabajo (Esc1:1000) para luego ser superpuestas al cauce de la quebrada levantado topográficamente en el año 2009 y cuya superposición permitiera analizar los cambios en el alineamiento en planta de los tramos La Ramada, Simona Duque y Alcaravanes.

#### 6.4 CAMPAÑAS DE AFORO

Se ejecutaron en total 12 aforos líquidos (Tabla 13) y sólidos, 4 en cada uno de los tramos analizados. Con 6 de los aforos se calibró el modelo CCHE2D (flujo y sedimentos) ajustando algunos parámetros hidráulicos y del sedimento medidos y simulados, para tener así veracidad de los resultados obtenidos. Con los 6 aforos restantes se validaron los resultados.

El estimativo de caudal líquido se obtuvo por el método área – velocidad que consiste en determinar, a partir de medidas de velocidad y geometría de la sección (Figura 20), el caudal de la corriente como el producto  $Q = \sum V_i A_i$  donde:

Q: Caudal [m<sup>3</sup>/s] ; V: Velocidad [m/s] ; A: Área [m<sup>2</sup>]

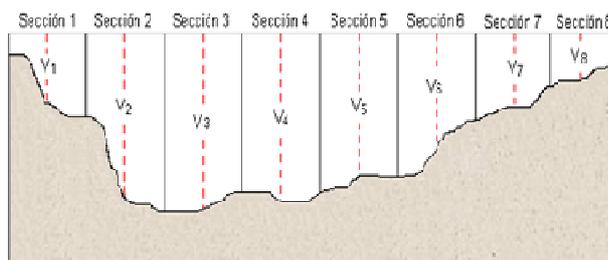


Figura 20. Esquema de la sección transversal para el cálculo de caudal, método área – velocidad.

Tabla 13. Magnitud de los caudales aforados

Sitio	Fecha	Hora	Q(m <sup>3</sup> /s)
La Ramada	13/04/2009	7:00am	7.26
La Ramada	13/04/2009	8:00am	7.39
La Ramada	21/05/2010	8:00am	2.27
La Ramada	20/08/2010	8:00am	2.50
Simona Duque	13/04/2009	9:00am	8.22
Simona Duque	13/04/2009	10:00am	8.15
Simona Duque	21/05/2010	9:00am	3.75
Simona Duque	20/08/2010	9:00am	2.80
Alcaravanes	13/04/2009	12:00pm	8.25
Alcaravanes	13/04/2009	1:00pm	8.31
Alcaravanes	21/05/2010	11:00am	4.24
Alcaravanes	20/08/2010	10:30am	4.50

Por otra parte a través de los aforos sólidos se recolectaron muestras de sedimento en suspensión y de fondo para determinar la granulometría del material y la concentración de las muestras en suspensión, parámetros requeridos para la simulación del transporte de sedimentos.

## 7 MODELACIÓN HIDRODINÁMICA

### 7.1 CONFORMACIÓN DE LA MALLA DE CÁLCULO

Las mallas de los tramos de estudio se generaron en el modelo CCHE2D Mesh Generator 3.0 a partir de una base de datos topográfica con extensión \*.mesh\_mcs (secciones transversales que conforman el dominio de estudio).

La malla numérica se puede generar a partir de ocho métodos (Tabla 14). Zhang y Jia (2005) recomiendan para ríos aluviales sinuosos el método de *RL con factores de Suavidad*. Además de este método, se evaluó también distintas configuraciones de malla con los métodos de *Malla Algebraica*. El modelo evalúa cuantitativamente la calidad de la malla a partir de los indicadores enumerados en la Tabla 15 y estas al generarse deben combinar tanto ortogonalidad (ADO y MDO pequeños) como suavidad (valores de MAR y AAR cercanos a 1).

Tabla 14. Métodos para generar la malla numérica de la simulación

Método
Algebraica
Algebraica Adaptable
RL con factores de contribución
RL con factores de suavidad
TTM con factores de contribución
TTM con factores de suavidad
Malla conforme de Laplace
Malla Variacional

Tabla 15. Indicadores para evaluar la calidad de la malla computacional

Indicadores	
Maximum Deviation Orthogonality	MDO
Averaged Deviation from Orthogonality	ADO
Maximum grid Aspect Ratio	MAR
Averaged grid Aspect Ratio	AAR

Los procedimientos acerca de la conformación de la malla de cálculo se pueden ver con más detalle en manual del usuario del modelo.

