

**ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL**

**Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra**

**“COMPARACIÓN DE DIVERSAS METODOLOGÍAS  
PARA ESTIMACIÓN DE SOCAVACIÓN EN VARIOS  
PUENTES DE LA PROVINCIA DE ESMERALDAS”**

**TESIS DE GRADO**

Previa la obtención de Título de:

**INGENIERO CIVIL**

Presentada por:

**DOMINIQKA NATHALYE MORA DOMINGUEZ**

**LUIGGI MICHAEL NAVARRO CARVAJAL**

**GUAYAQUIL – ECUADOR**

**2015**

## **AGRADECIMIENTO**

A todos aquellos que colaboraron en la realización de este trabajo y en especial al Ph.D. MSc. Mijaíl Arias Hidalgo, Director de Tesis, por su ayuda y paciencia en el desarrollo de este documento.

## **DEDICATORIA**

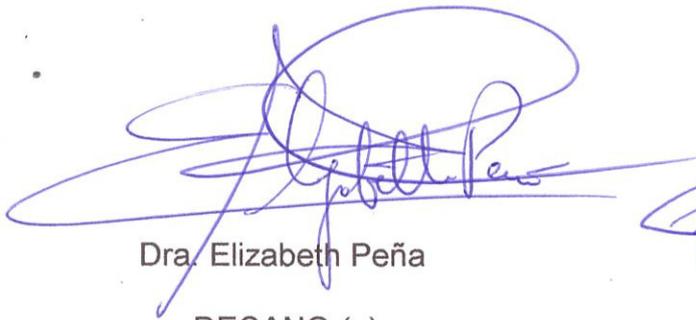
A Dios, Mi madre, Al amor de mi vida,  
Wilson, gracias por todo tu apoyo durante  
esta travesía, a mis hijos Wilson, Oridssa y  
Danna por ser siempre mi motor.

Dominiqka

A Dios, Mis Padres Gloria y Yorky, Las luces  
de mi vida Jennifer y Luciana, gracias por  
estar siempre conmigo, y ayudarme a  
mantenerme en la ruta del éxito. A mis  
maestros de Ciencias y de Espíritu.

Luigi

## TRIBUNAL DE GRADUACIÓN



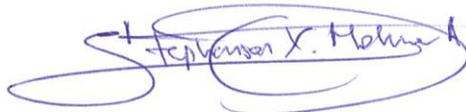
Dra. Elizabeth Peña

DECANO (e)



PhD. MSc. Mijail Arias

DIRECTOR DE TESIS



MSc. Xavier Molina

VOCAL PRINCIPAL

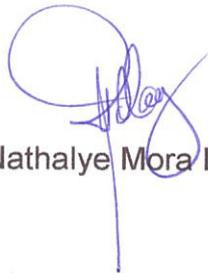


Ing. Guillermo Muñoz V.

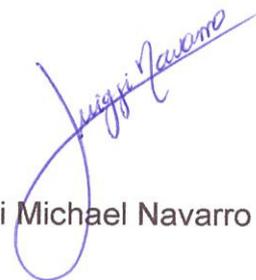
VOCAL SUPLENTE

## DECLARACIÓN EXPRESA

"La responsabilidad del contenido de esta Tesis de Grado, me corresponde exclusivamente; y el patrimonio intelectual de la misma a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL"



Dominiqka Nathalye Mora Domínguez



Luiggi Michael Navarro Carvajal

## **RESUMEN**

El tema planteado busca analizar diversas teorías y metodologías utilizadas para la estimación de la socavación general y local, de ciertos ríos ubicados en la costa ecuatoriana, específicamente en la provincia de Esmeraldas. Se usarán modelos matemáticos empíricos y modelos computacionales, con el fin de comparar los resultados obtenidos, analizarlos y concluir de éstos, cual es la metodología que mejor se adapta a las condiciones propias de nuestro país.

Se modelarán varias situaciones para cada río, con la ayuda de hojas de cálculo electrónicas, y el programa HEC-RAS, con el fin de analizar la influencia de los diferentes parámetros que intervienen en las estimaciones de la socavación, ya sean estos: caudales, geomorfología, tipo de sedimentos, material del lecho, etc.

# ÍNDICE GENERAL

RESUMEN .....	VI
ÍNDICE GENERAL.....	VII
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XI
ÍNDICE DE TABLAS .....	XV
ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS .....	XXI
ÍNDICE DE ECUACIONES .....	XXIII
ABREVIATURAS .....	XXV
SIMBOLOGÍAS .....	XXVI
CAPÍTULO 1 .....	1
1 Introducción.....	1
1.1 Generalidades .....	1
1.2 Justificación .....	3
1.3 Hipótesis .....	4
1.4 Objetivos.....	5
1.5 Alcance .....	5
CAPÍTULO 2 .....	8
2 MARCO TEÓRICO .....	8
2.1 Socavación General .....	10
2.1.1 Socavación por contracción.....	12
2.2 Socavación Local .....	14

2.2.1	Socavación local en pilas.....	14
2.2.2	Socavación local en estribos .....	16
2.3	Diversas Metodologías para estimación de socavación general .....	17
2.3.1	Método de Lichtvan-Lebediev.....	17
2.3.2	Método de Laursen (USACE, HEC-18).....	23
2.4	Diversas Metodologías para estimación de socavación local.....	26
2.4.1	Método del HEC – 18 (USACE, HEC-18).....	26
2.4.2	Método Laursen – Toch.....	30
2.5	Programa HEC-RAS .....	33
2.5.1	Ecuaciones para calcular perfiles básicos .....	34
2.5.2	Subdivisión de intersección para cálculos de transporte .....	36
2.5.3	Cálculo del canal principal cuando está formado por material compuesto .....	38
2.5.4	Evaluación de la altura de energía cinética media.....	39
CAPÍTULO 3 .....		41
3 DESCRIPCIÓN DE LOS CASOS DE ESTUDIO .....		41
3.1	Esmeraldas.....	41
3.1.1	Río Bilsa .....	42
3.1.2	Río Guachal .....	45
3.1.3	Río Tonchigüe.....	48
3.1.4	Río Aguas Claras.....	50
3.1.5	Río Daule .....	53
3.1.6	Río Maldonado.....	57
3.1.7	Río Repartidero.....	60

CAPÍTULO 4 .....	65
4 METODOLOGÍA .....	65
4.1 Preparación de datos .....	66
4.1.1 Topografía .....	66
4.1.2 Hidrología .....	68
4.1.3 Datos Geométricos del puente .....	68
4.1.4 Estudio de Suelos .....	68
4.2 Selección de métodos .....	75
4.3 Armado del modelo en HEC-RAS.....	76
4.3.1 Procedimiento computacional.....	76
4.3.2 Ingreso de datos geométricos de los ríos y puentes.....	77
4.4 Estimación de la Socavación general .....	83
4.4.1 Criterio de Lischtván – Lebediev: .....	83
4.4.2 Método de Laursen .....	85
4.5 Estimación de la Socavación local.....	88
4.5.1 Método del HEC - 18 .....	88
4.5.2 Método Laursen – Toch.....	89
CAPÍTULO 5 .....	90
5 DISCUSIÓN .....	90
5.1 Socavación General .....	90
5.1.1 Determinación de la rugosidad del lecho <i>del</i> río .....	91
5.1.2 Resultados del análisis de socavación .....	99
5.2 Socavación local.....	198
5.2.1 Río Guachal .....	198

5.2.2	Río Tonchigüe.....	200
5.3	Conclusiones.....	201
5.3.1	Río Guachal.....	201
5.3.2	Río Tonchigue.....	202
5.3.3	Río Bilsa.....	203
5.3.4	Río Repartidero.....	203
5.3.5	Río Maldonado.....	204
5.3.6	Río Aguas Claras.....	204
5.3.7	Río Daule.....	205
CAPÍTULO 6	.....	206
6	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	206
6.1	Socavación general.....	207
6.2	Socavación local.....	210
6.3	Recomendaciones Generales.....	211

## APÉNDICES

## BIBLIOGRAFÍA

## ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 2.1 Posibles tipos de Socavación en puentes (Melville & Coleman, 2000) .....	9
Fig. 2.2 Profundidad de socavación en pilas en función del tiempo en lechos granulares (Akan, 2006) .....	11
Fig. 2.3 Tipos de socavación por contracción (Richardson & Davis, 2001) .....	13
Fig. 2.4 Variación de la velocidad media real FUENTE (Juárez & Rico, 2003) .....	19
Fig. 2.5 Velocidad de caída en partículas con gravedad específica 2.65 Ton/m <sup>3</sup> (Richardson & Davis, 2001) .....	25
Fig. 2.6 Gráfico esquemático de la socavación en pilas (USACE, HEC-18) .....	28
Fig. 2.7 Relación entre la erosión relativa y la profundidad relativa (Juárez & Rico, 2003) .....	31
Fig. 2.8 Gráfico para determinar el coeficiente de corrección con incidencia oblicua (Juárez & Rico, 2003).....	33
Fig. 2.9 Representación de los términos en la Ecuación de la energía (USACE, HEC-RAS, 2010) .....	34
Fig. 2.10 Método predeterminado de cálculo de transporte (USACE, HEC-RAS, 2010) .....	37
Fig. 2.11 Método alternativo para el cálculo de transporte (USACE, HEC-RAS, 2010)	37

Fig. 2.12 Modelo de cálculo de pendiente para material compuesto (USACE, HEC-RAS, 2010) .....	38
Fig. 2.13 Ejemplo de cómo se obtiene la energía media (USACE, HEC-RAS, 2010) ...	39
Fig. 4.1 Área referencial de la topografía (Google, 2014) .....	67
Fig. 4.2 Topografía del Río y Puente.....	78
Fig. 4.3 Datos geométricos del puente .....	79
Fig. 4.4 Datos geométricos del Tablero del puente .....	79
Fig. 4.5 Datos geométricos de las pilas .....	80
Fig. 4.6 Esquema final de modelación de uno de los puentes en estudio.....	80
Fig. 4.7 Datos de rugosidad de los márgenes y canal principal .....	81
Fig. 4.8 Datos del Flujo Estacionario y Condiciones de Frontera .....	82
Fig. 5.1 Vista en Planta del modelo del Río Guachal, en HEC – RAS. Ubicación del puente en color gris .....	99
Fig. 5.2 Perfil longitudinal del Río Guachal, en HEC –RAS.....	100
Fig. 5.3 Sección Transversal (ABS 0+590) .....	101
Fig. 5.4 Perfil de Socavación en la ABS (0+680) .....	105
Fig. 5.5 Perfil de Socavación en la ABS (0+590) .....	108
Fig. 5.6 Perfil de Socavación en la ABS (0+580) .....	112
Fig. 5.7 Perfil de Socavación en la ABS (0+480) .....	115
Fig. 5.8 Vista en Planta del modelación del Río Tonchigüe, en HEC – RAS. Ubicación del puente en color gris .....	116

Fig. 5.9 Perfil longitudinal del Río Tonchigüe HEC –RAS .....	117
Fig. 5.10 Sección Transversal (ABS 0+090) .....	118
Fig. 5.11 Vista en Planta del modelación del Río Bilsa en HEC – RAS. Ubicación del puente en color gris .....	131
Fig. 5.12 Perfil longitudinal del Río Bilsa, en HEC –RAS .....	132
Fig. 5.13 Sección Transversal (ABS 0+210) .....	133
Fig. 5.14 Perfil de Socavación en la ABS (0+210) .....	136
Fig. 5.15 Perfil de Socavación en la ABS (0+100) .....	139
Fig. 5.16 Vista en Planta del modelación del Río Repartidero en HEC – RAS. Ubicación del puente en color gris .....	145
Fig. 5.17 Perfil longitudinal del Río Repartidero, en HEC – RAS.....	146
Fig. 5.18 Sección Transversal (ABS 0+090) .....	147
Fig. 5.19 Vista en Planta del modelación del Río Maldonado en HEC – RAS. Ubicación del puente en color gris .....	157
Fig. 5.20 Perfil longitudinal del Río Maldonado .....	158
Fig. 5.21 Seccion Transversal (ABS 0+190) .....	158
Fig. 5.22 Perfil de Socavación en la ABS (0+100) .....	164
Fig. 5.23 Perfil de Socavación en la ABS (0+000) .....	169
Fig. 5.24 Vista en Planta del modelación del Río Aguas Claras en HEC – RAS. Ubicación del puente en color gris .....	170
Fig. 5.25 Perfil longitudinal del Río Aguas Claras HEC – RAS .....	171

Fig. 5.26 Sección Transversal (ABS 0+090) .....	171
Fig. 5.27 Perfil de Socavación en la ABS (0+100) .....	178
Fig. 5.28 Perfil de Socavación en la ABS (0+090) .....	181
Fig. 5.29 Perfil de Socavación en la ABS (0+000) .....	185
Fig. 5.30 Vista en Planta del modelación del Río Daule en HEC – RAS. Ubicación del puente en color gris .....	186
Fig. 5.31 Perfil longitudinal del Río Daule, en HEC – RAS.....	187
Fig. 5.32 Sección Transversal (ABS 0+190) .....	188
Fig. 5.33 Perfil de Socavación en la ABS (0+190) .....	192
Fig. 5.34 Perfil de Socavación local en la pila del Río Guachal en la ABS (0+585) ...	199
Fig. 5.35 Perfil de Socavación local en las pilas del Río Tonchigüe en la ABS (0+095) .....	201

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla I Clasificación según Lischvan – Lebediev. Fuente (Juárez & Rico, 2003) .....	17
Tabla II Tabla de probabilidades de diseño para la Ec. 2.1 .....	22
Tabla III Valores de $x$ y $1/(1+x)$ para suelos cohesivos y no cohesivos .....	22
Tabla IV Exponente $K_1$ para la Formula de Socavación por contracción (USACE, HEC-18) .....	24
Tabla V Factor de corrección por la forma de la pila (USACE, HEC-18) .....	28
Tabla VI Factor de corrección por el ángulo de ataque del flujo .....	28
Tabla VII Incremento en la profundidad de equilibrio de socavación en la pila.....	29
Tabla VIII Coeficiente de corrección de forma de la fila para caudales paralelos .....	32
Tabla IX Datos Hidrológicos E Hidráulicos Existentes .....	64
Tabla X: Tabla de características geomorfológicas de las cuencas .....	69
Tabla XI: Tabla de características Geométricas de los puentes.....	70
Tabla XII Características Geotécnicas del lecho de los ríos en estudio.....	71
Tabla XIII Determinación del Coeficiente de rugosidad.....	73
Tabla XIV Resumen de Resultados de Rugosidad .....	75
Tabla XV Resultados de la socavación por el Método Lischvan - Lebediev.....	85
Tabla XVI Resumen de Resultados de Rugosidad .....	91

Tabla XVII Datos obtenidos de la modelación con el programa HEC – RAS .....	102
Tabla XVIII Cálculo de Socavación por Lischtván – Lebediev en el Río Guachal (ABS. 0+680) .....	103
Tabla XIX Cálculo de Socavación por Laursen en el Río Guachal (ABS. 0+680) .....	104
Tabla XX Cálculo de Socavación por Lischtván – Lebediev en el Río Guachal (ABS. 0+590) .....	106
Tabla XXI Cálculo de Socavación por Laursen en el Río Guachal (ABS. 0+590) .....	107
Tabla XXII Cálculo de Socavación por Lischtván – Lebediev en el Río Guachal (ABS. 0+580) .....	109
Tabla XXIII Cálculo de Socavación por Laursen en el Río Guachal (ABS. 0+580) .....	110
Tabla XXIV Cálculo de Socavación por Lischtván – Lebediev en el Río Guachal (ABS. 0+480) .....	113
Tabla XXV Cálculo de Socavación por Laursen en el Río Guachal (ABS. 0+480) .....	114
Tabla XXVI Datos obtenidos de la modelación con el programa HEC – RAS .....	119
Tabla XXVII Cálculo de Socavación por Lischtván – Lebediev en el Río Tonchigüe (ABS. 0+190) .....	120
Tabla XXVIII Cálculo de Socavación por Laursen en el Río Guachal (ABS. 0+190) ....	121
Tabla XXIX Cálculo de Socavación por Lischtván – Lebediev en el Río Tonchigüe (ABS. 0+100) .....	123
Tabla XXX Cálculo de Socavación por Laursen en el Río Tonchigüe (ABS. 0+100)....	124

Tabla XXXI Cálculo de Socavación por Lischtván – Lebediev en el Río Tonchigüe (ABS. 0+090) .....	125
Tabla XXXII Cálculo de Socavación por Laursen en el Río Tonchigüe (ABS. 0+090)..	126
Tabla XXXIII Cálculo de Socavación por Lischtván – Lebediev en el Río Tonchigüe (ABS. 0+000) .....	127
Tabla XXXIV Cálculo de Socavación por Laursen en el Río Tonchigüe (ABS. 0+090)	128
Tabla XXXV Tabla de resultados de modelación HEC-RAS .....	133
Tabla XXXVI Cálculo de Socavación por Lischtván – Lebediev en el Río Bilsa (ABS. 0+210) .....	134
Tabla XXXVII Cálculo de Socavación por Laursen en el Río Bilsa (ABS. 0+210) .....	135
Tabla XXXVIII Cálculo de Socavación por Lischtván – Lebediev en el Río Bilsa (ABS. 0+100) .....	137
Tabla XXXIX Cálculo de Socavación por Laursen en el Río Bilsa (ABS. 0+100) .....	138
Tabla XL Cálculo de Socavación por Lischtván – Lebediev en el Río Bilsa (ABS. 0+090) .....	141
Tabla XLI Cálculo de Socavación por Laursen en el Río Bilsa (ABS. 0+090) .....	142
Tabla XLII Cálculo de Socavación por Lischtván – Lebediev en el Río Bilsa (ABS. 0+000) .....	143
Tabla XLIII Cálculo de Socavación por Laursen en el Río Bilsa (ABS. 0+000) .....	144
Tabla XLIV Tabla de resultados de modelación HEC – RAS .....	148

Tabla XLV Cálculo de Socavación por Lischtvan – Lebediev en el Río Repartidero (ABS. 0+190) .....	149
Tabla XLVI Cálculo de Socavación por Laursen en el Río Repartidero (ABS. 0+190)	150
Tabla XLVII Cálculo de Socavación por Lischtvan – Lebediev en el Río Repartidero (ABS. 0+100) .....	151
Tabla XLVIII Cálculo de Socavación por Laursen en el Río Repartidero (ABS. 0+100) .....	152
Tabla XLIX Cálculo de Socavación por Lischtvan – Lebediev en el Río Repartidero (ABS. 0+090) .....	153
Tabla L Cálculo de Socavación por Laursen en el Río Repartidero (ABS. 0+090).....	154
Tabla LI Cálculo de Socavación por Lischtvan – Lebediev en el Río Repartidero (ABS. 0+000) .....	155
Tabla LII Cálculo de Socavación por Laursen en el Río Repartidero (ABS. 0+000)....	156
Tabla LIII Tabla de resultados de modelación HEC – RAS .....	159
Tabla LIV Cálculo de Socavación por Lischtvan – Lebediev en el Río Maldonado (ABS. 0+190) .....	160
Tabla LV Cálculo de Socavación por Laursen en el Río Maldonado (ABS. 0+190) ....	161
Tabla LVI Cálculo de Socavación por Lischtvan – Lebediev en el Río Maldonado (ABS. 0+100) .....	162
Tabla LVII Cálculo de Socavación por Laursen en el Río Maldonado (ABS. 0+100) ..	163

Tabla LVIII Cálculo de Socavación por Lischtván – Lebediev en el Río Maldonado (ABS. 0+090) .....	165
Tabla LIX Cálculo de Socavación por Laursen en el Río Maldonado (ABS. 0+090) ...	166
Tabla LX Cálculo de Socavación por Lischtván – Lebediev en el Río Maldonado (ABS. 0+000) .....	167
Tabla LXI Cálculo de Socavación por Laursen en el Río Maldonado (ABS. 0+000) ...	168
Tabla LXII Tabla de resultados de modelación HEC – RAS .....	172
Tabla LXIII Cálculo de Socavación por Lischtván – Lebediev en el Río Aguas Claras (ABS. 0+190) .....	173
Tabla LXIV Cálculo de Socavación por Laursen en el Río Aguas Claras (ABS. 0+190)	174
Tabla LXV Cálculo de Socavación por Lischtván – Lebediev en el Río Aguas Claras (ABS. 0+100) .....	176
Tabla LXVI Cálculo de Socavación por Laursen en el Río Aguas Claras (ABS. 0+100)	177
Tabla LXVII Cálculo de Socavación por Lischtván – Lebediev (ABS. 0+090) .....	179
Tabla LXVIII Cálculo de Socavación por Laursen en el Río Aguas Claras (ABS. 0+090) .....	180
Tabla LXIX Cálculo de Socavación por Lischtván – Lebediev (ABS. 0+000) .....	183
Tabla LXX Cálculo de Socavación por Laursen en el Río Aguas Claras (ABS. 0+000)	184
Tabla LXXI Tabla de resultados de modelación HEC – RAS .....	188
Tabla LXXII Cálculo de Socavación por Lischtván – Lebediev en el Río Daule (ABS. 0+190) .....	190

Tabla 5.73 Cálculo de Socavación por Laursen en el Río Daule (ABS. 0+190) .....	191
Tabla LXXIV Cálculo de Socavación por Lischtván – Lebediev en el Río Daule (ABS. 0+100) .....	193
Tabla LXXV Cálculo de Socavación por Laursen en el Río Daule (ABS. 0+100) .....	194
Tabla LXXVI Cálculo de Socavación por Lischtván – Lebediev en el Río Daule (ABS. 0+090) .....	195
Tabla LXXVII Cálculo de Socavación por Laursen en el Río Daule (ABS. 0+090) .....	196
Tabla LXXVIII Cálculo de Socavación por Lischtván – Lebediev en el Río Daule (ABS. 0+000) .....	197
Tabla LXXIX Cálculo de Socavación por Laursen en el Río Daule (ABS. 0+000) .....	198

## ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS

Foto # 1 Socavación ocasionada en las márgenes del río Maldonado .....	4
Foto # 2 Vista General Puente Río Bilsa.....	42
Foto # 3 Abundante vegetación y márgenes erosionados Río Bilsa .....	43
Foto # 4 Abundante vegetación y márgenes erosionados .....	44
Foto # 5 Márgenes erosionados, protección de bolsacreto en mal estado ....	44
Foto # 6 Vista General Puente Río Guachal .....	45
Foto # 7 Abundante vegetación y márgenes erosionados .....	46
Foto # 8 Abundante vegetación y márgenes erosionados Río Guachal .....	47
Foto # 9 Márgenes erosionados, gaviones en mal estado .....	47
Foto # 10 Vista General Puente Río Tonchigüe.....	48
Foto # 11 Abundante vegetación y márgenes erosionados.....	49
Foto # 12 Márgenes protegidos por gaviones .....	50
Foto # 13: Vista General Puente Río Aguas Claras .....	51
Foto # 14: Abundante vegetación y márgenes erosionados.....	51
Foto # 15: Material Granular Grueso del fondo del cauce .....	52
Foto # 16: Márgenes erosionados, gaviones en mal estado .....	53
Foto # 17: Vista General Puente Río Daule .....	54
Foto # 18: Abundante vegetación y márgenes erosionados.....	54

Foto # 19: Abundante vegetación y márgenes erosionados.....	55
Foto # 20: Material Granular Grueso del fondo del cauce .....	55
Foto # 21 Gaviones para protección de las márgenes .....	56
Foto # 22: Vista General Puente Río Maldonado .....	57
Foto # 23: Abundante vegetación y márgenes erosionados.....	58
Foto # 24: Abundante vegetación y márgenes erosionados.....	59
Foto # 25: Márgenes erosionados, protección de bolsacreto en mal estado .	60
Foto # 26: Vista General Puente Río Repartidero .....	61
Foto # 27: Abundante vegetación y márgenes erosionados.....	61
Foto # 28: Material Granular Grueso del fondo del cauce .....	62
Foto # 29: Márgenes erosionados, protección de bolsacreto en mal estado .	63

## ÍNDICE DE ECUACIONES

Ec. 2.1 .....	19
Ec. 2.2 .....	20
Ec. 2.3 .....	20
Ec. 2.4 .....	20
Ec. 2.5 .....	20
Ec. 2.6 .....	21
Ec. 2.7 .....	21
Ec. 2.8 .....	21
Ec. 2.9 .....	22
Ec. 2.10 .....	23
Ec. 2.11 .....	23
Ec. 2.12 .....	23
Ec. 2.13 .....	24
Ec. 2.14 .....	24
Ec. 2.15 .....	25
Ec. 2.16 .....	25
Ec. 2.17 .....	25
Ec. 2.18 .....	26

Ec. 2.19 .....	27
Ec. 2.20 .....	29
Ec. 2.21 .....	31
Ec. 2.22 .....	32
Ec. 2.23 .....	34
Ec. 2.24 .....	35
Ec. 2.25 .....	35
Ec. 2.26 .....	36
Ec. 2.27 .....	36
Ec. 2.28 .....	39
Ec. 2.29 .....	40

## **ABREVIATURAS**

CL:	Center line
FHWA:	Federal Highway Administration
HEC - 18.:	Hydraulic Engineering Circular No. 18
HEC – RAS:	Hydrologic Engineering Centers River Analysis System
INAMHI:	Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología
m.s.n.m:	metros sobre el nivel del mar
UTM:	Universal Transverse Mercator
WGS:	World Geodetic System
WS:	Water Surface

## SIMBOLOGÍAS

<b>m</b>	metros
<b>ton/m<sup>3</sup></b>	toneladas por metro cubico
<b>mm</b>	milímetros
<b>m-kg-s</b>	metros kilos segundos
<b>m<sup>3</sup>/s</b>	metros cúbicos por segundo
<b>km</b>	kilómetros

# **CAPÍTULO 1**

## **1 Introducción**

### **1.1 Generalidades**

La Ingeniería Civil constituye el vínculo entre las ciencias y la cotidianidad del ser humano, usando técnicas, sistemas, tecnologías, y conocimientos científicos generales para el diseño, construcción, y mantenimiento de las diferentes estructuras emplazadas en el entorno.

Uno de los propósitos más importantes de la Ingeniería Civil es el transporte, ya sea mediante carreteras, ferrocarriles, puentes, puertos, aeropuertos, etc. Dichas estructuras por su nivel de inversión, además de su importancia,

deben ser preservadas, por lo que se destinan muchos recursos a la investigación de los fenómenos que pudiesen afectarlas. Es por ello que nace la necesidad de proteger los puentes contra el fenómeno conocido como socavación.

Una aceptable estimación de la profundidad de socavación, permite mantener costos bajos al no sobreestimar una altura de desplante de las pilas o estribos de un puente. Evitará también que la estructura en cuestión falle, causando pérdidas económicas, o peor aún pérdidas humanas. En Ecuador, esto es de crucial importancia, por cuanto las vías conectan ciudades importantes del país, ya sea esto por economía, turismo, transportación, etc.

En la zona noroccidental del Ecuador existe una vía que conecta las ciudades de Esmeraldas y Pedernales, la cual atraviesa en su recorrido los ríos Bilsa, Guachal, Tonchigüe, Aguas Claras, Daule, Maldonado y Repartidero. En los puentes que cruzan dichos ríos se estimará la profundidad de socavación.

Existen varios métodos para la estimación de la socavación general y local en puentes. Este análisis se puede llevar a cabo, tanto por modelos matemáticos empíricos, como por simulaciones computacionales. Por esta razón se ha decidido comparar los resultados obtenidos en los métodos

empíricos, asistidos por los modelos matemáticos, y de esta manera poder determinar cuál es la metodología que se adapta mejor a las condiciones inherentes a nuestro país.

Para ello se generaron varios modelos por cada río, mediante el programa HEC – RAS y con la ayuda de hojas de cálculo se desea analizó la influencia de los distintos parámetros como: caudales, geomorfología, tipo de sedimentos, material del lecho etc. En la estimación de la profundidad de socavación.

## **1.2 Justificación**

Se propuso el desarrollo de este tema debido la importancia de determinar la profundidad de socavación que puede ocurrir en un puente. Así, se anticipan posibles fallas estructurales que podrían causar un mal funcionamiento. Esta situación podría derivar en gastos posteriores tanto en mantenimiento como en obras correctivas; o peor aún, en caso de grados severos de socavación que significarían la pérdida de la inversión realizada y/o pérdida de vidas humanas.



Foto # 1 Socavación ocasionada en las márgenes del río Maldonado

### 1.3 Hipótesis

La presente investigación lleva implícita dos hipótesis fundamentales:

1. ¿Cuán similar, o diferente es el grado de magnitud de socavación general para puentes ubicados en el sector noroccidental de la costa ecuatoriana?
2. ¿Cuál es el efecto de la pendiente longitudinal del cauce en la socavación local en pilas?

## **1.4 Objetivos**

Los problemas planteados en las hipótesis serán investigados a través de los siguientes objetivos:

1. Estimar la profundidad de socavación general que pudiese presentarse en los sitios aledaños a los puentes sobre seis ríos de la costa noroccidental del país, mediante las variantes metodológicas Lischtván Lebediev y Laursen.
2. Estimar la profundidad de socavación en pilas que pudiese presentarse en los sitios aledaños a dos ríos de la costa noroccidental del país, mediante las variantes metodológicas Laursen Toch y el propuesto por el HEC - 18.
3. Comparar los resultados de los métodos utilizados para la estimación de la socavación de acuerdo a las condiciones de cada sitio de estudio.

## **1.5 Alcance**

La presente tesis se desarrollará de la siguiente manera:

El Capítulo 1 trata sobre los lineamientos e hipótesis a desarrollarse en el presente documento, así como los objetivos planteados, que servirán de guía

para la estimación de las socavaciones generales y locales que pudieran presentarse.

El Capítulo 2 muestra los fundamentos teóricos requeridos para la correcta comprensión de las diversas metodologías utilizadas para las estimaciones de socavación general y local en los ríos.

En el Capítulo 3 se describen los casos de estudio que han sido escogidos para el análisis, los cuales están ubicados en la Provincia de Esmeraldas y son atravesados por la vía Esmeraldas - Pedernales.

Dentro del Capítulo 4 se detalla la metodología utilizada para generar un modelo computacional en el programa HEC – RAS con el fin de obtener los datos hidráulicos que serán utilizados para la estimación de la socavación general y socavación local en pilas. En cada uno de los ríos analizados se han evaluado cuatro secciones transversales que son: la sección conocida más alejada del puente aguas arriba, la sección inmediatamente aguas arriba del puente, la sección inmediatamente aguas abajo del puente y la sección conocida más alejada del puente aguas abajo. El presente documento no considera la estimación de socavación en los estribos de los puentes antes mencionados, ya que éstos fueron concebidos en primera instancia con una sola luz, y dichos estribos se encuentran fuera del cauce, inalcanzables para el flujo del río.

En el Capítulo 5 se discutirán los resultados obtenidos de la estimación socavación general para todos los ríos analizados, así como también, la estimación de la socavación local en pilas para los Ríos Guachal y Tonchigüe que son los únicos que poseen pilas intermedias.

El Capítulo 6 comprende las conclusiones y recomendaciones producto de la discusión realizada en el capítulo anterior y finalmente los apéndices y demás documentos de información usados.

# **CAPÍTULO 2**

## **2 MARCO TEÓRICO**

La socavación es una forma de erosión, que ocurre cuando la capacidad erosiva del agua como resultado de acontecimientos naturales o efectos antropogénicos, son superiores a la capacidad de los materiales de la tierra para resistir sus efectos. (Annadale, 2006)

La determinación de la profundidad de este tipo de erosión, es un tema sumamente importante. Un procesamiento aproximado de estos valores resulta muy ventajoso como elemento de ayuda en la toma de decisiones previo al diseño de estructuras fluviales. (Farias, Pilán , & Olmos, 2003)

En el diseño de puentes es necesario considerar la acción de este tipo de erosión debido a que cualquier error de cálculo podría llevar al daño total o parcial de la estructura o a procedimientos que requieran excavaciones profundas que compliquen el proceso constructivo y eleven el costo de la obra (Akan, 2006).

Al construir un puente usualmente se reduce el cauce natural del sitio lo que causa el incremento en la velocidad de la corriente, por lo tanto, existe un mayor acarreo de partículas sólidas. Así la profundidad de desplante resulta ser menor que la original. (Juárez & Rico, 2003)

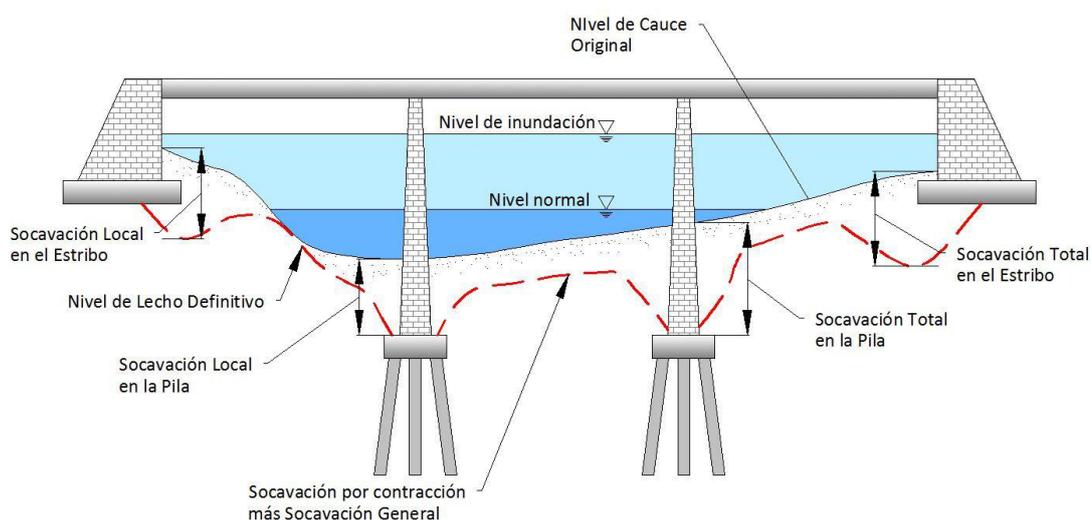


Fig. 2.1 Posibles tipos de Socavación en puentes (Melville & Coleman, 2000)

## **2.1 Socavación General**

Se puede decir que la socavación general ocurre cuando el lecho de un río se degrada. Generalmente esto no solamente es el resultado de la presencia de un puente, sino que más bien proviene de procesos geomorfológicos fluviales en el río, así como cuando se sitúa una presa en una sección transversal del río y esta podría provocar una acumulación de sedimentos. Si la cantidad sedimentada aguas arriba es significativa, el río aguas abajo de la presa podría perder el aporte de dichos sedimentos y degradarse. (Annadale, 2006)

Socavación por contracción es la reducción del lecho de un río, debido al paso de una crecida generalmente presente por la contracción del flujo, lo que causa un incremento en la velocidad del mismo. (Akan, 2006)

Esta puede ocurrir incluso si el estrato más profundo del río está constituido por roca, siempre que la velocidad de la corriente sea mayor a la necesaria para producir su desgaste.

El desgaste del fondo de un cauce por el que fluye la corriente es una cuestión de equilibrio entre las partículas sólidas que pueden estar en el agua, es decir su capacidad de arrastre. (Juárez & Rico, 2003)

Dependiendo de la cantidad de material que sea removido del lecho del río aguas arriba, la socavación puede ser de agua clara, o socavación de fondo móvil. La socavación de agua clara ocurre cuando existe muy poco o ningún movimiento del material del fondo del río aguas arriba del puente, generalmente en arroyos con lechos de material grueso, mientras que la socavación de fondo móvil, indica la remoción significativa del lecho aguas arriba del puente. En este caso, el proceso erosivo se desarrolla durante la fase ascendente de la inundación, en lechos de materiales finos. (Akan, 2006)

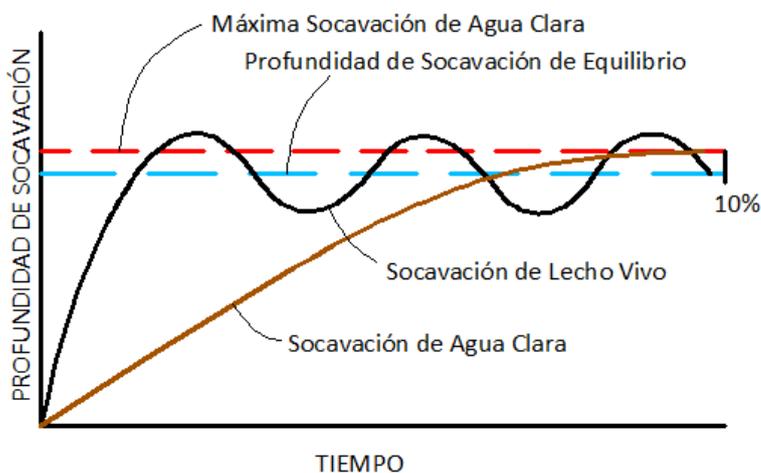


Fig. 2.2 Profundidad de socavación en pilas en función del tiempo en lechos granulares (Akan, 2006)

Se pueden presentar varios procesos naturales relacionados con la socavación general y estos son incisión del lecho, desplazamientos laterales, modificación en la forma del fondo del cauce, socavación en afluencias.

Existen procesos que inciden en la socavación general de un río, como el cambio del uso del suelo, ya que alteraría los tipos de sedimentos que podrían ser llevados a través del río y afectar directamente la socavación de alguna sección del mismo. Las modificaciones causadas por la socavación general pueden ser imperceptibles a la vista, y pueden variar de años a siglos. No obstante éstas puede exacerbarse debido a la influencia antropogénica y climática.

Los modelos de drenaje y perfiles longitudinales sufren modificaciones a largo plazo como consecuencia de cambios hidrológicos o geomorfológicos.

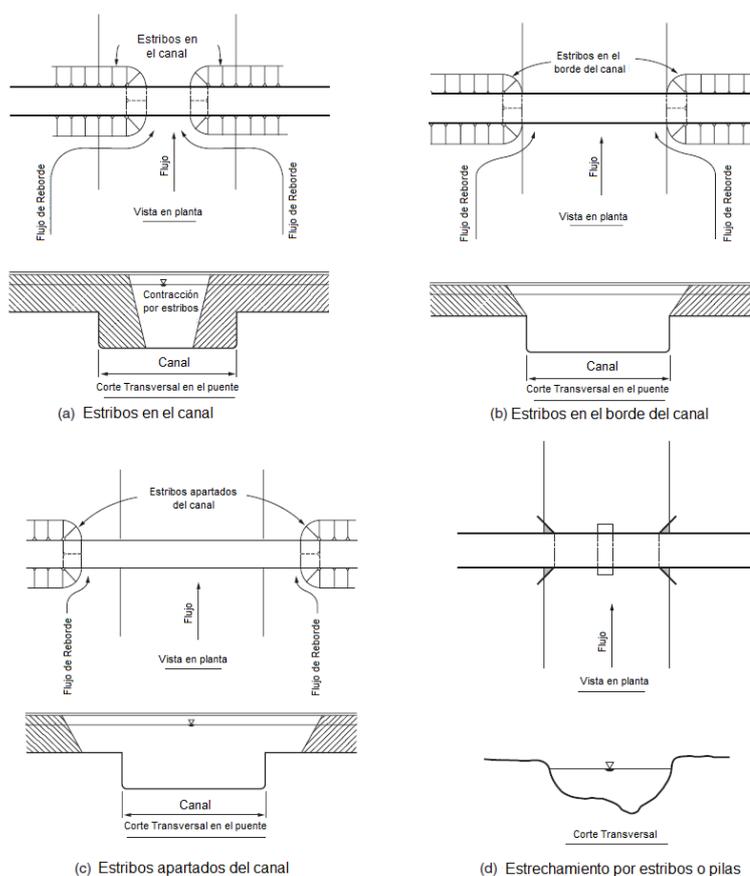
Pero también estas modificaciones pueden ocurrir en periodos cortos de tiempo, durante crecientes continuas, lo que podrían alterar el lecho incluso en horas.

### **2.1.1 Socavación por contracción**

Esta ocurre cuando el área de apertura del puente es más pequeña que el área del flujo aguas arriba. Una reducción del área del flujo de agua incrementa la velocidad promedio de la misma descarga, así como en los esfuerzos cortantes sobre el lecho. (Akan, 2006)

El incremento de la fuerzas erosivas puede remover más material del lecho en la sección contraída que lo que ha sido transportado de aguas arriba.

En el gráfico se pueden observar diferentes casos de socavación por contracción, cuando se coloca un puente sobre la distancia naturalmente más angosta del río, en el caso mostrado con el literal “c” se debe analizar el cauce natural del río y colocar de tres a cinco veces alejado del mismo, ya que de lo contrario esto podría causar un mayor daño, no solo sobre el cauce del río sino también sobre los márgenes laterales del mismo. (Akan, 2006)



**Fig. 2.3 Tipos de socavación por contracción (Richardson & Davis, 2001)**

## **2.2 Socavación Local**

A diferencia de la socavación general, la socavación local es el cambio brusco del lecho de un río, causado por la substracción del material de fondo ocasionado por alguna particularidad natural en la corriente del cauce de algún tramo. Este evento ha sido analizado debido a que incide directamente en el diseño de obras de cimentaciones, las cuales están en contacto directo con el cauce. (Juárez & Rico, 2003)

### **2.2.1 Socavación local en pilas**

Cuando se construye una pila de un puente de un río, el caudal que este posee sufre un cambio en sus condiciones hidráulicas, por lo tanto se modifica también el acarreo de los sólidos. Si la capacidad de acarreo es mayor que la tributación local, entonces se tiene socavación local en la pila. (Juárez & Rico, 2003)

Cuando el puente atraviesa un río en una zona poco probable de alcanzar el manto rocoso, uno de los primordiales problemas que se encuentra es la estimación de las posibles erosiones locales que podría sufrir el fondo del cauce, temas que atañerían una posible falla parcial o total de la estructura.

Es indudable que la comprensión de la profundidad que puede lograr este efecto erosivo es sumamente importante en el diseño de bases poco profundas de un puente.

De acuerdo a estudios realizados se puede decir que los parámetros que influyen en la socavación local son:

- Velocidad media del caudal
- Tirante cercano a la pila
- Distribución de velocidad
- Diámetro de la grano en la sección
- Distribución granulométrica del material
- Cohesión del material
- Peso específico sumergido
- Estratificación del lecho
- Ancho de la pila
- Relación de esbeltez
- Perfil de la sección horizontal
- Contracción de la sección del puente
- Forma del río visto en planta
- Obras de control del gasto construidas aguas arriba o aguas abajo

### **2.2.2 Socavación local en estribos**

La socavación local presente en los estribos es similar a la que se produce las pilas intermedias de los puentes. El flujo de agua choca contra la estructura presente que acorta el ancho normal del río y forma vórtices tanto delante como detrás del estribo. Ésta turbulencia genera un esfuerzo cortante sobre el material del fondo, mayor al que éste puede resistir, lo que provoca que exista erosión alrededor del estribo.

La erosión desgarrará el material del fondo, conforme aumenta la profundidad socavada, el flujo irá perdiendo capacidad de arrastre de sedimentos, hasta llegar a una altura máxima. En este punto, existirá equilibrio entre el material que el flujo de agua retira aguas arriba y deposita en la sección de estudio, y el material que se desprende del fondo ocasionado por la turbulencia y los vórtices en los alrededores de los estribos.

Si bien la socavación local en pilas y en estribos son muy parecidas, existen métodos para estimar cada fenómeno. En el presente documento no existe análisis de socavación local en estribos, ya que los puentes estudiados fueron pensados desde sus orígenes con una sola luz, es decir, con sus estribos fuera del cauce, para que no se vean afectados por socavación local.