A continuación (Tabla 16 - Tabla 18) se presentan las mallas seleccionadas que mejor se ajustaron a los parámetros anteriores para conformar y representar la topografía y batimetría del dominio físico estudiado. Se encontró que para los 3 tramos analizados, la malla que mejor se ajusta a la geometría del canal es la obtenida por el método algebraico con tamaño de celdas 1 m x 1 m.

### 7.1.1 Tramo La Ramada

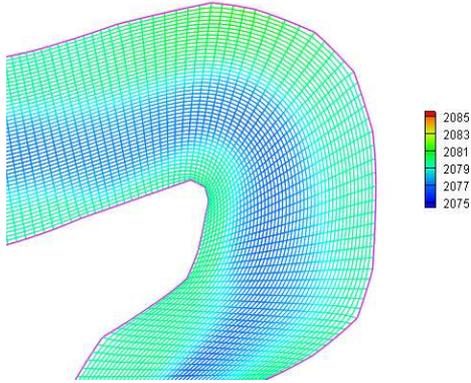


Tabla 16. Indicadores malla numérica tramo La Ramada

Indicador	Celdas 0.5 x 0.5m		Celdas 1 x 1m		Celdas 2 x 2m	
	ALG	RLFS	ALG	RLFS	ALG	RLFS
MDO	5.369	5.893	6.369	6.596	7.236	7.563
ADO	1.473	1.621	1.583	1.563	1.621	1.783
MAR	6.369	6.789	7.236	7.523	7.698	7.996
AAR	1.356	1.469	1.523	1.453	1.469	1.523

### 7.1.2 Tramo Simona Duque

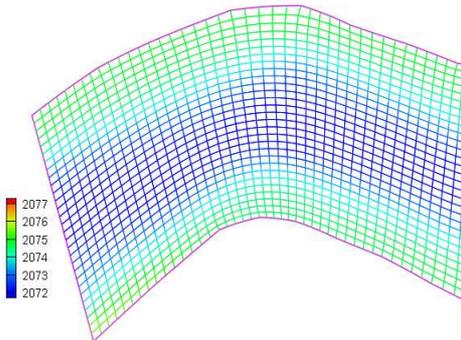


Tabla 17. Indicadores malla numérica tramo Simona Duque

Indicador	Celdas 0.5 x 0.5m		Celdas 1 x 1m		Celdas 2 x 2m	
	ALG	RLFS	ALG	RLFS	ALG	RLFS
MDO	8.221	8.256	8.366	8.455	8.691	8.810
ADO	1.392	1.426	1.553	1.583	1.693	1.783
MAR	7.965	7.996	8.263	8.369	8.563	8.622
AAR	1.523	1.553	1.588	1.596	1.603	1.623

### 7.1.3 Tramo Alcaravanes

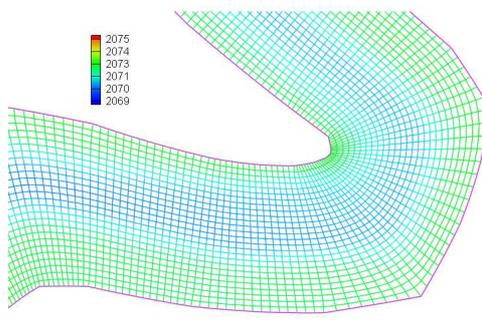


Tabla 18. Indicadores malla numérica tramo Alcaravanes

Indicador	Celdas 0.5 x 0.5m		Celdas 1 x 1m		Celdas 2 x 2m	
	ALG	RLFS	ALG	RLFS	ALG	RLFS
MDO	5.699	5.893	5.981	6.036	6.236	6.589
ADO	1.026	1.123	1.263	1.369	1.658	1.689
MAR	5.899	5.963	6.203	6.235	6.453	6.693
AAR	1.112	1.156	1.342	1.366	1.396	1.453

## 7.2 INTERPOLACIÓN DEL LECHO

Luego de conformada la malla de cálculo, el modelo CCHE2D permite realizar la interpolación del lecho a través de varios métodos (ver manual de usuario Zhang, 2005). Para este caso de estudio dicha interpolación se efectuó con el método por triangulación el cual proporcionó una geometría del lecho más suave y ajustada al levantamiento en campo. La Figura 21 muestra un segmento (en 3D) de la geometría del tramo Alcaravanes obtenido luego de la interpolación.

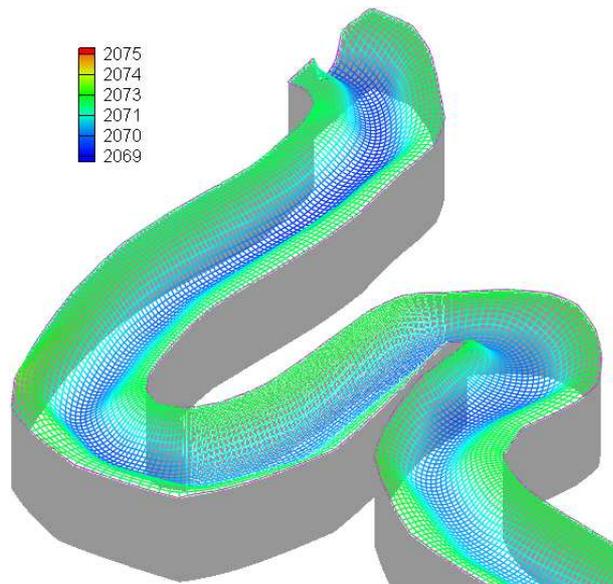


Figura 21. Esquema en 3D del lecho interpolado segmento tramo Alcaravanes

## 7.3 GENERACIÓN DE LA ESTRUCTURA DE LOS PUENTES

Con la interpolación del lecho realizada se efectúa la simulación de las estructuras de los puentes de forma indirecta a través de la opción que tiene el modelo CCHE2D de caracterizar nodos en la malla de cálculo interpolada como nodos “*No Erodables*” cuya función es que la acción del flujo sobre los mismos sea nula para posteriores resultados concernientes a la erosión del cauce. Se buscó que durante la simulación de la erosión del canal, el lecho y las bancas no tuvieran movilidad alguna en los sitios donde se simulen estructuras de puentes. En la Figura 22 se presenta la forma de definir esta característica en los nodos que conforman la malla.

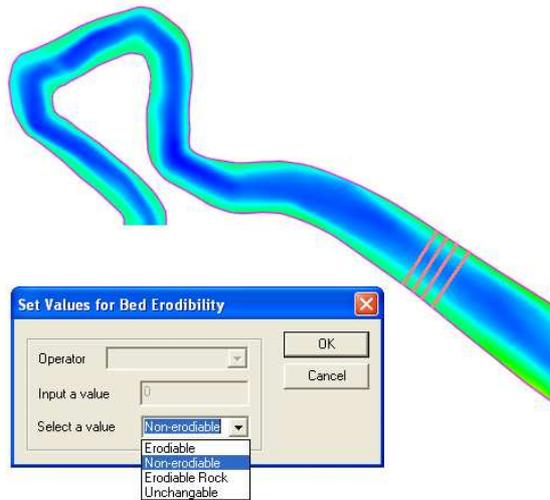


Figura 22. Caracterización de los nodos de la malla de cálculo como “no errodables”

## 7.4 CALIBRACIÓN DEL MODELO NUMÉRICO

### 7.4.1 Niveles de Flujo

Para tener confiabilidad en los resultados obtenidos en las simulaciones, se deben ajustar ciertas condiciones físicas del cauce al modelo numérico para representar bien los procesos que ocurren en el canal. En la Tabla 19 se presenta la magnitud de la rugosidad obtenida mediante el ajuste de los niveles alcanzados en las simulaciones con los niveles medidos en los aforos de dos campañas; se hará la elección del valor de la rugosidad de acuerdo al mejor ajuste.