## 2.3 Diversas Metodologías para estimación de socavación general

Para realizar la estimación de la socavación es necesario definir varios parámetros entre ellos el coeficiente de rugosidad de Manning para lo cual se utilizaran los siguientes métodos:

### 2.3.1 Método de Lichtvan-Lebediev

Uno de los criterios utilizados para la determinación de la socavación general es el Método de Lichtvan-Lebediev, que realiza varias clasificaciones de los cauces de ríos, como se indica a continuación:

Tabla I Clasificación según Lischvan – Lebediev. Fuente (Juárez & Rico, 2003)

	CAUCE	MATERIAL DE FONDO	DESTRIBUCION DE MATERIALES EN EL FONDO
Socavación General	Definido	Cohesivo	Homogénea Heterogénea
		No cohesivo	Homogénea Heterogénea
	Indefinido	Cohesivo	Homogénea Heterogénea
		No cohesivo	Homogénea Heterogénea

Los ríos que serán parte de nuestro estudio tienen cauce definido con material de fondo no cohesivo con rugosidad uniforme.

### **2.3.1.1 Socavación general en cauces definidos**

El desgaste del fondo del cauce en una sección transversal sucede cuando existe un desequilibrio entre la aportación de material de acarreo (aguas arriba) y la extracción de partículas del fondo en la sección contraída (aguas abajo), siendo ésta última mucho mayor.

Al existir una creciente aumenta también la velocidad del cauce lo que hace que la capacidad de acarreo sea mayor, y por lo tanto el fondo del río se va desgastando. Al aumentar el caudal aumenta también el nivel de erosión se acrecienta el área hidráulica y la velocidad del agua, hasta llegar al equilibrio entre el nivel máximo de erosión y el caudal máximo; si se reduce la creciente se reduce la velocidad media de la corriente y por lo tanto el acarreo es menor, haciendo que comience la etapa de sedimentación.

Se pueden determinar dos casos, cuando la rugosidad de la sección transversal es uniforme, y cuando no lo es. (Juárez & Rico, 2003)

#### **2.3.1.1.1 Socavación general para suelos no cohesivos en cauces definidos con rugosidad uniforme**

En el caso en estudio debemos definir la socavación máxima en una sección transversal considerando la creciente y el caudal de diseño.

La variación de la velocidad media real de la corriente puede ser calculada para cada punto de la sección transversal asumiendo que tomamos una parte de la misma en sentido vertical de acuerdo a gráfico mostrado en la Fig. 2.4 suponiendo que este se mantiene constante mientras exista este proceso de socavación. (Juárez & Rico, 2003)

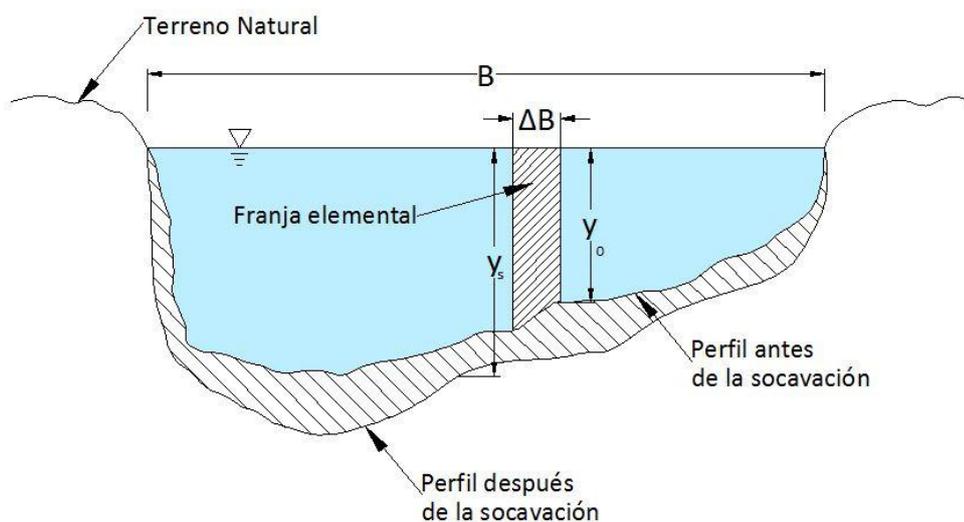


Fig. 2.4 Variación de la velocidad media real FUENTE (Juárez & Rico, 2003)

El gasto se puede expresar según Manning por:

$$Q = V\Delta A = \frac{1}{n} S^{1/2} y_0^{5/3} \Delta B \quad \text{Ec. 2.1}$$

Como  $\Delta B$  es pequeño el radio hidráulico se puede considerar igual al tirante

Dónde:

$S$  = pendiente hidráulica

$y_0$  = profundidad antes de la erosión (m)

$\eta$  = coeficiente de rugosidad de Manning

$Q$  = Caudal de la franja

Como consideramos una rugosidad constante en toda la sección el valor de  $1/\eta \text{ s}^{1/2}$  es constante y se lo representa  $\alpha$  por lo tanto nuestra ecuación queda definida:

$$Q = \alpha y_0^{5/3} \Delta B \quad \text{Ec. 2.2}$$

El valor de  $\alpha$  puede ser mostrado en función del tirante medio  $Y_m$  para toda la sección de la siguiente manera:

$$Q_D = \alpha u Y_m^{5/3} B_e \quad \text{Ec. 2.3}$$

Despejando  $\alpha$  tenemos:

$$\alpha = \frac{Q_D}{u Y_m^{5/3} B_e} \quad \text{Ec. 2.4}$$

Si en la sección de estudio incrementamos la  $Y_0$  hasta alcanzar un valor cualquier igual a  $Y_s$ , la Velocidad  $V_r$  disminuye, en función del tirante y la velocidad del cauce. Y podemos decir que  $\Delta Q$  en la sección  $\Delta B$  está expresado por:

$$\Delta Q = V_r Y_s \Delta B \quad \text{Ec. 2.5}$$

Al tratarse de flujo estacionario, el gasto permanece constante durante el proceso por lo tanto podemos decir que:

$$V_r Y_s \Delta B = \alpha Y_0^{5/3} \Delta B \quad \text{Ec. 2.6}$$

De donde podemos decir que la velocidad real de la corriente se define como:

$$V_r = \frac{\alpha Y_0^{5/3}}{Y_s} \quad \text{Ec. 2.7}$$

Para el estudio de la profundidad de socavación en suelos formados por granos gruesos (arenas, gravas finas, etc.) la Velocidad Erosiva se expresará mediante la siguiente la siguiente expresión:

$$V_e = 0.68 \beta d_m^{0.28} Y_s^x \quad \text{Ec. 2.8}$$

Dónde:

$V_e$  = Velocidad erosiva

$d_m$  = peso volumétrico del material seco que se encuentra en la profundidad  $y_0$  en ton/m<sup>3</sup>

$\beta$  = coeficiente que depende de la frecuencia con que se repite la creciente de estudio y se puede encontrar en la Tabla II

$y_s$  = profundidad considerada para determinar el valor de  $V_e$ , que arrastra el material en metros.

$x$  = exponente variable en función del peso volumétrico y del material seco de la Tabla III

Tabla II Tabla de probabilidades de diseño para la Ec. 2.1

Probabilidad anual (en %)de que se presente el caudal de diseño	Coefficiente $\beta$
100	0.77
50	0.82
20	0.86
10	0.90
5	0.94
2	0.97
1	1
0.3	1.03
0.2	1.05
0.1	1.07

Tabla III Valores de x y 1/(1+x) para suelos cohesivos y no cohesivos

SUELOS COHESIVOS						SUELOS NO COHESIVOS					
D (mm)	X	1/(1+x)	Dm (mm)	X	1/(1+x)	D(mm)	X	1/(1+x)	D(mm)	x	1/(1+x)
0.80	0.52	0.66	1.20	0.39	0.72	0.05	0.43	0.70	40.00	0.30	0.77
0.83	0.51	0.66	1.20	0.38	0.72	0.15	0.42	0.70	60.00	0.29	0.78
0.86	0.50	0.67	1.28	0.37	0.73	0.50	0.41	0.71	90.00	0.28	0.78
0.88	0.49	0.67	1.34	0.36	0.74	1.00	0.40	0.71	140.00	0.27	0.79
0.90	0.48	0.68	1.40	0.35	0.74	1.50	0.39	0.72	190.00	0.26	0.79
0.93	0.47	0.68	1.46	0.34	0.75	2.50	0.38	0.72	250.00	0.25	0.80
0.96	0.46	0.68	1.52	0.33	0.75	4.00	0.37	0.73	310.00	0.24	0.81
0.98	0.45	0.69	1.58	0.32	0.76	6.00	0.36	0.74	370.00	0.23	0.81
1.00	0.44	0.69	1.64	0.31	0.76	8.00	0.35	0.74	450.00	0.22	0.83
1.04	0.43	0.70	1.71	0.30	0.77	10.00	0.34	0.75	570.00	0.21	0.83
1.08	0.42	0.70	1.80	0.29	0.78	15.00	0.33	0.75	750.00	0.20	0.83
1.12	0.41	0.71	1.89	0.28	0.78	20.00	0.32	0.76	1000.00	0.19	0.84
1.16	0.40	0.71	2.00	0.27	0.79	25.00	0.31	0.76			

El proceso de socavación se detendrá cuando la profundidad alcanzada con el valor de  $V_r$  velocidad de arrastre sea igual a la profundidad mediante  $V_e$  que es la necesaria para que el fondo se degrade:

$$V_e = V_r \quad \text{Ec. 2.9}$$

Conocida como condición de equilibrio. De donde podemos decir que:

$$\frac{\alpha Y_0^{5/3}}{Y_s} = 0.68 \beta d_m^{0.28} Y_s^x \quad \text{Ec. 2.10}$$

Despejando la profundidad de Socavación  $Y_s$  tenemos:

$$Y_s = \left( \frac{\alpha Y_0^{5/3}}{0.68 \beta d_m^{0.28}} \right)^{\frac{1}{x+1}} \quad \text{Ec. 2.11}$$

### 2.3.2 Método de Laursen (Federal Highway Administration, 2012)

#### 2.3.2.1 Velocidad crítica

Si bien la velocidad en sí misma no es una fuerza, es usada como un valor relacionado al potencial erosivo del flujo. La velocidad crítica es entonces, aquella con la que las partículas del lecho del río empiezan a moverse.

Para el cálculo del valor de velocidad crítica se usa la siguiente ecuación:

$$V_c = K_u y^{1/6} D_{50}^{1/3} \quad \text{Ec. 2.12}$$

$V_c$  = velocidad Crítica

$K_u$  = 6,19 SI (m-kg-s)

$y$  = profundidad de flujo

$D_{50}$  = Diámetro medio de la partícula (m)

$V$  = Velocidad del cauce (m/s<sup>2</sup>)

Si la velocidad crítica es menor que la velocidad del cauce se puede decir que existe una socavación de Lecho Vivo caso contrario será socavación en Agua Clara.

### 2.3.2.2 Socavación en Lecho Vivo ( $V_c < V$ ) (Federal Highway Administration, 2012)

$$\frac{y_2}{y_1} = \left(\frac{Q_2}{Q_1}\right)^{6/7} \left(\frac{B_2}{B_1}\right)^e \quad \text{Ec. 2.13}$$

$$y_s = y_2 - y_0 \quad \text{Ec. 2.14}$$

$y_1$ = Profundidad aguas arriba (m)

$y_2$ = Profundidad en la sección contraída (m)

$y_0$ =profundidad existente en la sección contraída antes de la socavación (m)

$Q_1$ = Caudal aguas arriba ( $m^3/s$ )

$Q_2$ = Caudal en la sección contraída ( $m^3/s$ )

$B_1$ = Ancho de la superficie de agua en sección aguas arriba (m)

$B_2$ = Ancho de la superficie de agua de la sección contraída (m)

$e$ = exponente determinado en la Tabla IV

Tabla IV Exponente K1 para la Formula de Socavación por contracción (Federal Highway Administration, 2012)

$V^*/w$	e	Forma en la que transporta el material de fondo
<0,50	0,59	Mayor cantidad de partículas arrastradas en contacto con el fondo del cauce
0,50 a 2	0,64	Ciertas partículas arrastradas están suspendidas
>2	0,69	Mayor cantidad de partículas arrastradas están suspendidas

$$V_* = (g y_1 S_1)^{1/2} \text{ Ec. 2.15}$$

$V_*$ = velocidad de corte en la sección aguas arriba

$w$ = Velocidad de caída de partículas con gravedad específica 2.65 Ton/m<sup>3</sup>

$g$ = aceleración gravitacional 9,8 m/s<sup>2</sup>

$S_1$ = Pendiente de la curva de energía m/m

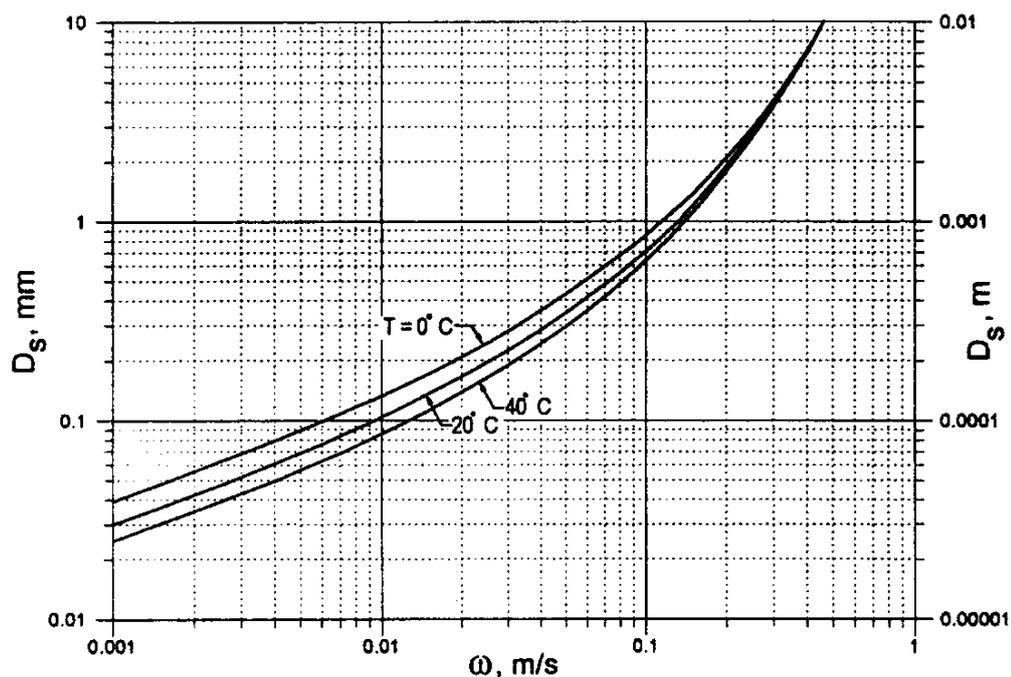


Fig. 2.5 Velocidad de caída en partículas con gravedad específica 2.65 Ton/m<sup>3</sup> (Richardson & Davis, 2001)

### 2.3.2.3 Socavación en Agua Clara ( $V_c > V$ ) (Federal Highway Administration, 2012)

$$y_2 = \left[ \frac{K_u Q^2}{D_m^{2/3} B^2} \right]^{3/7} \text{ Ec. 2.16}$$

$$y_s = y_2 - y_0 \text{ Ec. 2.17}$$

$y_2$ = Profundidad en la sección (m)

$K_u$ = 0,025 SI (m-kg-s)

$Q$ = Caudal en la sección ( $m^3/s$ )

$D_m$  = Diámetro menor de la partícula no transportable del le (1.25  $D_{50}$ ) en la sección (m)

$D_{50}$  = Diámetro medio de la partícula (m)

$B$ = Ancho efectivo de la superficie de agua (m)

$y_s$ = profundidad de flujo

$y_0$ =profundidad existente en la sección contraída antes de la socavación (m)

## **2.4 Diversas Metodologías para estimación de socavación local.**

### **2.4.1 Método del HEC – 18 (Federal Highway Administration, 2012)**

El HEC – 18 (Hydraulic Engineering Circular N.18) recomienda este método para estimar profundidades de socavación local en pilas tanto para Lecho Vivo como para Agua Clara.

#### **2.4.1.1 Socavación en pilas para suelos no cohesivos**

$$\frac{y_s}{y_1} = 2.0 K_1 K_2 K_3 \left(\frac{a}{y_1}\right)^{0.65} Fr^{0.43} \text{ Ec. 2.18}$$

$y_s \leq 2,4$  veces el ancho de la pila ( $a$ ) para  $Fr \leq 0,8$

$y_s \leq 3$  veces el ancho de la pila ( $a$ ) para  $Fr > 0,8$

$y_s$ = profundidad de socavación (m)

$y_1$ = profundidad del flujo en la cara aguas arriba de la pila (m)

$K_1$ = factor de corrección por la forma de la nariz de la pila

$K_2$ = factor de corrección por el ángulo de ataque del flujo

$K_3$ = factor de corrección por la condición del lecho

$a$ = ancho de la pila (m)

$L$ = longitud de la pila (m)

$$Fr = \frac{V_m}{(g y_1)^{1/2}} \text{ Ec. 2.19}$$

$Fr$ = Numero de Froude

$V_m$ =velocidad media del flujo

$g$ = aceleración gravitacional (9,8 m/s<sup>2</sup>)

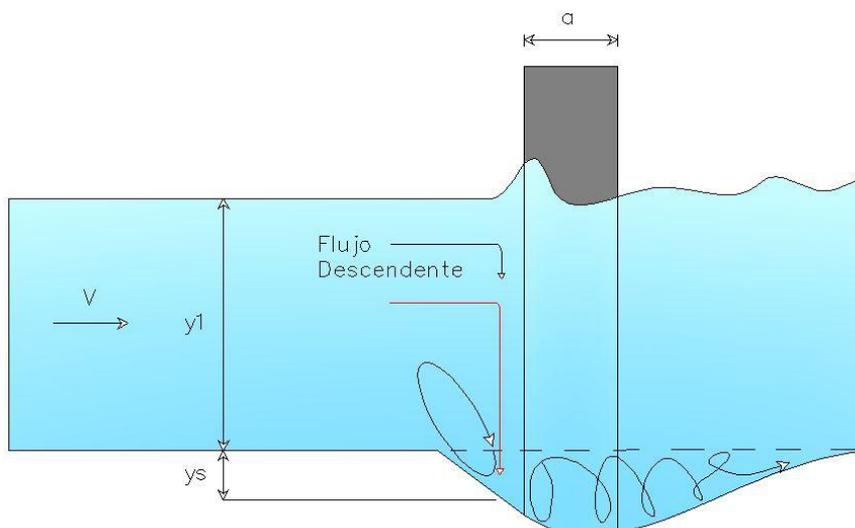


Fig. 2.6 Gráfico esquemático de la socavación en pilas (Federal Highway Administration, 2012)

Tabla V Factor de corrección por la forma de la pila (Federal Highway Administration, 2012)

FORMA DE LA PILA	$K_1$
Cuadrada	1.1
Semi circular	1.0
Cilíndrica	1.0
Grupo de pilas cilíndricas	1.0
Biselada	0.9

Tabla VI Factor de corrección por el ángulo de ataque del flujo

ANGULO	$L/a=4$	$L/a=8$	$L/a=12$
0	1.0	1.0	1.0
15	1.5	2.0	2.5
30	2.0	2.75	3.5
45	2.3	3.3	4.3
90	2.5	3.9	5.0
Angulo=ángulo de ataque del flujo	L= longitud de la pila		

Tabla VII Incremento en la profundidad de equilibrio de socavación en la pila

<b>Condiciones del lecho</b>	<b>Altura de la duna</b>	<b><math>K_3</math></b>
Socavación en agua clara	-	1.1
Lecho plano y flujo Anti dunas	-	1.1
Dunas pequeñas	$3.0 > H \geq 0.6$	1.1
Dunas medianas	$9.0 > H \geq 3.0$	1.2 a 1.1
Dunas grandes	$H \geq 9.0$	1.3

#### 2.4.1.2 Socavación en pilas para suelos cohesivos

Considerando que de acuerdo a los estudios geotécnicos el material existente es cohesivo, para el cálculo se ha utilizado la ecuación recomendada para este suelo por la Federal Highway Administration (FHWA) contenida en el Hydraulic Engineering Circular No.18 (Federal Highway Administration, 2012).

$$y_s = 2.2k_1k_2a^{0.65} \left( \frac{2.6V_1 - V_c}{\sqrt{g}} \right)^{0.7} \quad \text{Ec. 2.20}$$

Dónde:

$y_s$  =Profundidad de socavación, (m)

$K_1$ =Factor de corrección por la forma de la nariz de la pila

$K_2$ =Factor de corrección por ángulo de ataque del flujo

$a$ = ancho de la pila, (m)

$V_1$ = Velocidad promedio del flujo aguas arriba d la pila, (m/s)

$V_c$ = Velocidad critica para inicio de erosión en suelos cohesivos (m/s)

$g$ = Aceleración de la gravedad ( $9.81 \text{ m/s}^2$ )

Como regla, la máxima profundidad de socavación alrededor de la pila y alineada al flujo es:

$$y_s \leq 2.4 \text{ Veces del ancho de la pila (a) para } Fr \leq 0.8$$

$$y_s \leq 2.4 \text{ Veces del ancho de la pila (a) para } Fr > 0.8$$

#### 2.4.2 Método Laursen – Toch.

Para Laursen – Toch, la erosión depende básicamente del tirante y ancho de la pila, se debe considerar también la forma que esta pueda tener, aunque esta medida no sea muy significativa.