Con estos resultados se definió para cada tramo de estudio una rugosidad del lecho igual a 0.025 y en las bancas un valor de  $n=0.035$  (La Ramada y Simona Duque) y  $n=0.038$  (Alcaravanes).

Tabla 19. Calibración del modelo CCHE2D

Sitio	Caudal (m <sup>3</sup> /s)	Nivel(m)		Error (%)	Rugosidad, n	
		medido	modelo		bancas	lecho
Campaña 2, Mayo de 2010						
La Ramada	2.27	0.75	0.78	4.00	0.035	0.025
Simona D.	3.75	0.92	0.90	2.17	0.035	0.025
Alcaravanes	4.24	0.95	0.97	2.10	0.038	0.025
Campaña 3, Agosto de 2010						
La Ramada	2.5	0.77	0.73	5.20	0.035	0.020
Simona D.	2.8	0.88	0.84	4.50	0.035	0.020
Alcaravanes	4.5	0.97	0.92	5.20	0.038	0.020

### 7.4.2 Concentración del Sedimento.

Se efectuaron muestreos de sedimento en suspensión para determinar la concentración del mismo. Con estos resultados se ajustó el módulo de sedimentos del modelo CCHE2D realizando la simulación con los modelos de Engelun y Hansen y Ackers y White. Se obtuvo un mejor contraste implementando el primer método ya que la concentración medida y modelada presentaba mayor similitud. En la Figura 23 - Figura 25 se identifica la calibración del modelo de sedimentos a través de la concentración obtenida en cada uno de los sitios analizados. Se aprecian en estas gráficas (línea naranja) la tendencia de la concentración del sedimento simulada en el modelo CCHE2D y los datos medidos y analizados en laboratorio, se observa un buen ajuste entre ambas magnitudes (medidas y simuladas) lo que determina una calibración aceptable para el modelo de sedimentos.

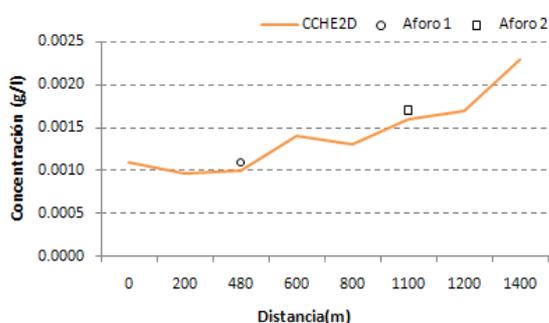


Figura 23. Calibración modelo CCH2D Concentración del sedimento, La Ramada

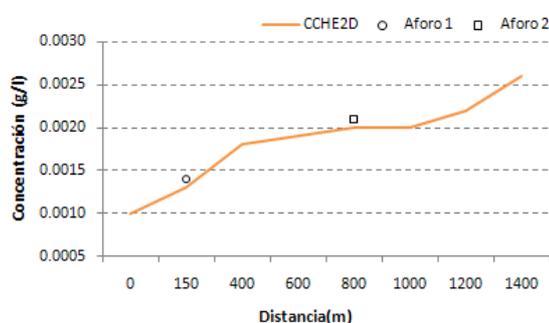


Figura 24. Calibración modelo CCH2D Concentración del sedimento, Simona Duque

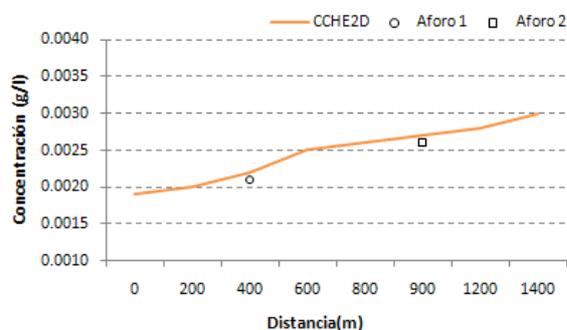


Figura 25. Calibración modelo CCH2D Concentración del sedimento, Alcaravanes

## 7.5 CAPACIDAD DE TRANSPORTE DE LA QUEBRADA

La Figura 26 presenta la capacidad de transporte total de sedimentos en cada uno de los tramos analizados de la quebrada La Marinilla estimada a través de los datos de los aforos realizados en la campaña 3 (agosto de 2010) y con diferentes modelos de transporte cuya descripción se encuentra detallada en el texto "Modelo para el Cálculo del Transporte de Sedimentos en Suspensión y de Fondo en Cauces Naturales (EPM, 1996)". Se aprecian