Se pueden definir dos casos generales:

- Incidencia de la corriente paralela al eje de la pila
- Incidencia de la corriente con una ligera inclinación al eje de la pila

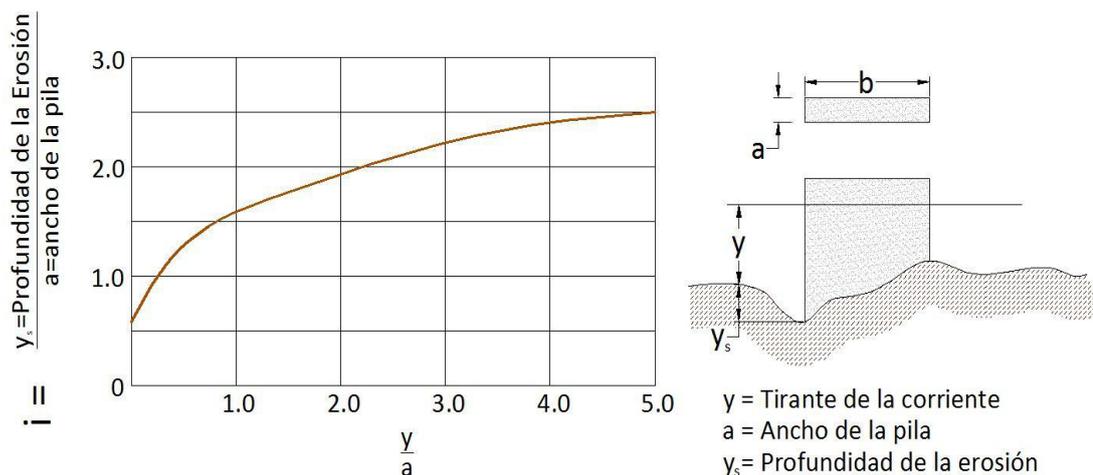


Fig. 2.7 Relación entre la erosión relativa y la profundidad relativa (Juárez & Rico, 2003)

#### 2.4.2.1 Incidencia paralela al eje de las pilas

Se puede determinar con la siguiente formula:

$$y_s = K_1 (i) a \quad \text{Ec. 2.21}$$

Dónde:

$y_s$  = Profundidad de socavación (m)

$i$  = coeficiente de la relación tirante ancho de la pila

$K_1$  = coeficiente de la relación de forma de la nariz de la pila

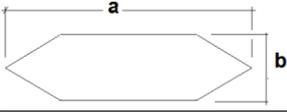
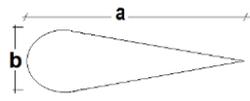
$a$  = ancho de la *pila*

Como este método sólo considera el tirante, ancho y forma de la pila sin analizar la velocidad ni granulometría del fondo, se asume que el material es arenoso, por lo tanto este método no es aplicable a cauces con granulometrías diferentes.

Tabla VIII Coeficiente de corrección de forma de la fila para caudales paralelos

FORMA DE LA PILA		COEFICIENTE $K_1$ DE SCHNEIBLE
Rectangular $a/b=4$		1.00
Semicircular		0.90
Elíptica	$P/r = 2/1$	0.81
	$P/r = 3/1$	0.75
Lenticular	$P/r = 2/1$	0.81
	$P/r = 3/1$	0.69

FORMA DE LA NARIZ	SEGÚN TISON
Biselada $a/b=4$	 0.78
Perfil hidrodinámico $a/b=4$	 0.75

#### 2.4.2.2 Incidencia oblicua al eje de las pilas

En este caso la socavación puede definirse con la expresión:

$$y_s = i(j)a \quad \text{Ec. 2.22}$$

$y_s$  = Profundidad de socavación (m)

$i$  = coeficiente que depende del ángulo  $\varphi$  de la relación  $a/b$

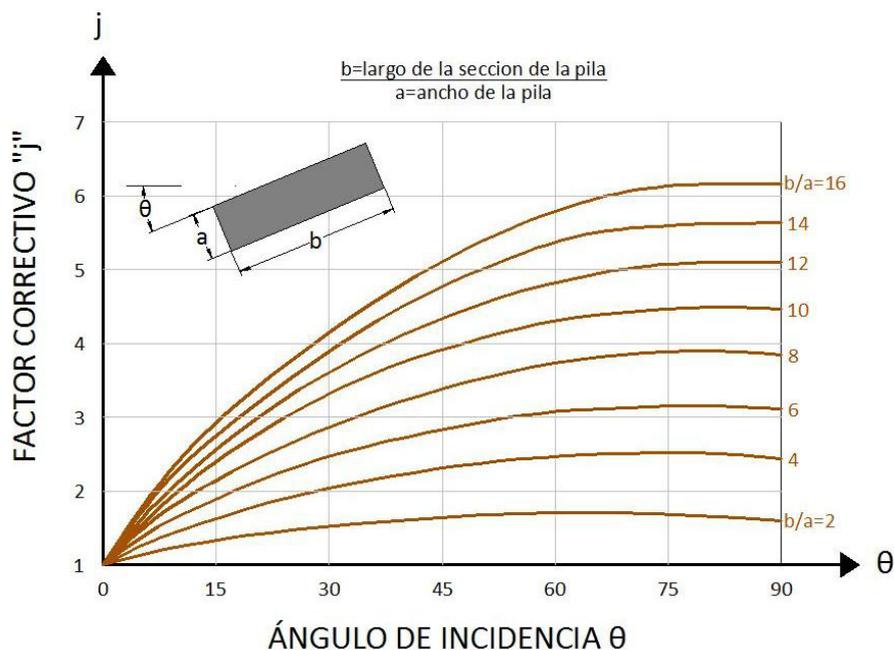


Fig. 2.8 Gráfico para determinar el coeficiente de corrección con incidencia oblicua (Juárez & Rico, 2003)

En este caso la socavación no está relacionada directamente con la forma de la pila, ya que de acuerdo a ensayos realizados sin variar el tirante y habiendo incrementado de manera considerable la velocidad de la corriente la socavación no progresa, existen estudios no son concluyentes para fondos con material gravoso pero definitivamente no se debe considerar válido para fondos con granulometrías superiores.

## 2.5 Programa HEC-RAS

El programa HEC-RAS (USACE, HEC-RAS, 2010) utiliza para el desarrollo del análisis de los perfiles de superficie de agua con flujo constante varias ecuaciones que detallamos a continuación:

### 2.5.1 Ecuaciones para calcular perfiles básicos

Para este análisis se utiliza la ecuación de la energía (Bernoulli) con un procedimiento iterativo llamado método de paso estándar.

$$Z_2 + y_2 + \frac{a_2 V_2^2}{2g} = Z_1 + y_1 + \frac{a_1 V_1^2}{2g} + h_e \text{ Ec. 2.23}$$

Dónde:

$Z_1, Z_2$  = altura del canal principal

$y_1, y_2$  = altura del agua de la sección

$V_1, V_2$  = velocidad promedio (descarga total/ área de flujo)

$a_1, a_2$  = coeficientes de ponderación de velocidad

$g$  = aceleración gravitacional ( $9,8 \text{ m/s}^2$ )

$h_e$  = pérdida de carga

La siguiente figura muestra en un gráfico como se relacionan los términos de la ecuación de la energía.

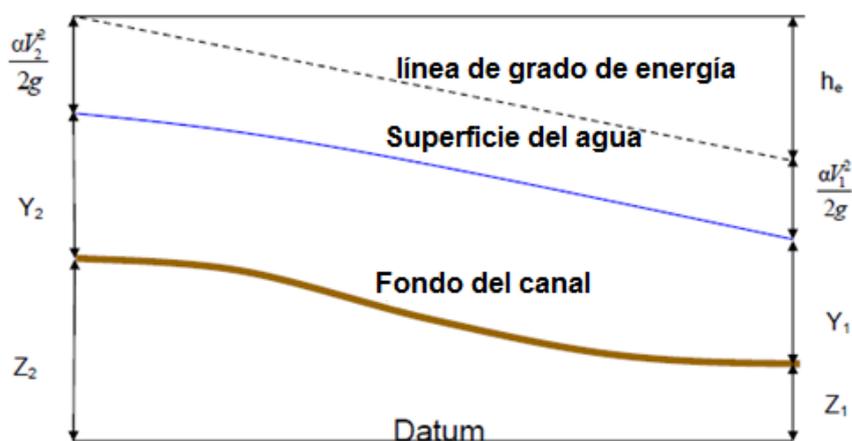


Fig. 2.9 Representación de los términos en la Ecuación de la energía (USACE, HEC-RAS, 2010)

Las pérdidas de energía entre secciones están compuestas por las pérdidas por fricción, las pérdidas por contracción y las pérdidas por expansión. La ecuación de las pérdidas se expresa de la siguiente manera:

$$h_e = Q_p \overline{S_f} + C \left| \frac{a_2 V_2^2}{2g} - \frac{a_1 V_1^2}{2g} \right| \text{ Ec. 2.24}$$

Dónde:

$Q_p$  = descarga ponderada

$S_f$  = pendiente de fricción entre dos secciones

$C_c$  = coeficiente de pérdidas por expansión o contracción

La descarga ponderada L, se calcula de la siguiente manera:

$$L = \frac{L_{lob} \overline{Q_{lob}} + L_{ch} \overline{Q_{ch}} + L_{rob} \overline{Q_{rob}}}{\overline{Q_{lob}} + \overline{Q_{ch}} + \overline{Q_{rob}}} \text{ Ec. 2.25}$$

Dónde:

$L_{lob}$ ,  $L_{ch}$ ,  $L_{rob}$ , = Longitud de alcance de la sección transversal especificado para el flujo en el margen izquierdo, canal principal, y margen derecho, respectivamente.

$\overline{Q_{lob}} + \overline{Q_{ch}} + \overline{Q_{rob}}$  = promedio aritmético de los flujos entre secciones para el margen izquierdo, canal principal, y margen derecho, respectivamente.

## 2.5.2 Subdivisión de intersección para cálculos de transporte

El cálculo total de transporte y coeficiente de velocidad para la intersección requiere que el flujo se subdivida en unidades para las cuales cada velocidad sea uniformemente distribuida.

El cálculo de transporte se realiza para cada subdivisión a partir de la ecuación de Manning:

$$Q = KS_f^{1/2} \text{ Ec. 2.26}$$

$$K = \frac{1.486}{n} AR^{2/3} \text{ Ec. 2.27}$$

Dónde:

$K$ = Transporte para la subdivisión

$n$ = Coeficiente de rugosidad de Manning

$A$ = Área de flujo de la subdivisión ( $m^2$ )

$R$ = Radio hidráulico de la subdivisión (m)

El programa resume los incrementos de transporte en las llanuras de inundaciones, para obtener el transporte de los márgenes en ambos extremos.

El transporte del canal esta generalmente contado como un elemento independiente.

El valor total del valor por trasporte se obtiene de la suma de estas tres subdivisiones.

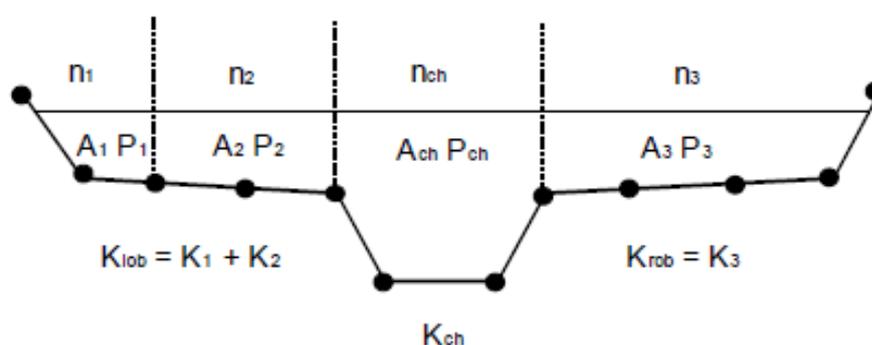


Fig. 2.10 Método predeterminado de cálculo de transporte (USACE, HEC-RAS, 2010)

El programa adicionalmente tiene una alternativa de cálculo disponible para determinar el transporte entre dos puntos, la cual representamos en EL siguiente gráfico.

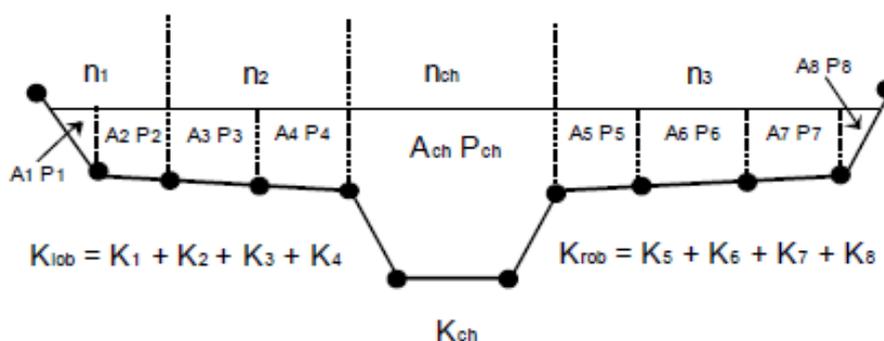


Fig. 2.11 Método alternativo para el cálculo de trasporte (USACE, HEC-RAS, 2010)

Para determinar el valor de transporte se comparan los valores obtenidos con los dos métodos anteriormente descritos, y el programa realiza el análisis para mejorar la exactitud del cálculo del perfil.

### 2.5.3 Cálculo del canal principal cuando está formado por material compuesto

El flujo en el canal principal no se subdivide, excepto cuando el coeficiente de rugosidad cambia con el área del canal, para lo cual se subdivide en  $n$  partes, acorde a las características del lugar. Como se muestra en el gráfico siguiente:

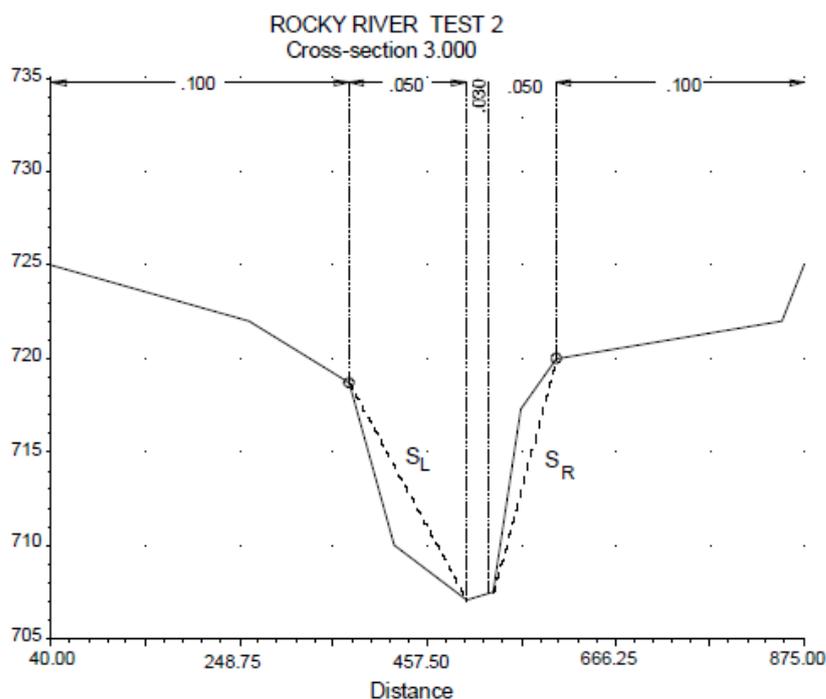


Fig. 2.12 Modelo de cálculo de pendiente para material compuesto (USACE, HEC-RAS, 2010)

Para determinar en cuantas partes se debe dividir el canal principal se usa la siguiente ecuación:

$$n_c = \left[ \frac{\sum_{i=1}^N (P_i n_i^{1.5})}{P} \right]^{2/3} \quad \text{Ec. 2.28}$$

Dónde:

$n_c$  = coeficiente de rugosidad equivalente del material compuesto

$P$  = perímetro mojado del canal principal

$P_i$  = perímetro mojado de la subdivisión

$n_i$  = coeficiente de rugosidad de la subdivisión

#### 2.5.4 Evaluación de la altura de energía cinética media

Como HEC-RAS es un software unidimensional solo se analiza la altura de energía de cada sección de acuerdo al gráfico mostrado a continuación:

Dónde:

$V_{m1}$  = velocidad media del sub área 1

$V_{m2}$  = velocidad media del sub área 2

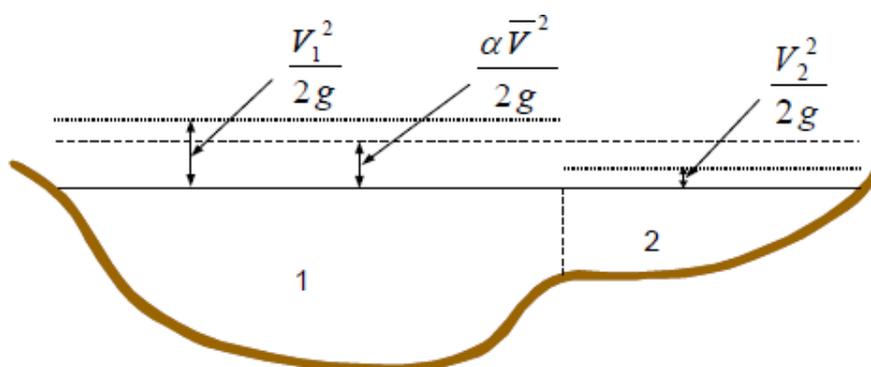


Fig. 2.13 Ejemplo de cómo se obtiene la energía media (USACE, HEC-RAS, 2010)

El cálculo de la altura de energía cinética media se realiza de la siguiente manera:

$$a \frac{v^2}{2g} = \frac{Q_1 \frac{v_1^2}{2g} + Q_2 \frac{v_2^2}{2g}}{Q_1 + Q_2} \text{ Ec. 2.29}$$

# **CAPÍTULO 3**

## **3 DESCRIPCIÓN DE LOS CASOS DE ESTUDIO**

### **3.1 Esmeraldas**

Para el desarrollo de este documento se ha considerado varios ríos de la Provincia de Esmeraldas que son atravesados por la vía Esmeraldas – Pedernales.

- Río Bilsa
- Río Guachal
- Río Tonchigüe

- Río Aguas Claras
- Río Daule
- Río Maldonado
- Río Repartidero

### 3.1.1 Río Bilsa

Para cruzar el Río Bilsa existe un puente localizado en la abscisa 43+600 de la carretera Esmeraldas – Pedernales construido en concreto reforzado de 34.00 m de longitud, (ver Foto # 2), sin apoyos intermedios, con sus estribos fuera del cauce ubicados en las coordenadas 621503m. Este, 69048m. Norte (UTM WGS84 ZONA 17N) y 621515m. Este, 69016m. Norte, cuya rasante se encuentra en la cota 22.54 m y la cuerda inferior de los elementos de la superestructura en la cota 20.26 m.



Foto # 2 Vista General Puente Río Bilsa

El cauce del río en el sitio del puente y en su entorno es de tipo definido pero de irregular geometría, observándose erosión en sus márgenes y la presencia de abundante vegetación, (ver Foto # 3 y Foto # 4).



**Foto # 3 Abundante vegetación y márgenes erosionados Río Bilsa**

En el lecho del río se encuentra material granular no cohesivo y en sus márgenes principalmente arcilla. El río se desplaza formando meandros de pronunciada curvatura y el puente existente se encuentra ubicado en una acentuada curvatura de un meandro. Por tanto, razonablemente se puede esperar que en el lado cóncavo de la curva (margen derecha) se presenten fenómenos erosivos que con el tiempo llegarían a inestabilizar el talud.

Posiblemente para controlar el problema observado sobre esta margen se han colocado sacos de protección (ver Foto # 5).



**Foto # 4 Abundante vegetación y márgenes erosionados**



**Foto # 5 Márgenes erosionados, protección de bolsacreto en mal estado**

La cuenca de drenaje hasta el sitio de ubicación del puente tiene una extensión de 35.40 km<sup>2</sup> y el caudal es de 156.70 m<sup>3</sup>/s, aproximadamente.

### 3.1.2 Río Guachal

Sobre el Río Guachal existe un puente localizado en la abscisa 7+700 de la carretera Esmeraldas – Pedernales construido en concreto reforzado de 43.00 m de longitud (ver Foto # 6). Este puente tiene dos apoyos intermedios, sus estribos están fuera del cauce y ubicados en las coordenadas 623583m. Este, 91620m. Norte (UTM WGS84 ZONA 17N) y 623547m. Este, 91596m. Norte. La rasante del puente se encuentra en la cota 17.58 m y la cuerda inferior de los elementos de la superestructura en la cota 15.77 m.



Foto # 6 Vista General Puente Río Guachal

El cauce del río en el sitio del puente y en su entorno es de tipo definido pero de irregular geometría, observándose erosión en sus márgenes y la presencia de abundante vegetación, (ver Foto # 7 y Foto # 8). En el lecho del río se encuentra material granular no cohesivo y en sus márgenes principalmente arcilla. El río se desplaza formando meandros de pronunciada curvatura y el puente existente se encuentra ubicado aproximadamente entre un tramo intermedio entre dos de ellos, por lo que se puede esperar considerables erosiones sobre la margen derecha. Para proteger la estructura de estos efectos se han colocado gaviones en las márgenes (ver Foto # 9).



**Foto # 7 Abundante vegetación y márgenes erosionados**

La cuenca de drenaje hasta el sitio de ubicación del puente tiene una extensión de 55.30 km<sup>2</sup> y el caudal es de 231.60 m<sup>3</sup>/s, aproximadamente.



**Foto # 8** Abundante vegetación y márgenes erosionados Río Guachal



**Foto # 9** Márgenes erosionados, gaviones en mal estado

### 3.1.3 Río Tonchigüe

En el Río Tonchigüe existe un puente localizado en la abscisa 21+100 de la carretera Esmeraldas – Pedernales está construido en concreto reforzado de 43.00 m de longitud, (ver Foto # 10), con dos apoyos intermedios, con sus estribos fuera del cauce ubicados en las coordenadas 618128m. Este, 88074m. Norte (UTM WGS84 ZONA 17N) y 618118m. Este, 88051m. Norte, cuya rasante se encuentra en la cota 11.62 m y la cuerda inferior de los elementos de la superestructura en la cota 8.97 (m.).