diferentes magnitudes en los resultados obtenidos con cada modelo, esto se debe a que cada uno de ellos utiliza diferentes parámetros del flujo y del sedimento y además están idealizados para utilizarse en corrientes con determinadas características. En la zona de estudio el cauce de la quebrada La Marinilla en particular presenta rasgos del flujo y del sedimento similar a los rangos de estas variables utilizadas en el modelo de Engelun y Hansen por lo que se adopta el valor arrojado por este modelo para la capacidad de transporte de sedimentos de la quebrada cuya magnitud está alrededor de 7 ton/día en el sector La Ramada y Alcaravanes y de 10 ton/día en Simona Duque.

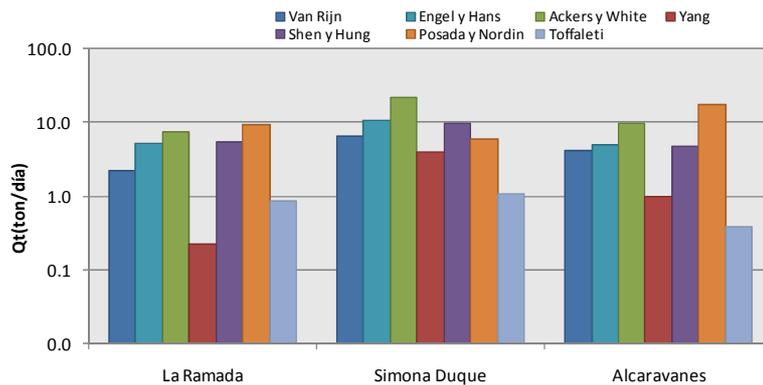


Figura 26. Modelos de transporte obtenidos con los datos registrados en los aforos líquidos y sólidos. La abscisa corresponde a la carga total de sedimentos.

## 7.6 PROCESOS MORFODINÁMICOS TRAMO LA RAMADA

### Evolución del Cauce

La acción del flujo moldea el canal debido a los procesos erosivos y/o de sedimentación. El lecho y las bancas del cauce evolucionan constantemente buscando un equilibrio en la dinámica del mismo. El esfuerzo cortante del flujo actúa sobre el lecho y paredes erosionando cuando las velocidades se incrementan ó por el contrario hay agradación por una reducción de la pendiente ó de la velocidad misma.

En la Figura 27 se presenta el resultado obtenido de la evolución del lecho para el escenario T1E2 y generado con el modelo CCHE2D. La línea azul indica la condición inicial del lecho y la roja identifica el perfil obtenido luego de la simulación. Se aprecia un contraste mayor en las abscisas 400 y 900; sectores aguas arriba del puente La Ramada donde el esfuerzo cortante del flujo (línea verde) se incrementa lo que se refleja en una mayor profundización del lecho. Es evidente la afectación del canal debido a la construcción del puente donde se observa un incremento de la sinuosidad (Figura 28) y donde el perfil del lecho también es modificado.