Foto # 10 Vista General Puente Río Tonchigüe

El cauce del río en el sitio del puente y en su entorno es de tipo definido pero de irregular geometría, observándose erosión en sus márgenes y la presencia de abundante vegetación, (ver Foto # 11). En el lecho del río se

encuentra material granular no cohesivo y en sus márgenes principalmente arcilla.



**Foto # 11 Abundante vegetación y márgenes erosionados**

El río se desplaza formando meandros y el puente existente se encuentra ubicado en un tramo recto entre meandros, pero con un ángulo de esviajamiento de aproximadamente  $100^\circ$ . Aguas arriba del puente la margen izquierda es más baja que la derecha, pero, inmediatamente aguas abajo, ambas márgenes son bajas.

Para protección de las márgenes se han instalado gaviones Foto # 12

La cuenca de drenaje hasta el sitio de ubicación del puente tiene una extensión de  $44.70 \text{ km}^2$  y el caudal es de  $237.40 \text{ m}^3/\text{s}$ , aproximadamente



Foto # 12 Márgenes protegidos por gaviones

### 3.1.4 Río Aguas Claras

El Río Aguas Claras tiene un puente localizado en la abscisa 74+900 de la carretera Esmeraldas – Pedernales construido en concreto reforzado de 32.00 m de longitud, (ver Foto # 13), sin apoyos intermedios, con sus estribos fuera del cauce ubicados en las coordenadas 611253m. Este, 10046186m. Norte (UTM WGS84 ZONA 17S) y 611283m. Este, 10046176m. Norte, cuya rasante se encuentra en la cota 8.30 m y la cuerda inferior de los elementos de la superestructura en la cota 6.24 (m.). El cauce del río en el sitio del puente y en su entorno es de tipo definido pero de irregular geometría, observándose erosión en sus márgenes y la presencia de abundante vegetación, (ver Foto # 14).



**Foto # 13: Vista General Puente Río Aguas Claras**

En el lecho del río se encuentra material granular no cohesivo mezclado con finos (ver Foto # 15) y en sus márgenes principalmente arcilla.



**Foto # 14: Abundante vegetación y márgenes erosionados**

La cuenca de drenaje hasta el sitio de ubicación del puente tiene una extensión de 11.10 km<sup>2</sup> y el caudal es de 67.00 m<sup>3</sup>/s, aproximadamente.



**Foto # 15: Material Granular Grueso del fondo del cauce**

El río se desplaza formando meandros de suave curvatura y el puente existente se encuentra ubicado en uno de ellos y es aproximadamente perpendicular al eje del cauce. Para proteger el puente de los efectos erosivos en las márgenes se han colocado gaviones en ambas márgenes (ver Foto # 16).



**Foto # 16: Márgenes erosionados, gaviones en mal estado**

### **3.1.5 Río Daule**

Para cruzar el Río Daule existe un puente localizado en la abscisa 76+500 de la carretera Esmeraldas - Pedernales construido en concreto reforzado de 35.00 m de longitud, (ver Foto # 17), sin apoyos intermedios, con sus estribos fuera del cauce ubicados en las coordenadas 612760m. Este, 10045559m. Norte (UTM WGS84 ZONA 17N) y 612787m. Este, 10045537m. Norte, cuya rasante se encuentra en la cota 11.96 m y la cuerda inferior de los elementos de la superestructura en la cota 9.77m.



**Foto # 17: Vista General Puente Río Daule**

El cauce del río en el sitio del puente y en su entorno es de tipo definido pero de irregular geometría, observándose erosión en sus márgenes y la presencia de abundante vegetación, (ver Foto # 18 y Foto # 19).



**Foto # 18: Abundante vegetación y márgenes erosionados**

En el lecho del río se encuentra material granular grueso no cohesivo (ver Foto # 20) y en sus márgenes principalmente arcilla. El río se desplaza

formando meandros de suave curvatura y el puente existente se encuentra ubicado en uno de ellos, y esviado con relación al eje de la vía.



**Foto # 19: Abundante vegetación y márgenes erosionados**



**Foto # 20: Material Granular Grueso del fondo del cauce**

Para proteger el puente de los efectos erosivos en las márgenes se han colocado gaviones en ambos lados del río (ver Foto # 21).

La cuenca de drenaje hasta el sitio de ubicación del puente tiene una extensión de 16.70km<sup>2</sup> y el caudal es de 77.30 m<sup>3</sup>/s, aproximadamente.



**Foto # 21 Gaviones para protección de las márgenes**

### 3.1.6 Río Maldonado

El Río Maldonado cuenta con un puente localizado en la abscisa 72+300 de la carretera Esmeraldas - Pedernales construido en concreto reforzado de 32.00 m de longitud, (ver Foto # 22), sin apoyos intermedios, con sus estribos fuera del cauce ubicados en las coordenadas 609916m. Este, 10047966m. Norte (UTM WGS84 ZONA 17N) y 609922m. Este, 10047935m. Norte, cuya rasante se encuentra en la cota 12.90 m y la cuerda inferior de los elementos de la superestructura en la cota 10.79 m.



Foto # 22: Vista General Puente Río Maldonado

El cauce del río en el sitio del puente y en su entorno es de tipo definido pero de irregular geometría, observándose erosión en sus márgenes y la presencia de abundante vegetación, (ver Foto # 23).



**Foto # 23: Abundante vegetación y márgenes erosionados**

En el lecho del río se encuentra material granular grueso no cohesivo (ver Foto # 24) y en sus márgenes principalmente arcilla. El río se desplaza formando meandros de suave curvatura y el puente existente se encuentra en un tramo recto del río y cuyo eje es aproximadamente perpendicular al eje del cauce. Para proteger el puente de los efectos erosivos en las márgenes

se han colocado protecciones tipo bolsacretos que se encuentran en mal estado (ver Foto # 25).

La cuenca de drenaje hasta el sitio de ubicación del puente tiene una extensión de 3.00 km<sup>2</sup> y el caudal es de 34.70 m<sup>3</sup>/s, aproximadamente.



**Foto # 24: Abundante vegetación y márgenes erosionados**



Foto # 25: Márgenes erosionados, protección de bolsacreto en mal estado

### 3.1.7 Río Repartidero

Para cruzar el Río Repartidero existe un puente localizado en la abscisa 62+980 de la carretera Esmeraldas - Pedernales construido en concreto reforzado de 40.00 m de longitud, (ver Foto # 26), sin apoyos intermedios, con sus estribos fuera del cauce ubicados en las coordenadas 614584m. Este, 10054625m. Norte (UTM WGS84 ZONA 17N) y 614548m. Este, 10054602m. Norte, cuya rasante se encuentra en la cota 11.99 m y la cuerda inferior de los elementos de la superestructura en la cota 9.46 m.



**Foto # 26: Vista General Puente Río Repartidero**

El cauce del río en el sitio del puente y en su entorno es de tipo definido pero de irregular geometría, observándose erosión en sus márgenes y la presencia de abundante vegetación, (ver Foto # 27).



**Foto # 27: Abundante vegetación y márgenes erosionados**

En el lecho del río se encuentra material granular no cohesivo mezclado con finos (ver Foto # 28) y en sus márgenes principalmente arcilla. El río se desplaza formando meandros de suave curvatura y el puente existente se encuentra ubicado en uno de ellos y es aproximadamente perpendicular al eje del cauce. Para proteger el puente de los efectos erosivos en las márgenes se han colocado gaviones en ambas márgenes (ver Foto # 29).

La cuenca de drenaje hasta el sitio de ubicación del puente tiene una extensión de 76.10 km<sup>2</sup> y el caudal es de 245.60 m<sup>3</sup>/s, aproximadamente.



**Foto # 28: Material Granular Grueso del fondo del cauce**

Según la información hidro - meteorológica existente, la precipitación media interanual es del orden de 2000 mm, con un período seco entre los meses de junio a noviembre.



**Foto # 29: Márgenes erosionados, protección de bolsacreto en mal estado**

Los ríos no disponen de información foronómica, es decir no disponen de información acerca de las corrientes de líquido, de tal manera que para la estimación de caudales se han utilizado modelos lluvia-escorrimento, como el “Hidrograma Unitario”, aplicando las ecuaciones pluviométricas desarrolladas por el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI).

El caudal se ha estimado para un periodo de retorno de 100 años y los resultados obtenidos, cuyo detalle se presenta en la siguiente tabla.

Tabla IX Datos Hidrológicos E Hidráulicos Existentes

DATOS HIDROLÓGICOS- HIDRÁULICOS	RÍOS						
	BILSA	GUACHAL	TONCHIGÜE	AGUAS CLARAS	DAULE	MALDONADO	REPARTIDERO
Área de cuenca (km <sup>2</sup> )	35.43	55.31	44.72	11.07	16.68	3.03	76.09
Caudal máximo Tr=100 años (m <sup>3</sup> /s)	156.70	231.60	237.40	67.00	77.30	43.40	245.60
Coefficiente de rugosidad (n)	0.05	0.05	0.04	0.04	0.04	0.04	0.05
Pendiente media del cauce (S)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
D50 fondo de cauce (mm)	9.17	0.63	28.87	2.10	18.74	15.96	23.64

# **CAPÍTULO 4**

## **4 METODOLOGÍA**

Para cada uno de los casos de estudio se realizó el mismo análisis tanto para socavación local como para socavación general, y cuya metodología de cálculo está descrita en este capítulo. Sin embargo, para la explicación de dicha metodología tipo sólo se ha tomado un río tipo (Río Guachal). Los resultados de las demás modelaciones se muestran en el Capítulo 5.

## **4.1 Preparación de datos**

### **4.1.1 Topografía**

Para cada caso se verificó que los datos topográficos del sitio cubrieran el área mínima necesaria para el análisis. Para el presente estudio se contó con una topografía de aproximadamente cuatro hectáreas (200 m X 200 m), tomando como centro, el punto medio del puente, como se muestra en la Fig. 4.1 . También se tomaron los datos geométricos de la superestructura del puente, de las pilas (en caso de existir), los estribos, estructuras de protección (gaviones, enrocados, etc.).

Además de la topografía del sitio de estudio fue necesaria la cartografía de las cuencas de aportación referente al tramo del río analizado, y sus elementos tales como extensión de la cuenca, perímetros, pendientes, intensidad de lluvia y demás datos necesarios para el estudio hidrológico y posteriormente obtener el valor de caudal de diseño con el que se habría de construir los modelos para cada puente.



Fig. 4.1 Área referencial de la topografía (Google, 2014)

Se tomó como abscisa 0+000.00 del eje del río cien metros aguas abajo, y como 0+200.00 la abscisa ubicada cien metros aguas arriba. Se extrajeron las secciones transversales perpendiculares a dicho eje, cada diez metros. Una recomendación usual en este sentido es emplear una sección transversal que cubra veinticinco metros a cada lado del eje del río. Se verificó que dichas secciones transversales no se traslapen entre sí reduciendo la longitud de las secciones transversales en conflicto, especialmente en ríos con meandros muy pronunciados.

Finalmente se identificó los márgenes del cauce puesto que son datos necesarios para la generación del modelo hidrodinámico.

#### **4.1.2 Hidrología**

Los caudales de diseño y demás datos hidrológicos fueron tomados de un estudio existente, en el cual se usaron periodos de retorno de 100 años, y cuyo resumen se muestra en la Tabla X.

#### **4.1.3 Datos Geométricos del puente**

Para generar una modelación apegada a la realidad es necesario registrar los datos geométricos de la superestructura del puente, es decir: ancho y longitud de tablero, altura de vigas, distancia entre pilas, diámetro de las pilas y dimensiones de los estribos. El resumen de los datos utilizados se muestra en la Tabla XI.

#### **4.1.4 Estudio de Suelos**

Para las modelaciones hidráulicas solo es necesaria la clasificación del material del fondo y específicamente el  $D_{50}$ . Dichos valores se muestran en la Tabla XII.

Tabla X: Tabla de características geomorfológicas de las cuencas

RÍOS	CARACTERÍSTICAS GEOMORFOLÓGICAS DE LAS CUENCAS				
	Perímetro de Cuenca (km)	Área de Cuenca (km <sup>2</sup> )	Longitud de Cauce (km)	Pendiente media del Cauce	Caudal Estimado Tr=100años (m <sup>3</sup> /s)
Guachal	57.653	55.306	24.968	0.0035	231.600
Tonchigüe	50.241	44.720	17.603	0.0041	237.400
Bilsa	30.340	35.426	10.257	0.0013	156.700
Repartidero	47.049	76.089	24.366	0.0010	245.600
Maldonado	7.523	3.030	2.946	0.0040	34.700
Aguas Claras	12.845	11.071	7.128	0.0017	67.000
Daule	25.201	16.680	10.699	0.0020	77.300

Tabla XI: Tabla de características Geométricas de los puentes

<b>RÍOS</b>	<b>Longitud de puente (m)</b>	<b>Longitud tablero (m)</b>	<b>Ancho de tablero(m)</b>	<b>Cota de rasante (m.s.n.m)</b>	<b>Cota de borde inferior de viga (m.s.n.m)</b>	<b>Φ de pilas (m)</b>	<b>Distancia entre pilas</b>
Guachal	43.00	24.85	9.90	17.58	15.77	1.00	24.95
Tonchigüe	43.00	24.85	10.00	11.62	8.97	1.00	24.95
Bilsa	34.00	34.00	9.95	22.54	20.26	-	34.30
Repartidero	40.00	40.00	10.00	11.99	9.46	-	39.90
Maldonado	32.00	32.00	10.00	12.90	10.79	-	32.40
Aguas Claras	32.00	32.00	10.00	8.30	6.24	-	32.40
Daule	35.00	35.00	10.00	11.96	9.77	-	35.40

Tabla XII Características Geotécnicas del lecho de los ríos en estudio

RÍOS	DESCRIPCION	CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS DEL LECHO DEL RÍO					
		D <sub>85</sub> (mm)	D <sub>60</sub> (mm)	D <sub>50</sub> (mm)	D <sub>30</sub> (mm)	D <sub>15</sub> (mm)	D <sub>10</sub> (mm)
Guachal	Arena bien gradada con limo, gris	3.19	0.75	0.63	0.39	0.23	0.17
Tonchigue	Grava mal gradada, gris	55.21	34.92	28.87	15.04	5.20	1.95
Bilsa	Grava bien gradada con limo, amarillento	20.33	11.30	9.17	5.71	2.47	1.29
Repartidero	Grava bien gradada, gris	67.33	34.43	23.64	8.79	3.28	1.90
Maldonado	Grava bien gradada, café amarillento	42.22	20.55	15.96	6.44	1.77	0.85
Aguas Claras	Arena mal gradada con grava, gris	17.21	3.91	2.10	0.72	0.38	0.29
Daule	Grava bien gradada, café amarillento	96.77	25.00	18.74	9.86	4.60	2.68

#### **4.1.4.1 Determinación del coeficiente de la rugosidad del lecho del río**

Puesto que existe una diversidad de rugosidades a lo largo del cauce y que se posee muy poca información geotécnica, se convino que para generar las modelaciones se emplearían rugosidades representativas para cada río y para sus respectivas márgenes.

Para la determinación de la rugosidad se emplearon dos métodos:

##### **4.1.4.1.1 Método del Perímetro mojado**

Gracias a la estratigrafía obtenida en el estudio de suelos, se estima la rugosidad por tramos y midiendo el perímetro mojado y luego ponderar los resultados para obtener una rugosidad general.

##### **4.1.4.1.2 Método de Cowan (Chow, 1994)**

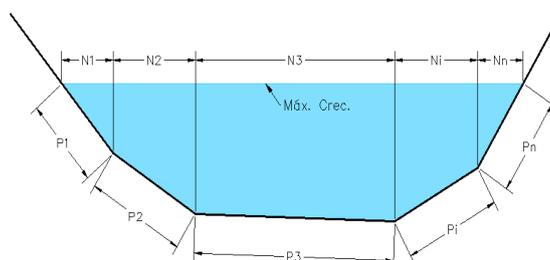
Para lo cual se estima una rugosidad básica, considerado los valores mostrados en la Tabla XIII y ciertos factores modificatorios tales como: irregularidades de paredes y fondo, vegetación, variación de forma y tamaño, obstrucciones y meandros, para obtener una rugosidad general. (Chow, 1994)

Tabla XIII Determinación del Coeficiente de rugosidad

Paso	Grado de Variación		Valores de "n" seleccionados		
			Canal principal	Margen Derecha	Margen Izquierda
"n" Básica	Canal en tierra Canal cortado en roca Canal en grava fina Canal en grava Gruesa	0.20 0.25 0.24 0.28			
Irregularidad de las paredes y el fondo	Suave Menor Moderada Severa	0.000 0.005 0.010 0.020			
Variación en tamaño y forma	Gradual Ocasional Frecuente	0.000 0.005 0.10 a 0.015			
Efecto de obstrucciones	Despreciable Menor Apreciable Severo	0.000 0.010 a 0.015 0.020 a 0.030 0.040 a 0.060			
Efecto de la vegetación	Bajo Medio Alto Muy alto	0.005 a 0.010 0.010 a 0.025 0.025 a 0.050 0.050 a 0.100			
Sub total $n_s$					
Meandro	Menor Apreciable Severo	.00 0.15 x " $n_s$ " 0.30 x " $n_s$ "			
Valor total de coeficiente "n"					

#### 4.1.4.1.3 Cálculo de Coeficiente de Rugosidad del cauce del Río Guachal

##### Cálculo de n de Manning (Método Ponderado)



$$n = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n P_i P (n_i)^{\frac{1}{6}}}{P}}$$

P <sub>i</sub>	Long (m)	n <sub>i</sub>	n <sub>i</sub> <sup>1/6</sup>	P <sub>i</sub> *n <sub>i</sub> <sup>1/6</sup>
P1	11.25	0.040	0.0016	0.0180
P2	15.21	0.035	0.0012	0.0186
P3	3.05	0.040	0.0016	0.0049
P4	3.28	0.040	0.0016	0.0052
P5	14	0.045	0.0020	0.0284
Σ	46.79			0.0751
n = 0.0401				
Cálculo de n de Manning (Cowan) (Chow, 1994)				
n Básico				0.024
Factores Modificatorios	Irregularidad de paredes y fondo			0.010
	Variación en tamaño y forma			0.005
	Efectos de obstrucción			0.000
	Efectos de vegetación			0.010
n <sub>s</sub>				0.049
Meandros				0.014
n asumido				0.063
Resultados				
Método Ponderado		Método SCS		n Asumido
0.0401		0.0630		0.0515

En la siguiente tabla se presentan los resultados de los cálculos de rugosidad y los valores asumidos para las modelaciones

**Tabla XIV Resumen de Resultados de Rugosidad**

<b>RÍOS</b>	<b>Método Ponderado</b>	<b>Método Cowan</b>	<b>n Asumido</b>
Guachal	0.0401	0.0630	0.0515
Tonchigüe	0.0398	0.0490	0.0444
Bilsa	0.0398	0.0630	0.0514
Repartidero	0.0368	0.0560	0.0464
Maldonado	0.0403	0.0490	0.0447
Aguas Claras	0.0305	0.056	0.0433
Daule	0.0354	0.0490	0.0422

#### **4.2 Selección de métodos**

Existe una gran variedad de métodos tanto para el cálculo de socavación general como de socavación local, todos estos empíricos, cada uno de estos métodos tiene sus propias virtudes y limitantes, sin embargo una de las más grandes restricciones al momento de seleccionar un método adecuado, es la disponibilidad de información, por lo tanto se ha considerado que los métodos que se estudian en este documento son los más oportunos tanto para la información que estos requieren y el tipo de ríos en base a los cuales se ha realizado los estudios.

Por esta razón se han escogido los siguientes métodos para la socavación general y local:

- Socavación general:

Lischtvan – Lebediev

- Socavación local

Método de Laursen – Toch

Método del Hec 18

### **4.3 Armado del modelo en HEC-RAS**

Para el armado del Modelo en el programa HEC – RAS se debe ingresar la geometría del río, tanto el eje, sentido del flujo, datos de secciones transversales y datos geométricos del puente.

#### **4.3.1 Procedimiento computacional**

EL tirante en una sección transversal se determina por una solución iterativa.

El procedimiento es el siguiente

1. Asumir una profundidad de agua de la sección trasversal aguas arriba (y aguas abajo si se sospecha que pudiera estar el cálculo bajo régimen supercrítico)

2. Basado en la profundidad asumida, determinar la correspondiente altura de velocidad (Bernoulli).

3. Con los valores del paso anterior se determina  $S_f$  y se resuelve la ecuación 2 para  $h_e$ .

Con los valores de los pasos 2 y 3 se resuelve la ecuación que calcula la superficie de agua.

Se compara los valores de superficie de agua con los valores asumidos en el paso 1, y se repite el paso 1 hasta que los valores sean cercanos a 0.01 pies o 0.003m o los definidos por el usuario.

El programa está restringido a realizar un proceso iterativo con un máximo de 20 iteraciones. Si el programa no alcanza a conseguir valores cercanos a los definidos utilizara el último valor calculado.

Para valores subcríticos se realiza un chequeo preliminar del régimen de flujo considerando el número de Froude

#### **4.3.2 Ingreso de datos geométricos de los ríos y puentes**

Los datos topográficos de campo fueron pre-procesados usando el software AUTODESK CIVIL 3D, y luego fueron exportados hacia HEC – RAS. En este sentido es recomendable tener datos de al menos 500 m. aguas arriba y 500

m. aguas abajo del puente en estudio. Esto evitaría que el programa calcule erróneamente situaciones como por ejemplo ondas de rebote al llegar a las condiciones de borde. Más debido a cuestiones de presupuesto en general se tuvo información topografía solo 100 m aguas arriba y 100 m. aguas debajo de cada estructura. Por este motivo fue necesario generar secciones sintéticas más alejadas de los puentes hasta 500 m aguas arriba y aguas abajo, manteniendo la pendiente media del cauce para evitar alterar significativamente las condiciones del flujo. Además, para evitar pérdida de información se requirió interpolar secciones auxiliares en los tramos antes mencionados, dando como resultado una longitud de río de 1200 m, tal como se muestra en la Fig. 4.2

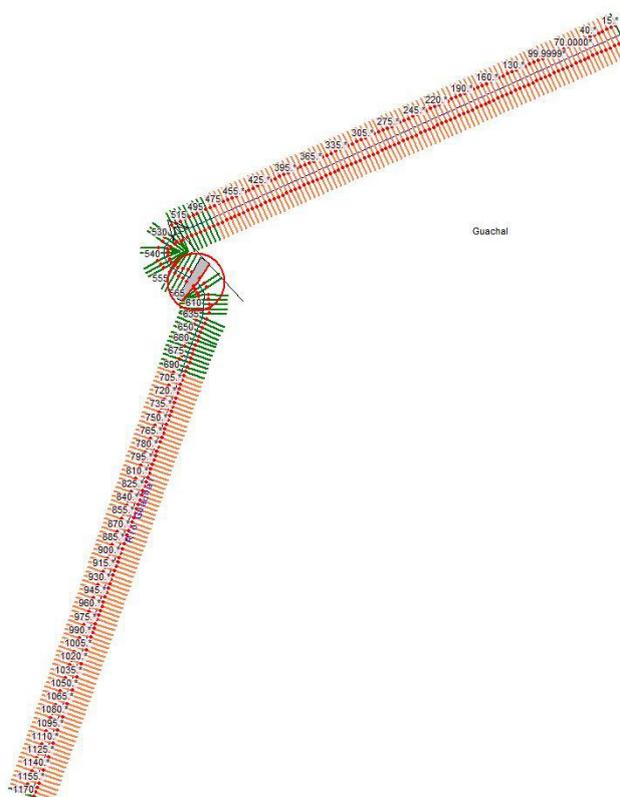


Fig. 4.2 Topografía del Río y Puente

A continuación se ingresaron los datos de la geometría del puente tales como: cota de rasante, cota de la cuerda inferior de la viga, número de pilas, distancia entre pilas, diámetro de las pilas.

Fig. 4.3 Datos geométricos del puente

Se ingresaron los datos del tablero del puente como: ancho de tablero (width), distancia entre el borde aguas arriba del puente hasta la sección transversal inmediata aguas arriba del puente.

Distance	Width	Weir Coef
0.05	9.9	1.4

Clear Del Row Ins Row Copy US to DS

Upstream			Downstream			
	Station	high chord	low chord	Station	high chord	low chord
1	0.	17.58	15.77	0.	17.58	15.77
2	49.392	17.58	15.77	49.801	17.58	15.77
3						
4						
5						

Fig. 4.4 Datos geométricos del Tablero del puente

**Pier Data Editor**

Add Copy Delete Pier #

Del Row Centerline Station Upstream

Ins Row Centerline Station Downstream

Floating Pier Debris

All On ... All Off ...  Apply floating debris to this pier

Set Wd/Ht for all ... Debris Width:

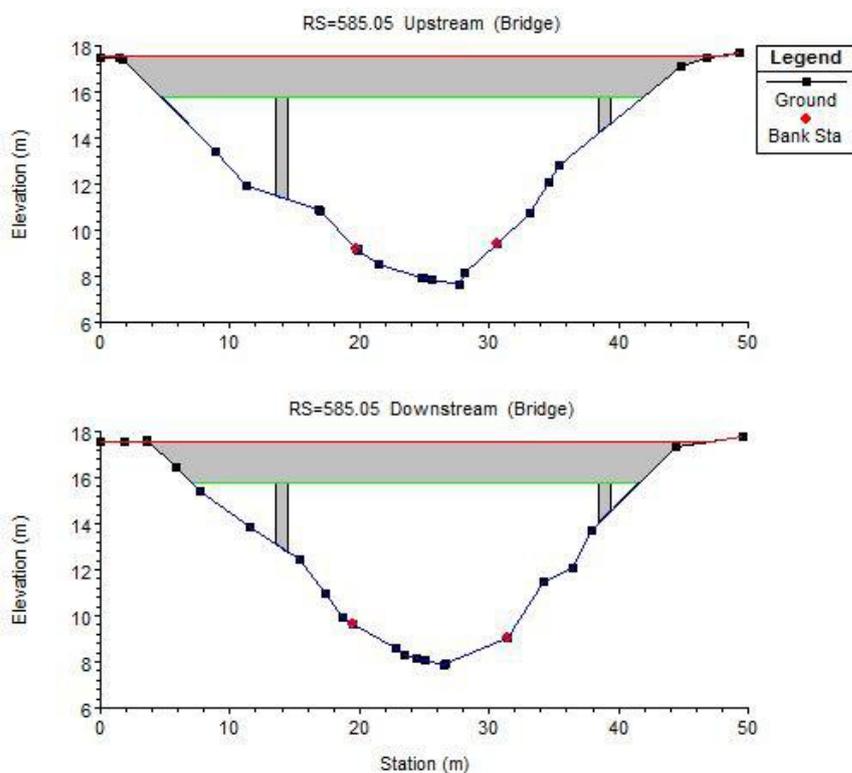
Debris Height:

	Upstream		Downstream	
	Pier Width	Elevation	Pier Width	Elevation
1	1.	7.471	1.	7.471
2	1.	15.77	1.	15.77
3				
4				
5				

OK Cancel Help Copy Up to Down

Select the Pier to Edit

**Fig. 4.5** Datos geométricos de las pilas



**Fig. 4.6** Esquema final de modelación de uno de los puentes en estudio

De acuerdo a lo convenido en la sección 4.1.4.1 se ingresaron los valores de coeficiente de rugosidad determinados para el canal principal, y cada una de las márgenes.

Channel n Values have a light green background

	River Station	Frctn (n/K)	n #1	n #2	n #3
1	1170	n	0.065	0.0515	0.065
2	1165.*	n	0.065	0.0515	0.065
3	1160.*	n	0.065	0.0515	0.065
4	1155.*	n	0.065	0.0515	0.065
5	1150.*	n	0.065	0.0515	0.065
6	1145.*	n	0.065	0.0515	0.065
7	1140.*	n	0.065	0.0515	0.065
8	1135.*	n	0.065	0.0515	0.065
9	1130.*	n	0.065	0.0515	0.065
10	1125.*	n	0.065	0.0515	0.065
11	1120.*	n	0.065	0.0515	0.065
12	1115.*	n	0.065	0.0515	0.065
13	1110.*	n	0.065	0.0515	0.065
14	1105.*	n	0.065	0.0515	0.065
15	1100.*	n	0.065	0.0515	0.065

Fig. 4.7 Datos de rugosidad de los márgenes y canal principal

Se deben ingresar los datos para el flujo estacionario (*“steady state”*), el caudal de diseño fue extraído del estudio hidrológico antes mencionado. Además, se debe ingresar las condiciones de frontera necesarias. Para los casos en estudio, estas condiciones se deben ubicar tanto aguas arriba como aguas abajo, ya que se sospechó que el flujo estaría bajo régimen subcrítico.

Como no existe información de campo suficiente para el armado del modelo se ha considerado como condición de frontera el tirante normal (pendiente de fondo invariable).

**Steady Flow Data - guachal**

File Options Help

Enter/Edit Number of Profiles (25000 max):

**Locations of Flow Data Changes**

River:

Reach:  River Sta.:

Flow Change Location			Profile Names and Flow Rates	
	River	Reach	RS	Tr=100años
1	Rio Guachal	Guachal	1170	231.6

---

**Steady Flow Boundary Conditions**

Set boundary for all profiles  Set boundary for one profile at a time

**Available External Boundary Condition Types**

**Selected Boundary Condition Locations and Types**

River	Reach	Profile	Upstream	Downstream
Rio Guachal	Guachal	all		Normal Depth $S = 0.0035$

Select Boundary condition for the downstream side of selected reach.

**Fig. 4.8 Datos del Flujo Estacionario y Condiciones de Frontera**

Una vez ingresada la información anterior, se corrió la y se obtuvieron valores de velocidades, áreas hidráulicas, tirantes, etc. Estas variables son requeridas por el programa para realizar el cálculo de la socavación en el puente.

#### **4.4 Estimación de la Socavación general**

La socavación estimada se la clasifica como erosión general transitoria y erosión general a largo plazo. La primera ocurre al paso de una avenida y la segunda, usualmente es generada por acciones antropogénicas, difíciles de anticipar en el estudio de un puente. Consecuentemente el estudio se ha limitado a la estimación de la socavación general transitoria, utilizando para el efecto varios procedimientos que se detallan a continuación, considerando que de acuerdo a los estudios geotécnicos el material del lecho del río es granular, no cohesivo ( $D_{50}= 9.17$  mm)

##### **4.4.1 Criterio de Lischtván – Lebediev:**

Para el presente caso de estudio, se ha decidido calcular la socavación general en cuatro abscisas del puente: la primera ubicada en el extremo aguas arriba del río (ABSC 0+690), la segunda ubicada en la abscisa ubicada inmediatamente aguas arriba del borde del puente (ABSC 0+595), la tercera ubicada en la abscisa inmediata aguas abajo del borde del puente (ABSC 0+585) y la ultima en el extremo aguas abajo del río (ABSC 0+475). A continuación se muestra la metodología de cálculo de la abscisa 0+580 y los resultados obtenidos de la misma, todos los resultados adicionales obtenidos de las demás abscisas y puentes serán mostrados en el capítulo 5.

El procedimiento a seguir es el siguiente:

**DATOS:**

$$Q_D = 231,6 \text{ (m}^3\text{/s)}$$

$$A = 94,14 \text{ (m}^2\text{)}$$

$$B_e = 26.45 \text{ (m)}$$

$$Y_m = A/B_e \text{ (m)} = 3.59 \text{ (m)}$$

$$\mu = 1,00$$

$$\beta = 1 \text{ (Tr= 100 años)}$$

$$d_m = 0,63 \text{ (mm)}$$

$$x = 0,4074$$

$$\alpha = \frac{Q_D}{y_m^{5/3} B_e \mu} = \frac{231,6}{3,5440^{5/3} (26,45) 1,00} = 1,0628$$

$$y_s = \left[ \frac{\alpha y_0^{5/3}}{0.68 \beta d_m^{0.28}} \right]^{1/(1+x)} = \left[ \frac{(1,0628) y_0^{5/3}}{0.68 (1) 0,63^{0.28}} \right]^{1/(1+0,4074)} = \left[ 1,7788 y_0^{5/3} \right]^{0,7129}$$

Los resultados obtenidos indican que la socavación general varía entre 0.86 y 6.38 m.

**Tabla XV Resultados de la socavación por el Método Lischtván - Lebediev**

Dist. a CL (m)	Elevación (m.s.n.m.)	$y_0$ (m)	$y_s$ (m)	$y_s - y_0$ (m)	Cota de Perfil de Socavación (m.s.n.m)
-9.66	12.43	1.41	2.27	0.86	11.57
-7.59	10.94	2.90	5.34	2.44	8.50
-6.32	9.96	3.88	7.55	3.67	6.29
-2.20	8.59	5.25	10.82	5.57	3.02
-1.50	8.28	5.56	11.58	6.02	2.26
-0.58	8.12	5.72	11.98	6.26	1.86
0.00	8.04	5.80	12.18	6.38	1.66
1.49	7.84	6.00	12.68	6.68	1.16
1.62	7.91	5.93	12.50	6.57	1.34
6.42	9.01	4.83	9.80	4.97	4.04
9.23	11.51	2.33	4.12	1.79	9.72
11.48	12.05	1.79	3.01	1.22	10.83

#### 4.4.2 Método de Laursen

Para estimar la altura de socavación por este método es necesario antes calcular la velocidad crítica para compararla con la velocidad del río, y de esta manera determinar qué tipo de socavación se podría producir, ya sea esta en agua clara (clear water) o lecho vivo (live bed)

$$V_c = K_u y^{1/6} D_{50}^{1/3}$$

$K_u = 6,19 \text{ SI m-kg-s}$

$$y = 6,01 \text{ m}$$

$$D_{50} = 0,0063 \text{ m}$$

$$V = 3,07 \text{ m/s}$$

$$V_c = 6,19 \left( 6,01^{\frac{1}{6}} \right) 0,0063^{\frac{1}{3}} = 0,72 \text{ m/s}$$

$$V_c < V \therefore \text{"Lecho Vivo"}$$

Habiendo determinado el tipo de socavación por contracción que se produciría se procede a calcular la altura de ésta.

#### 4.4.2.1 Cálculo de socavación por contracción en "Lecho Vivo"

$$\frac{y_2}{y_1} = \left( \frac{Q_2}{Q_1} \right)^{6/7} \left( \frac{W_2}{W_1} \right)^e$$

$$y_s = y_2 - y_0$$

$$y_1 = 6,32 \text{ (m)}$$

$$y_0 = 6,01 \text{ (m)}$$

$$Q_1 = Q_2 = 231,60 \text{ (m}^3\text{/s)}$$

$$W_1 = 29,94 \text{ (m)}$$

$$W_2 = 26,45 \text{ (m)}$$

$$V_* = (g y_1 S_1)^{1/2}$$

$$V_* = (9,81(6,32)0,002288)^{1/2} = 0,38$$

$$w = 0,09 \text{ m/s}$$

$$g = 9,81 \text{ m/s}^2$$

$$S_1 = 0,002288 \text{ m/m}$$

$$\frac{V_*}{\omega} = 4,32 \therefore e = 0,69$$

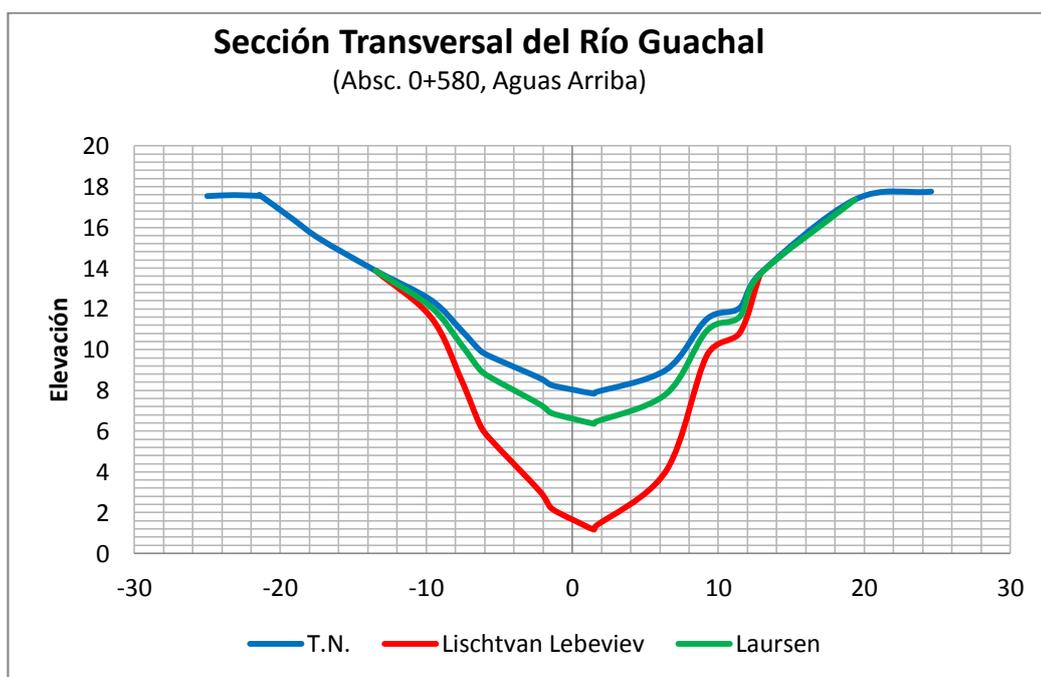
$$\frac{y_2}{6,32} = \left(\frac{231,6}{231,6}\right)^{6/7} \left(\frac{29,94}{26,45}\right)^{0,69}$$

$$y_2 = 1,08(6,32) = 6,88 \text{ m}$$

$$y_s = y_2 - y_0$$

$$y_s = 6,88 - 6,01 = 0,87 \text{ m}$$

Para el presente caso, se muestra una gráfica comparativa entre el método de Lischtván – Lebediev y el método de Laursen:



**Figura N° 5:** Gráfico comparativo de perfiles de socavación.

## 4.5 Estimación de la Socavación local

### 4.5.1 Método del HEC - 18

Considerando que de acuerdo a los estudios geotécnicos el material existente es no cohesivo, para el cálculo se ha utilizado la ecuación recomendada para este suelo por la Federal Highway Administration (FHWA) contenida en el HEC-18.

$$F_r = \frac{V_1}{(g y_1)^{1/2}}$$

$$F_r = \frac{2,78}{(9,81 (2,33))^{1/2}} = 0,468$$

$$V_1 = 2,78 \text{ m/s}^2$$

$$g = 9,81 \text{ (m/s}^2\text{)}$$

$$\frac{y_s}{y_1} = 2.0 K_1 K_2 K_3 \left(\frac{a}{y_1}\right)^{0.65} F_r^{0.43}$$

$$y_s = \left( 2.0 (1) 1(1,1) \left(\frac{1}{2,33}\right)^{0.65} 0,468^{0,43} \right) 2,33 = 2,13 \text{ m}$$

$$y_s \leq 2,4$$

$$y_1 = 2,33 \text{ (m)}$$

$$K_1 = 1$$

$$K_2 = 1$$

$$K_3 = 1,1$$

$$a = 1 \text{ (m)}$$

$$L = 2 \text{ (m)}$$

#### 4.5.2 Método Laursen – Toch

Para el presente caso, la dirección de ataque del flujo de agua es prácticamente paralela al eje de pilas del puente, por lo que la metodología de cálculo es la siguiente:

$$y_s = K_1(i)a$$

Dónde:

$$K_1 = 0.90$$

$$\text{Relación } Hs/b = 2.33 \text{ m}/1.00 \text{ m}$$

$$i = 1.90$$

$$a = 1.00 \text{ m}$$

$$y_s = (0.90)(1.90)(1.00) = 1.71 \text{ m}$$

# **CAPÍTULO 5**

## **5 DISCUSIÓN**

### **5.1 Socavación General**

Para la estimación de la socavación general se determinaron varios parámetros, entre ellos la rugosidad del lecho del río, los cuales se muestran a continuación:

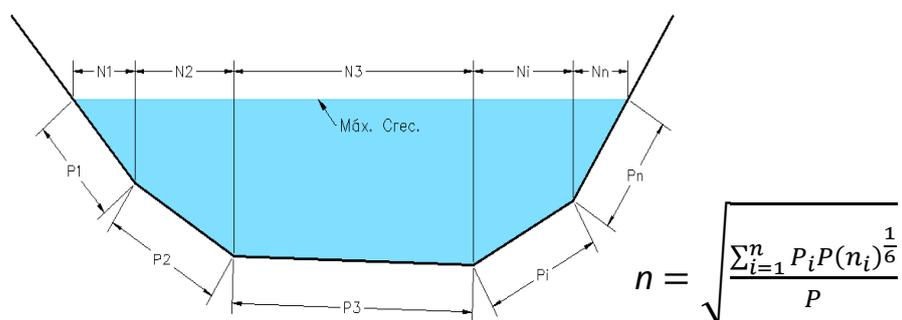
### 5.1.1 Determinación de la rugosidad del lecho *del río*

**Tabla XVI Resumen de Resultados de Rugosidad**

<b>RÍOS</b>	<b>Método Ponderado</b>	<b>Método de Cowan</b>	<b>n Asumido</b>
Guachal	0.0401	0.0630	0.0515
Tonchigüe	0.0398	0.0490	0.0444
Bilsa	0.0398	0.0630	0.0514
Repartidero	0.0368	0.0560	0.0464
Maldonado	0.0403	0.0490	0.0447
Aguas Claras	0.0305	0.056	0.0433
Daule	0.0354	0.0490	0.0422

### 5.1.1.1 Cálculo de Coeficiente de Rugosidad del cauce del Río Guachal

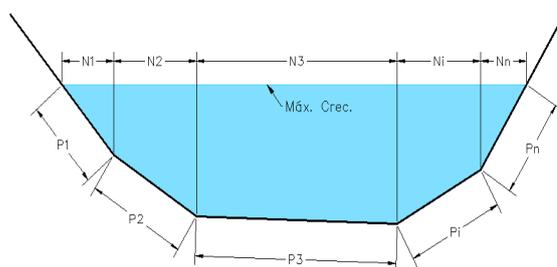
#### Cálculo de n de Manning (Método Ponderado)



P <sub>i</sub>	Long (m)	n <sub>i</sub>	n <sub>i</sub> <sup>(1/6)</sup>	P <sub>i</sub> *n <sub>i</sub> <sup>1/6</sup>
P1	11.25	0.040	0.0016	0.0180
P2	15.21	0.035	0.0012	0.0186
P3	3.05	0.040	0.0016	0.0049
P4	3.28	0.040	0.0016	0.0052
P5	14	0.045	0.0020	0.0284
Σ	46.79			0.0751
n = 0.0401				
Cálculo de n de Manning Cowan, (Chow, 1994)				
n Básico				0.024
Factores Modificatorios	Irregularidad de paredes y fondo			0.010
	Variación en tamaño y forma			0.005
	Efectos de obstrucción			0.000
	Efectos de vegetación			0.010
n <sub>s</sub>				0.049
Meandros				0.014
n asumido				0.063
Resultados				
Método Ponderado		Método Cowan		n Asumido
0.0401		0.0630		0.0515