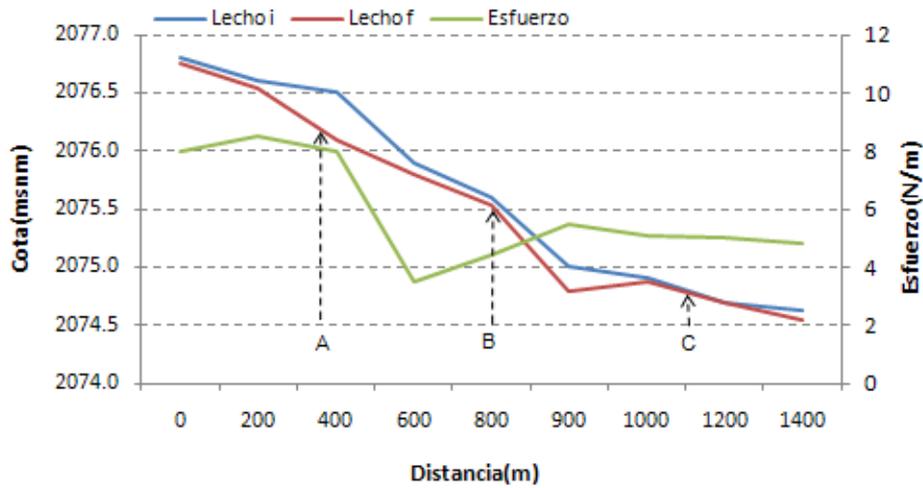


Figura 27. Perfil longitudinal del lecho y esfuerzo cortante del flujo escenario T1E2

De igual forma, se presenta en las Figura 31 - Figura 33 la evolución del canal en cada uno de los escenarios descritos anteriormente. En las gráficas, las líneas azules identifican el perfil inicial de la sección transversal, mientras que la línea negra indica el alineamiento final luego de la simulación. En general se aprecia una tendencia del cauce a desplazarse hacia la margen derecha cuando se tiene en cuenta la reducción de su capacidad hidráulica debido a la estructura del puente. De acuerdo con los resultados del modelo, el cauce experimenta una migración lateral con una tasa promedio de 0.50m/año.

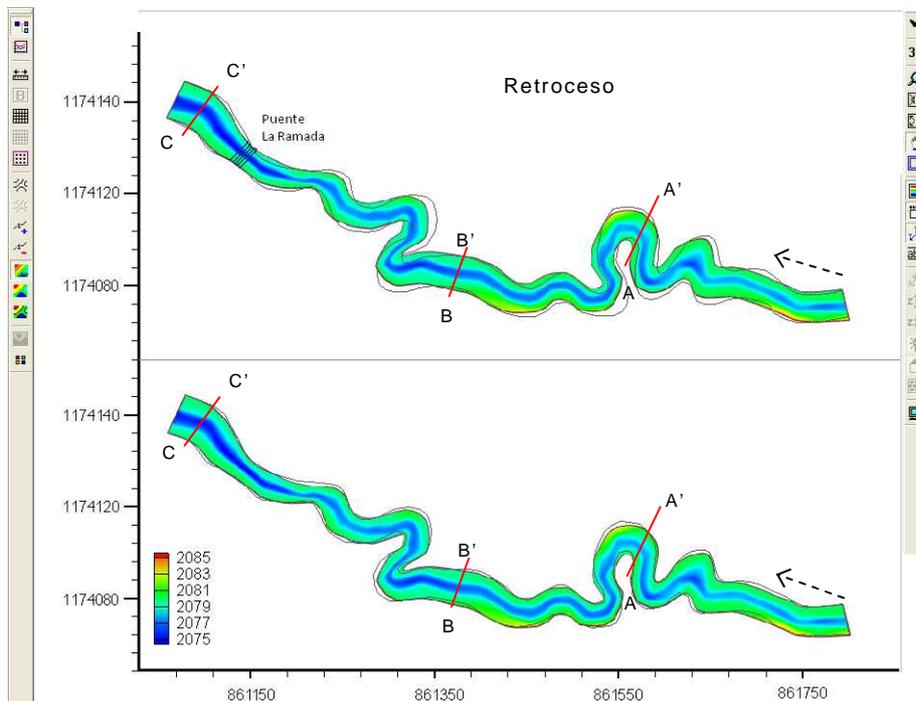


Figura 28. Evolución Morfológica del cauce sector La Ramada, escenario T1E1 (parte inferior) y escenario T1E2 (parte superior).