### 5.1.1.2 Cálculo de Coeficiente de Rugosidad del cauce del Río Tonchigüe

#### Cálculo de n de Manning (Método Ponderado)

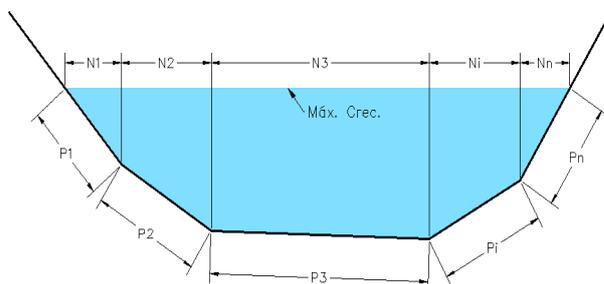


$$n = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n P_i P (n_i)^{\frac{1}{6}}}{P}}$$

$P_i$	Long (m)	$n_i$	$n_i^{1/6}$	$P_i * n_i^{1/6}$
P1	12.35	0.040	0.0016	0.0198
P2	11.29	0.035	0.0012	0.0138
P3	9.45	0.040	0.0016	0.0151
P4	3.28	0.040	0.0016	0.0052
P5	8.22	0.045	0.0020	0.0166
$\Sigma$	44.59			0.0706
$n = 0.0398$				
Cálculo de n de Manning (Cowan) (Chow, 1994)				
n Básico				0.024
Factores Modificatorios	Irregularidad de paredes y fondo			0.000
	Variación en tamaño y forma			0.010
	Efectos de obstrucción			0.000
	Efectos de vegetación			0.015
$n_s$				0.049
Meandros				0.000
n asumido				0.049
Resultados				
Método Ponderado		Método Cowan		n Asumido
0.0398		0.0490		0.0444

### 5.1.1.3 Cálculo de Coeficiente de Rugosidad del cauce del Río Bilsa

#### Cálculo de n de Manning (Método Ponderado)



$$n = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n P_i P (n_i)^{\frac{1}{6}}}{P}}$$

P <sub>i</sub>	Long (m)	n <sub>i</sub>	n <sub>i</sub> <sup>1/6</sup>	P <sub>i</sub> *n <sub>i</sub> <sup>1/6</sup>
P1	7.23	0.040	0.0016	0.0116
P2	6.54	0.035	0.0012	0.0080
P4	8.26	0.040	0.0016	0.0132
P5	4.15	0.045	0.0020	0.0084
Σ	36.05			0.0570

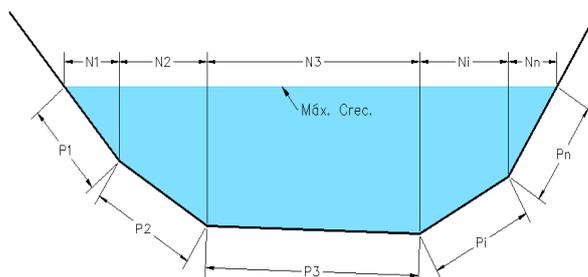
$$n = 0.0398$$

#### Cálculo de n de Manning (Cowan) (Chow, 1994)

n Básico		0.024
Factores Modificatorios	Irregularidad de paredes y fondo	0.000
	Variación en tamaño y forma	0.010
	Efectos de obstrucción	0.000
	Efectos de vegetación	0.015
n <sub>s</sub>		0.049
Meandros		0.014
n asumido		0.063
<b>Resultados</b>		
Método Ponderado	Método Cowan	n Asumido
0.0398	0.0630	0.0514

### 5.1.1.4 Cálculo de Coeficiente de Rugosidad del cauce del Río Repartidero

#### Cálculo de n de Manning (Método Ponderado)

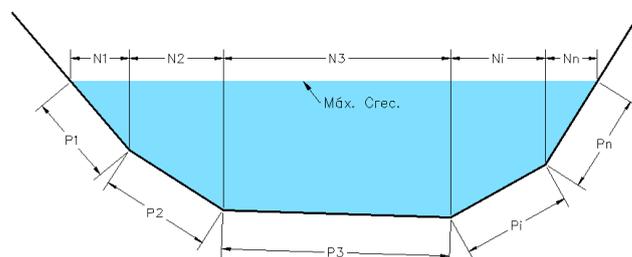


$$n = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n P_i P (n_i)^{\frac{1}{6}}}{P}}$$

P <sub>i</sub>	Long (m)	n <sub>i</sub>	n <sub>i</sub> <sup>(1/6)</sup>	P <sub>i</sub> *n <sub>i</sub> <sup>1/6</sup>
P1	4.67	0.040	0.0016	0.0074
P2	2.36	0.030	0.0009	0.0021
P3	8.12	0.045	0.0020	0.0164
P4	15.26	0.030	0.0009	0.0137
P5	5.32	0.040	0.0016	0.0085
Σ	35.73			0.0482
n = 0.0368				
Cálculo de n de Manning (Cowan) (Chow, 1994)				
n Básico				0.028
Factores Modificatorios	Irregularidad de paredes y fondo			0.005
	Variación en tamaño y forma			0.005
	Efectos de obstrucción			0.000
	Efectos de vegetación			0.010
n <sub>s</sub>				0.048
Meandros				0.008
n asumido				0.056
Resultados				
Método Ponderado		Método Cowan		n Asumido
0.0368		0.0560		0.0464

### 5.1.1.5 Cálculo de Coeficiente de Rugosidad del cauce del Río Maldonado

#### Cálculo de n de Manning (Método Ponderado)

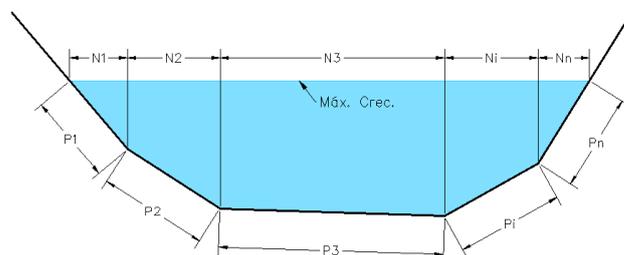


$$n = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n P_i P(n_i)^{\frac{1}{6}}}{P}}$$

$P_i$	Long (m)	$n_i$	$n_i^{(1/6)}$	$P_i * n_i^{1/6}$
P1	5.75	0.040	0.0016	0.0092
P2	2.96	0.035	0.0012	0.0036
P3	4.76	0.045	0.0020	0.0096
P4	10.42	0.040	0.0016	0.0166
P5	11.25	0.040	0.0016	0.0180
$\Sigma$	35.14			0.057137
$n = 0.0403$				
Cálculo de n de Manning (Cowan) (Chow, 1994)				
n Básico				0.024
Factores Modificatorios	Irregularidad de paredes y fondo			0.005
	Variación en tamaño y forma			0.010
	Efectos de obstrucción			
	Efectos de vegetación			0.010
$n_s$				0.049
Meandros				0.000
n asumido				0.049
Resultados				
Método Ponderado		Método Cowan		n Asumido
0.0403		0.0490		0.0447

### 5.1.1.6 Cálculo de Coeficiente de Rugosidad del cauce del Río Aguas Claras

#### Cálculo de n de Manning (Método Ponderado)

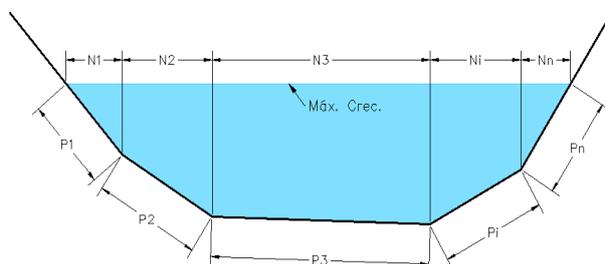


$$n = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n P_i P (n_i)^{\frac{1}{6}}}{P}}$$

P <sub>i</sub>	Long (m)	n <sub>i</sub>	n <sub>i</sub> <sup>1/6</sup>	P <sub>i</sub> *n <sub>i</sub> <sup>1/6</sup>
P1	5.23	0.035	0.0012	0.0064
P2	2.65	0.025	0.0006	0.0017
P3	3.15	0.030	0.0009	0.0028
P4	12.16	0.030	0.0009	0.0109
P5	8.19	0.030	0.0009	0.0074
Σ	31.38			0.0292
n=0.0305				
Cálculo de n de Manning (Cowan) (Chow, 1994)				
n Básico				0.024
Factores Modificatorios	Irregularidad de paredes y fondo			0.005
	Variación en tamaño y forma			0.005
	Efectos de obstrucción			
	Efectos de vegetación			0.010
n <sub>s</sub>				0.048
Meandros				0.008
n asumido				0.056
<b>Resultados</b>				
Método Ponderado		Método Cowan		n Asumido
0.0305		0.056		0.0433

### 5.1.1.7 Cálculo de Coeficiente de Rugosidad del cauce del Río Daule

#### Cálculo de n de Manning (Método Ponderado)



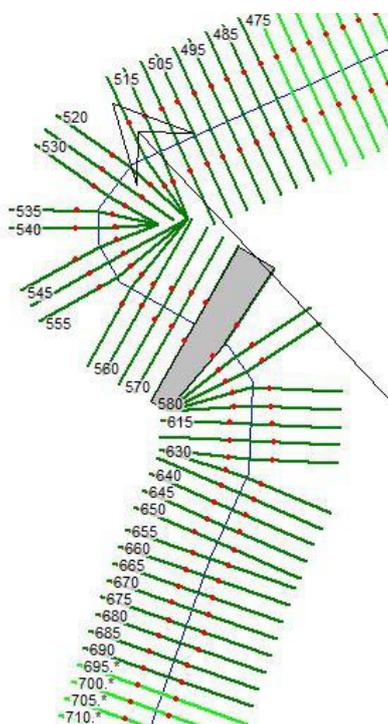
$$n = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n P_i P (n_i)^{\frac{1}{6}}}{P}}$$

$P_i$	Long (m)	$n_i$	$n_i^{1/6}$	$P_i \cdot n_i^{1/6}$
P1	4.75	0.03	0.0009	0.004275
P2	8.2	0.03	0.0009	0.00738
P3	4.45	0.04	0.0016	0.00712
P4	8.53	0.033	0.001089	0.00928917
P5	12.43	0.04	0.0016	0.019888
$\Sigma$	38.36			0.04795217
n=0.0354				
Cálculo de n de Manning (Cowan) (Chow, 1994)				
n Básico				0.0240
Factores Modificatorios	Irregularidad de paredes y fondo			0.0100
	Variación en tamaño y forma			0.0050
	Efectos de obstrucción			0.0000
	Efectos de vegetación			0.0100
$n_s$				0.0490
Meandros				0.0000
n asumido				0.0490
Resultados				
Método Ponderado		Método Cowan		n Asumido
0.0354		0.0490		0.0422

## 5.1.2 Resultados del análisis de socavación

### 5.1.2.1 Río Guachal

Para el análisis de Socavación general, fue necesario contar con las variables requeridas por los métodos empleados para la estimación de la socavación general. Dichos datos fueron extraídos de la modelación en el programa HEC – RAS.

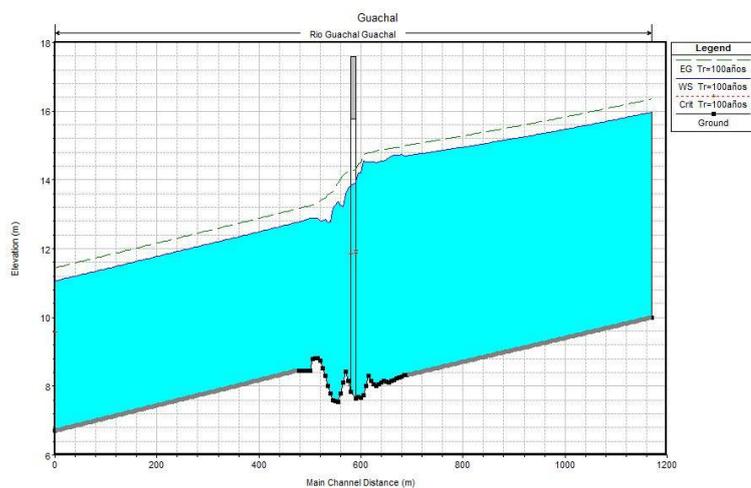


**Fig. 5.1 Vista en Planta del modelo del Río Guachal, en HEC – RAS. Ubicación del puente en color gris**

Las secciones escogidas en este río para el análisis de socavación general son las ubicadas en las abscisas 0+680 (aguas arriba), 0+590 (borde aguas

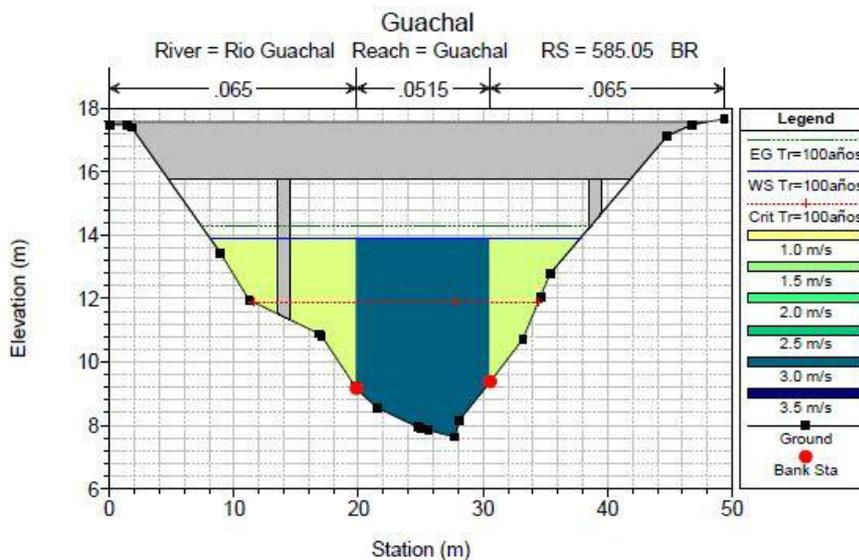
arriba del puente), 0+580 (borde aguas abajo del puente), 0+480 (aguas abajo).

A continuación se muestra el gráfico de cada una de las secciones antes mencionadas con su respectiva distribución de velocidades tanto en el canal principal como en las márgenes izquierda y derecha.



**Fig. 5.2 Perfil longitudinal del Río Guachal, en HEC –RAS**

El gráfico anterior (Fig. 5.2) muestra el efecto de “represa” que causa el puente al río. Esto provoca que el flujo se ralentice aguas arriba del puente, y que aguas abajo se acelere, con las consabidas consecuencias en cuanto a posibles depositaciones y socavaciones, respectivamente



**Fig. 5.3 Sección Transversal (ABS 0+590)**

En la Fig. 5.3 se puede apreciar que el puente no fue concebido en la ubicación más idónea de acuerdo a las circunstancias del entorno del río Guachal. Las pilas, sobre todo la izquierda, pudieron haberse colocado completamente fuera del cauce para evitar el fenómeno de socavación local.

Además, la Fig. 5.1 Vista en Planta del modelo del Río Guachal, en HEC – RAS. Ubicación del puente en color gris muestra que el puente está ubicado sobre un meandro del río, el cual, por naturaleza geomorfológica, tenderá a socavar sobre el lado convexo de la curva. Una solución integral (aunque probablemente no la más económica) a estos posibles problemas podría ser la reubicación del puente a un tramo recto del río.

En la tabla siguiente se muestran los resultados de los análisis hidráulicos realizados a las secciones de estudio.

**Tabla XVII Datos obtenidos de la modelación con el programa HEC – RAS**

Abscisa	Elevación mínima de canal (m)	Nivel de Superficie de Agua (m)	Perfil de energía (m)	Pendiente de perfil de energía (m/m)	Velocidad del Canal (m/s)	Área Hidráulica (m <sup>2</sup> )	Ancho Superficie de Agua (m)	# Froude
680	8.27	14.73	14.96	0.001626	2.41	129.53	36.35	0.31
590	7.63	13.95	14.30	0.002417	2.89	106.11	29.94	0.39
580	7.83	13.84	14.26	0.002820	3.07	94.14	26.45	0.43
480	8.46	12.79	13.18	0.003565	2.85	91.68	30.34	0.46

#### **5.1.2.1.1 Socavación en la abscisa 0+680 Aguas arriba**

Los resultados del análisis hidráulico requeridos para el cálculo de socavación son los siguientes:

WS (m)	D50 (mm)	Q (m <sup>3</sup> /s)	A (m <sup>2</sup> )	B (m)	Hm (m)	U
14.70	0.39	231.60	112.03	32.60	3.44	1.00

#### **5.1.2.1.1.1 Método de Lischtvan – Lebediev**

En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos por este método, donde  $y_s$  es la altura de socavación más el tirante en ese punto.

**Tabla XVIII Cálculo de Socavación por Lischtvan – Lebediev en el Río Guachal (ABS. 0+680)**

Dist. a CL (m)	Elevación (m.s.n.m.)	$y_0$ (m)	$y_s$ (m)	$y_s - y_0$ (m)	Cota de Perfil de Socavación (m.s.n.m)
-22.92	14.40	0.33	0.33	0.00	14.40
-20.94	13.60	1.13	1.44	0.31	13.29
-16.75	12.61	2.12	3.05	0.93	11.68
-7.24	10.45	4.28	7.02	2.74	7.71
-5.98	10.02	4.71	7.87	3.16	6.86
-4.55	9.37	5.36	9.17	3.81	5.56
-2.26	8.33	6.40	11.32	4.92	3.41
3.44	8.41	6.32	11.16	4.84	3.57
4.05	8.75	5.98	10.45	4.47	4.28
4.73	9.13	5.60	9.66	4.06	5.07
5.74	10.40	4.33	7.12	2.79	7.61
6.30	10.84	3.89	6.27	2.38	8.46
8.71	12.13	2.60	3.88	1.28	10.85

#### 5.1.2.1.1.2 Método de Laursen

El análisis de la velocidad crítica (0.72 m/s) para esta abscisa en particular dio como resultado que se presentaría una socavación en Lecho Vivo.

En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos por este método, donde  $y_s$  es la altura de socavación más el tirante en ese punto.

Tabla XIX Cálculo de Socavación por Laursen en el Río Guachal (ABS. 0+680)

Dist. a CL (m)	Elevación (m.s.n.m.)	$y_0$ (m)	$y_s$ (m)	$y_s - y_0$ (m)	Cota de Perfil de Socavación (m.s.n.m)
-22.92	14.40	0.328	0.28	-	-
-20.94	13.60	1.133	0.96	-	-
-16.75	12.61	2.122	1.80	-	-
-7.24	10.45	4.282	3.63	-	-
-6.85	10.30	4.431	3.76	-	-
-6.76	10.21	4.524	3.83	-	-
-6.50	10.06	4.667	3.96	-	-
-5.98	10.02	4.709	3.99	-	-
-4.55	9.37	5.359	4.54	-	-
-2.26	8.33	6.403	5.43	-	-
3.27	8.27	6.463	5.48	-	-
4.05	8.75	5.978	5.07	-	-
4.73	9.13	5.599	4.75	-	-
5.74	10.40	4.332	3.67	-	-
6.30	10.84	3.888	3.30	-	-
7.16	10.83	3.896	3.30	-	-
8.71	12.13	2.603	2.21	-	-

### 5.1.2.1.1.3 Comparación de métodos

Los resultados de los cálculos realizados mediante el método de Lischtvan - Lebediev muestran que existe una socavación que alcanza hasta 4.99 m. de profundidad, mientras que para el método de Laursen la socavación es nula.

Esto podría deberse a que no existe un cambio significativo entre el ancho superior entre la abscisa en estudio con su similar inmediatamente aguas arriba, variable que es preponderante en la estimación de profundidad de socavación por el método de Laursen.

Sin embargo, existe un cambio muy apreciable en los tirantes debido a la irregularidad del fondo.

A continuación se muestra un gráfico comparativo del perfil analizado donde se puede apreciar el terreno natural, el perfil socavado por el método de Lischtván – Lebediev, y aquel calculado mediante el método de Laursen:

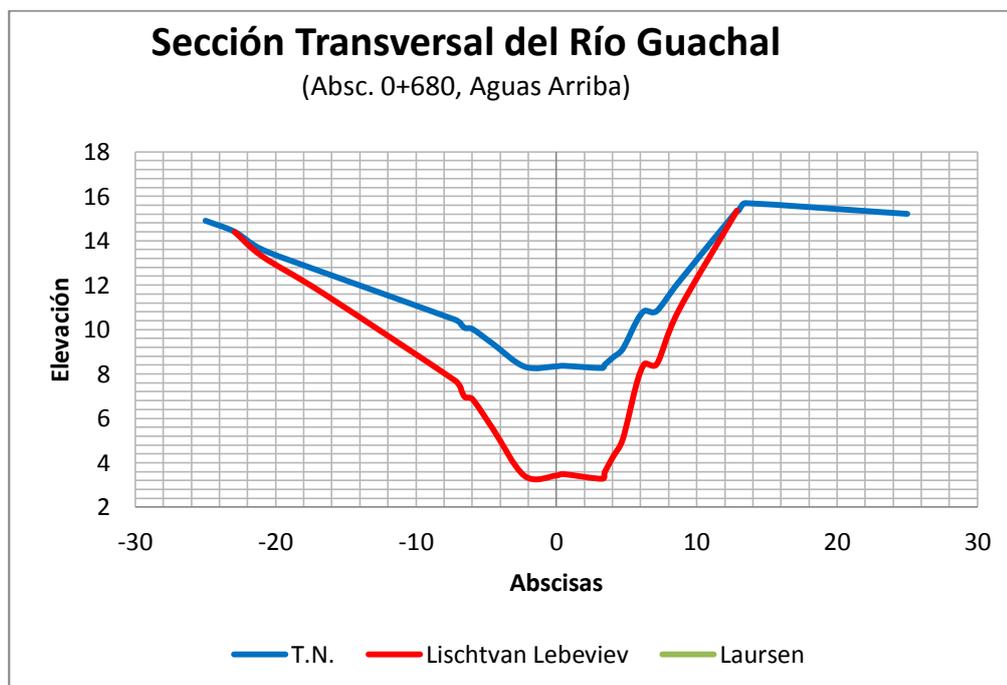


Fig. 5.4 Perfil de Socavación en la ABS (0+680)

#### 5.1.2.1.2 Socavación en la abscisa 0+590 Cara aguas arriba del puente

Los resultados del análisis hidráulico utilizados para el cálculo de socavación son los siguientes:

WS (m)	D50 (mm)	Q (m <sup>3</sup> /s)	A (m <sup>2</sup> )	B (m)	Hm (m)	U
13.95	0.39	231.60	106.11	29.94	3.54	1.00

#### 5.1.2.1.2.1 Método de Lischtván – Lebediev

En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos por este método, donde  $Y_s$  es la altura de socavación más el tirante en ese punto.