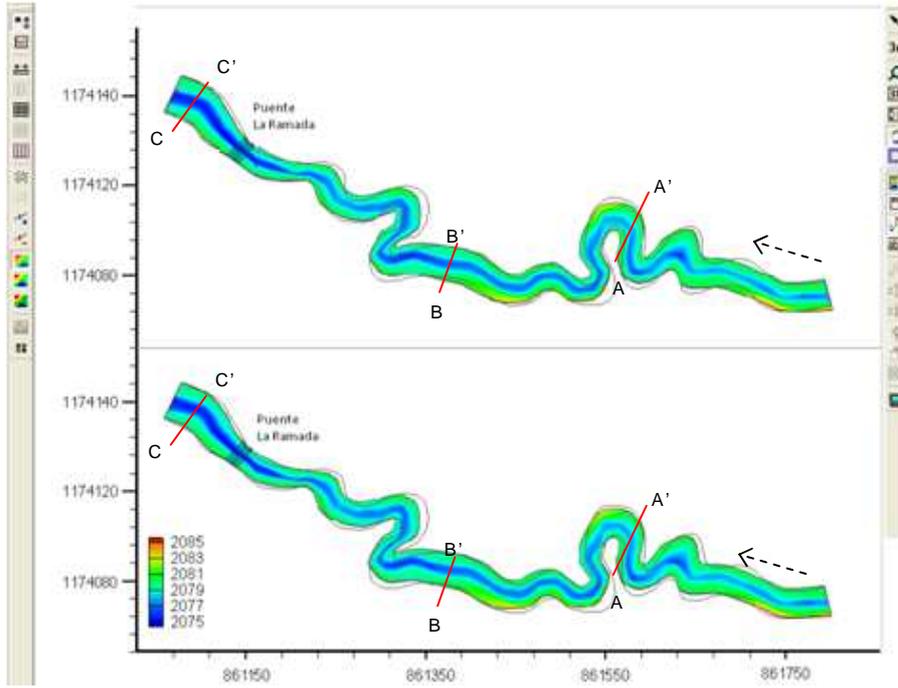


Figura 29. Evolución Morfológica del cauce sector La Ramada, escenario T1E2 (parte inferior) y escenario T1E2a (parte superior).

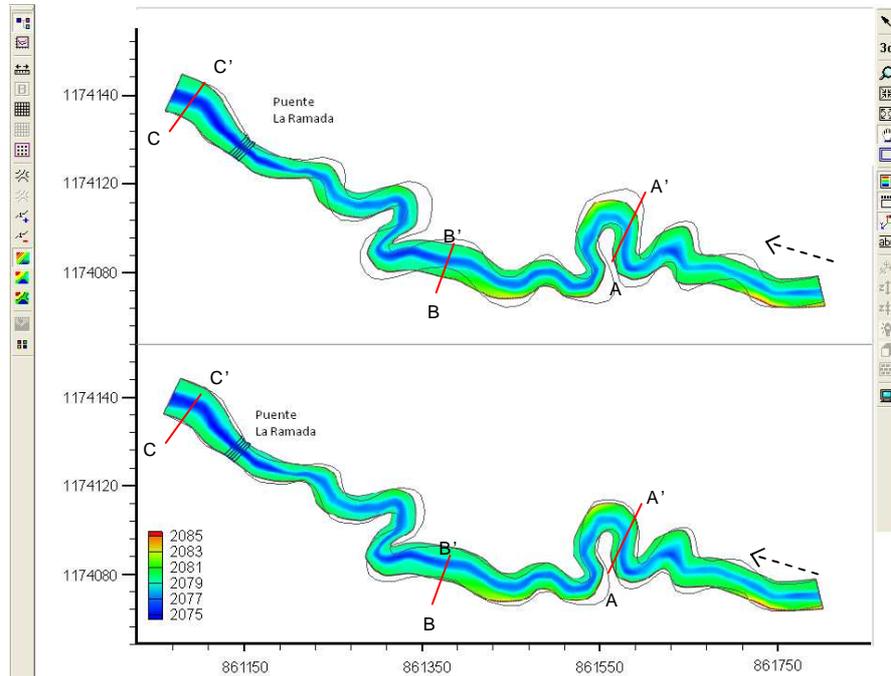


Figura 30. Evolución Morfológica del cauce sector La Ramada, escenario T1E2 (parte inferior) y escenario T1E2b (parte superior).