Tabla XX Cálculo de Socavación por Lischtván – Lebediev en el Río Guachal (ABS. 0+590)

Dist. a CL (m)	Elevación (m.s.n.m.)	$y_0$ (m)	$y_s$ (m)	$y_s - y_0$ (m)	Cota de Perfil de Socavación (m.s.n.m.)
-16.09	13.43	0.52	0.62	0.10	13.33
-13.78	11.95	2.00	3.09	1.09	10.86
-8.17	10.89	3.06	5.13	2.07	8.82
-5.27	9.22	4.73	8.61	3.88	5.34
-3.47	8.55	5.40	10.07	4.67	3.88
-0.20	7.94	6.01	11.44	5.43	2.51
2.74	7.63	6.32	12.14	5.82	1.81
3.08	8.16	5.79	10.94	5.15	3.01
5.58	9.38	4.57	8.26	3.69	5.69
8.20	10.73	3.22	5.45	2.23	8.50
9.61	12.07	1.88	2.88	1.00	11.07
10.37	12.78	1.17	1.64	0.47	12.31

#### 5.1.2.1.2.2 Método de Laursen

El análisis de la velocidad crítica para esta abscisa en particular dio como resultado que se presentaría una socavación en Lecho Vivo.

En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos por este método,

**Tabla XXI Cálculo de Socavación por Laursen en el Río Guachal (ABS. 0+590)**

Dist. a CL (m)	Elevación (m.s.n.m.)	$y_0$ (m)	$y_s$ (m)	$y_s - y_0$ (m)	Cota de Perfil de Socavación (m.s.n.m)
-16.09	13.43	0.517	0.61	0.09	13.34
-13.78	11.95	2.000	2.35	0.35	11.60
-8.17	10.89	3.065	3.61	0.54	10.34
-7.97	10.83	3.124	3.68	0.55	10.27
-5.27	9.22	4.729	5.57	0.84	8.38
-5.17	9.16	4.792	5.64	0.85	8.31
-5.16	9.15	4.801	5.65	0.85	8.30
-5.15	9.15	4.802	5.65	0.85	8.30
-3.47	8.55	5.401	6.36	0.96	7.59
-0.20	7.94	6.007	7.07	1.06	6.88
0.61	7.85	6.103	7.18	1.08	6.77
2.74	7.63	6.319	7.44	1.12	6.51
3.08	8.16	5.792	6.82	1.03	7.13
5.58	9.38	4.574	5.38	0.81	8.57
8.20	10.73	3.225	3.80	0.57	10.15
9.61	12.07	1.884	2.22	0.33	11.73
10.37	12.78	1.170	1.38	0.21	12.57

### 5.1.2.1.2.3 Comparación de Métodos

Los resultados de los cálculos realizados mediante el método de Lischtvan - Lebediev muestran que existe una socavación que alcanza hasta 5.82 m. de profundidad, mientras que para el método de Laursen la socavación máxima es de 0.96 m. desde el fondo del cauce del río Guachal.

La diferencia de resultados entre las dos metodologías estudiadas podría deberse a que no hay un cambio significativo de anchos superiores entre las secciones en estudio.

Sin embargo, el fondo si se muestra irregular (ver Fig. 5.2) y este aumento de tirantes podrían traducirse en el incremento de la profundidad de socavación en el método de Lischtvan Lebediev.

A continuación se muestra un gráfico comparativo del perfil analizado donde se puede apreciar el terreno natural, el perfil socavado por el método de Lischtvan – Lebediev y por el método de Laursen:

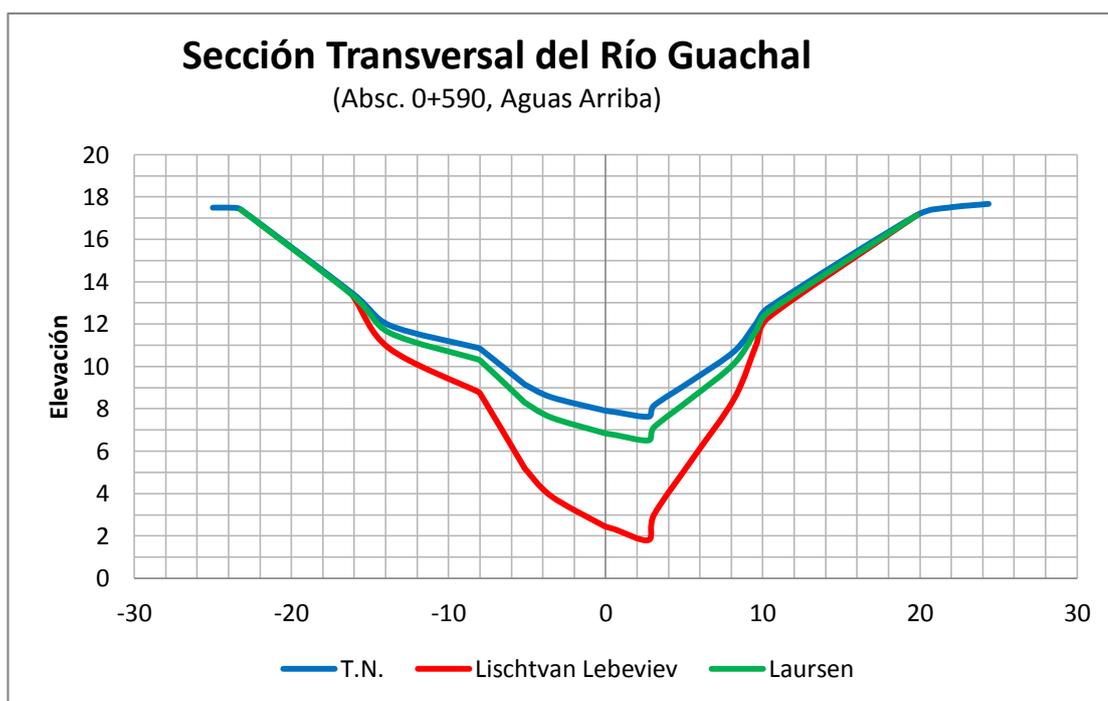


Fig. 5.5 Perfil de Socavación en la ABS (0+590)

### 5.1.2.1.3 Socavación en la abscisa 0+580 Cara aguas abajo del puente

Los resultados del análisis hidráulico necesarios para el cálculo de socavación son los siguientes:

Datos

WS (m)	D50 (mm)	Q (m <sup>3</sup> /s)	A (m <sup>2</sup> )	B (m)	Hm (m)	U
13.84	0.39	231.60	94.14	26.45	3.56	1.00

#### 5.1.2.1.3.1 Método de Lischtván – Lebediev

En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos por este método, donde  $Y_s$  es la altura de socavación más el tirante en ese punto.

Tabla XXII Cálculo de Socavación por Lischtván – Lebediev en el Río Guachal (ABS. 0+580)

Dist. a CL (m)	Elevación (m.s.n.m.)	$y_0$ (m)	$y_s$ (m)	$y_s - y_0$ (m)	Cota de Perfil de Socavación (m.s.n.m)
-9.66	12.43	1.41	2.27	0.86	11.57
-7.59	10.94	2.90	5.34	2.44	8.50
-6.32	9.96	3.88	7.55	3.67	6.29
-2.20	8.59	5.25	10.82	5.57	3.02
-1.50	8.28	5.56	11.58	6.02	2.26
-0.58	8.12	5.72	11.98	6.26	1.86
0.00	8.04	5.80	12.18	6.38	1.66
1.49	7.84	6.00	12.68	6.68	1.16
1.62	7.91	5.93	12.50	6.57	1.34
6.42	9.01	4.83	9.80	4.97	4.04
9.23	11.51	2.33	4.12	1.79	9.72
11.48	12.05	1.79	3.01	1.22	10.83

### 5.1.2.1.3.2 Método de Laursen

El análisis de la velocidad crítica para esta abscisa en particular dio como resultado que se presentaría una socavación en Lecho Vivo.

En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos por este método.

Tabla XXIII Cálculo de Socavación por Laursen en el Río Guachal (ABS. 0+580)

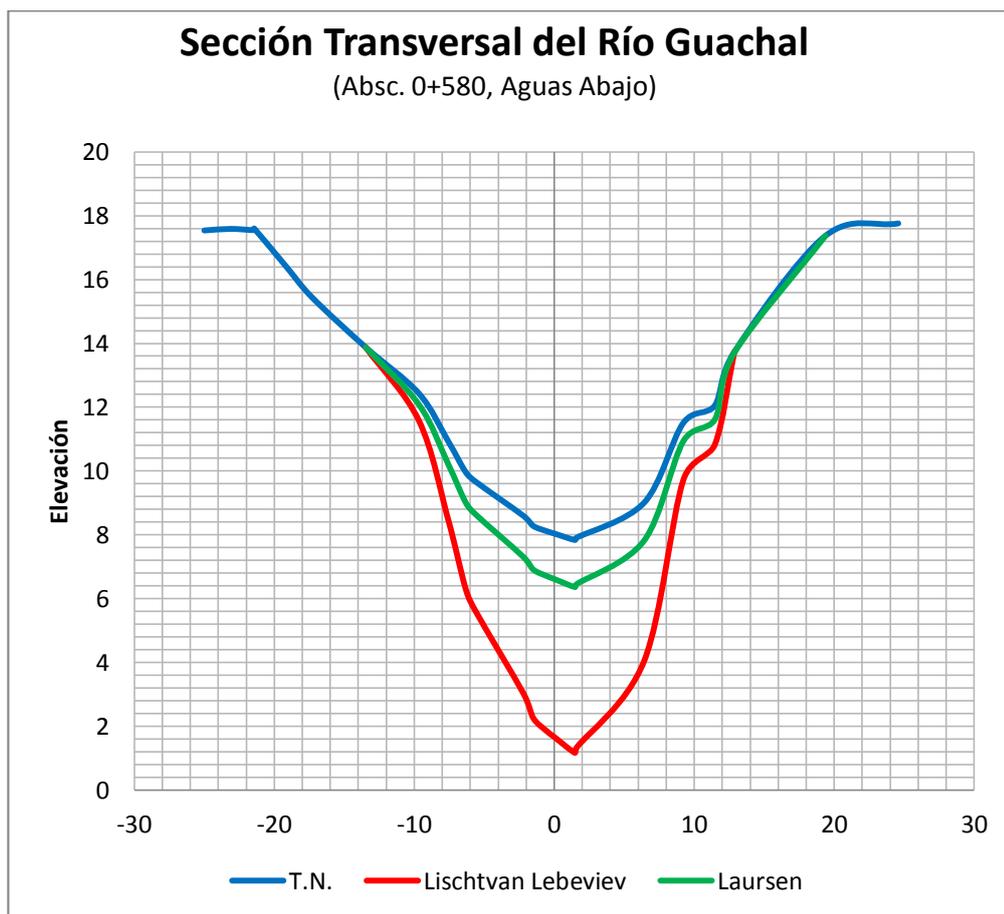
Dist. a CL (m)	Elevación (m.s.n.m.)	$y_0$ (m)	$y_s$ (m)	$y_s - y_0$ (m)	Cota de Perfil de Socavación (m.s.n.m)
-9.66	12.43	1.413	1.76	0.35	12.08
-7.59	10.94	2.899	3.61	0.71	10.23
-6.32	9.96	3.882	4.84	0.95	9.00
-5.57	9.65	4.191	5.22	1.03	8.62
-2.20	8.59	5.248	6.54	1.29	7.30
-1.50	8.28	5.562	6.93	1.37	6.91
-0.58	8.12	5.720	7.13	1.41	6.71
0.00	8.04	5.800	7.22	1.42	6.62
1.49	7.84	6.005	7.48	1.48	6.36
1.62	7.91	5.927	7.38	1.46	6.46
6.42	9.01	4.834	6.02	1.19	7.82
9.23	11.51	2.331	2.90	0.57	10.94
11.48	12.05	1.786	2.22	0.44	11.62
12.87	13.73	0.109	0.14	0.03	13.70

### **5.1.2.1.3.3 Comparación de Métodos**

Los resultados de los cálculos realizados mediante el método de Lischtvan - Lebediev muestran que existe una socavación que alcanza hasta 6.68 m. de profundidad, mientras que para el método de Laursen la socavación máxima es de 1.32 m. desde el fondo del cauce del río Guachal.

De las cuatro abscisas estudiadas, ésta (0+580) es la que mayor profundidad de socavación presenta, tanto para el método de Lischtvan Lebediev como para Laursen. Esto puede tener su origen en que aquí se presenta el tirante más grande, y la mayor diferencia de anchos superiores con respecto a las otras secciones.

A continuación se muestra un gráfico comparativo del perfil analizado donde se puede apreciar el Terreno natural, el perfil socavado por el método de Lischtvan – Lebediev y por el método de Laursen:



**Fig. 5.6 Perfil de Socavación en la ABS (0+580)**

#### 5.1.2.1.4 Socavación en la abscisa 0+480 Aguas abajo

Los resultados del análisis hidráulico necesarios para el cálculo de socavación son los siguientes:

Datos

WS (m)	D50 (mm)	Q (m <sup>3</sup> /s)	A (m <sup>2</sup> )	B (m)	Hm (m)	U
12.77	0.39	231.60	90.96	30.26	3.01	1.00

#### 5.1.2.1.4.1 Método de Lischtván – Lebediev

En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos por este método, donde  $y_s$  es la altura de socavación más el tirante en ese punto.

Tabla XXIV Cálculo de Socavación por Lischtván – Lebediev en el Río Guachal (ABS. 0+480)

Dist. a CL (m)	Elevación (m.s.n.m.)	$y_0$ (m)	$y_s$ (m)	$y_s - y_0$ (m)	Cota de Perfil de Socavación (m.s.n.m)
-10.51	8.96	3.83	8.05	4.22	4.74
-10.31	8.79	4.00	8.48	4.48	4.31
-8.91	8.49	4.30	9.24	4.94	3.55
-8.73	8.47	4.32	9.29	4.97	3.50
-8.71	8.46	4.33	9.32	4.99	3.47
-4.80	8.71	4.08	8.68	4.60	4.11
0.00	9.02	3.77	7.90	4.13	4.89
6.90	9.17	3.62	7.53	3.91	5.26
6.98	9.17	3.62	7.53	3.91	5.26
8.81	9.32	3.47	7.16	3.69	5.63
11.62	11.50	1.29	2.21	0.92	10.58

#### 5.1.2.1.4.2 Método de Laursen

El análisis de la velocidad crítica para esta abscisa en particular dio como resultado que se presentaría una socavación en Lecho Vivo.

En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos por este método, donde  $y_s$  es la altura de socavación más el tirante en ese punto.

Tabla XXV Cálculo de Socavación por Laursen en el Río Guachal (ABS. 0+480)

Dist. a CL (m)	Elevación (m.s.n.m.)	$y_0$ (m)	$y_s$ (m)	$y_s - y_0$ (m)	Cota de Perfil de Socavación (m.s.n.m)
-10.51	8.96	3.830	3.91	0.08	8.88
-10.31	8.79	4.004	4.09	0.09	8.70
-8.91	8.49	4.299	4.39	0.09	8.40
-8.73	8.47	4.316	4.41	0.09	8.38
-8.71	8.46	4.334	4.43	0.09	8.36
-4.80	8.71	4.081	4.17	0.09	8.62
0.00	9.02	3.769	3.85	0.08	8.94
6.90	9.17	3.624	3.70	0.08	9.09
6.98	9.17	3.622	3.70	0.08	9.09
8.81	9.32	3.467	3.54	0.07	9.25
11.62	11.50	1.293	1.32	0.03	11.47
16.13	12.76	0.028	0.03	0.00	12.76

#### 5.1.2.1.4.3 Comparación de Métodos

Los resultados de los cálculos realizados mediante el método de Lischtván - Lebediev muestran que existe una socavación que alcanza hasta 4.99 m. de profundidad, mientras que para el método de Laursen la socavación máxima es de 0.08 m. desde el fondo del cauce. La diferencia entre los resultados obtenidos mediante los dos métodos responde a la “regularidad” de las márgenes del río (socavación mínima por el método de Laursen), y a la irregularidad muy marcada en el fondo del cauce (socavación alta por el método de Lischtván Lebediev).

A continuación se muestra un gráfico comparativo del perfil analizado donde se puede apreciar el Terreno natural, el perfil socavado por el método de Lischtvan – Lebediev y por el método de Laursen:

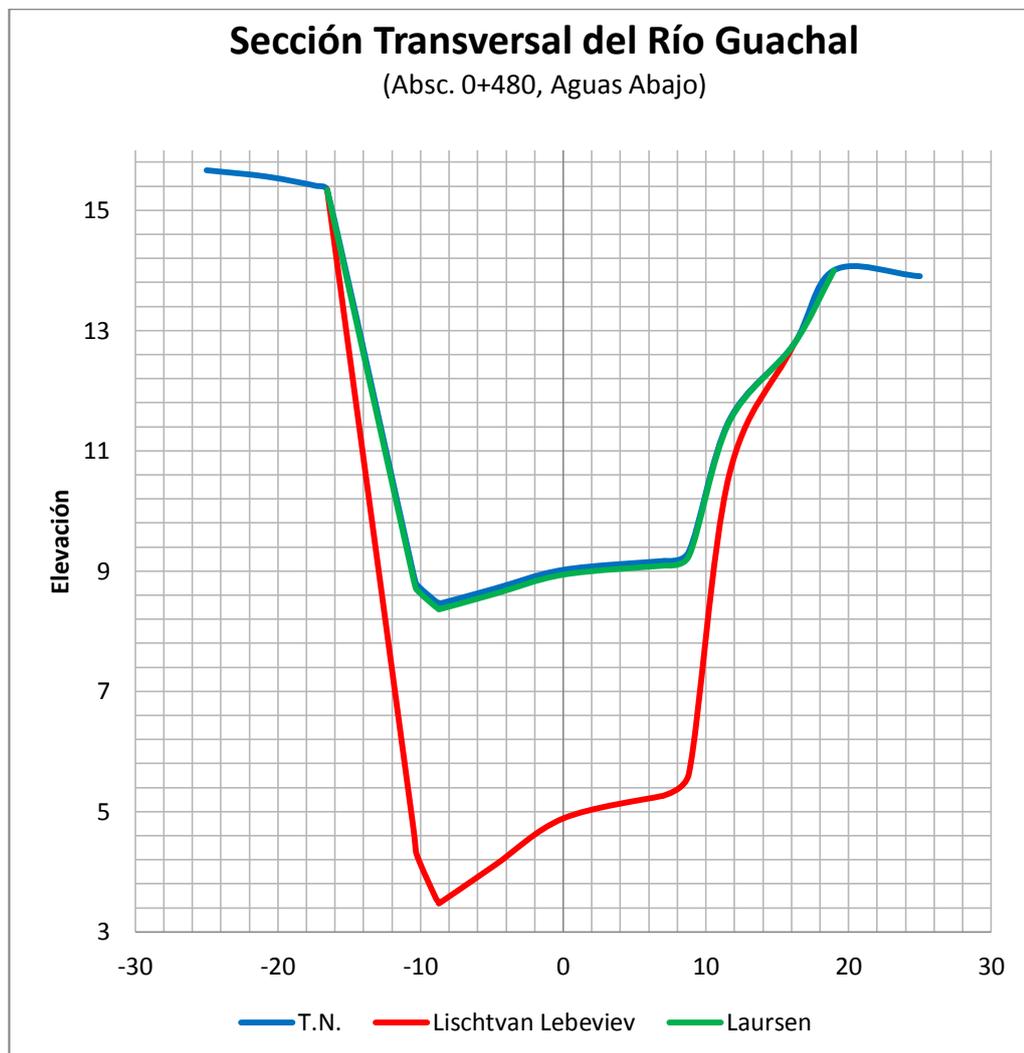
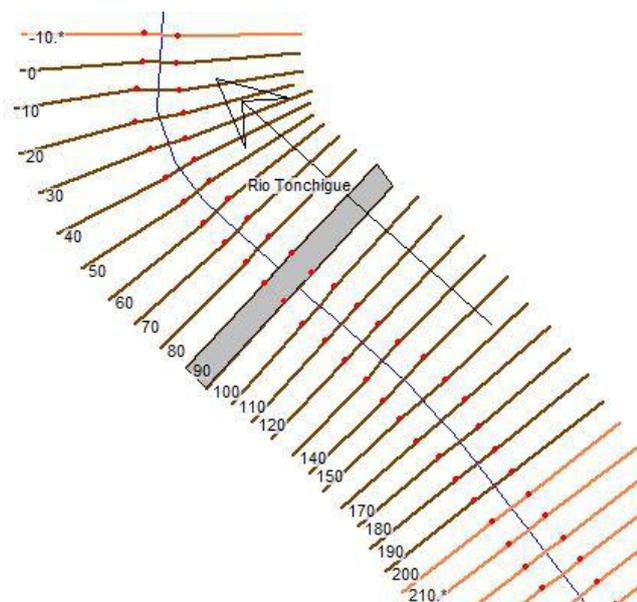


Fig. 5.7 Perfil de Socavación en la ABS (0+480)

### 5.1.2.2 Río Tonchigüe

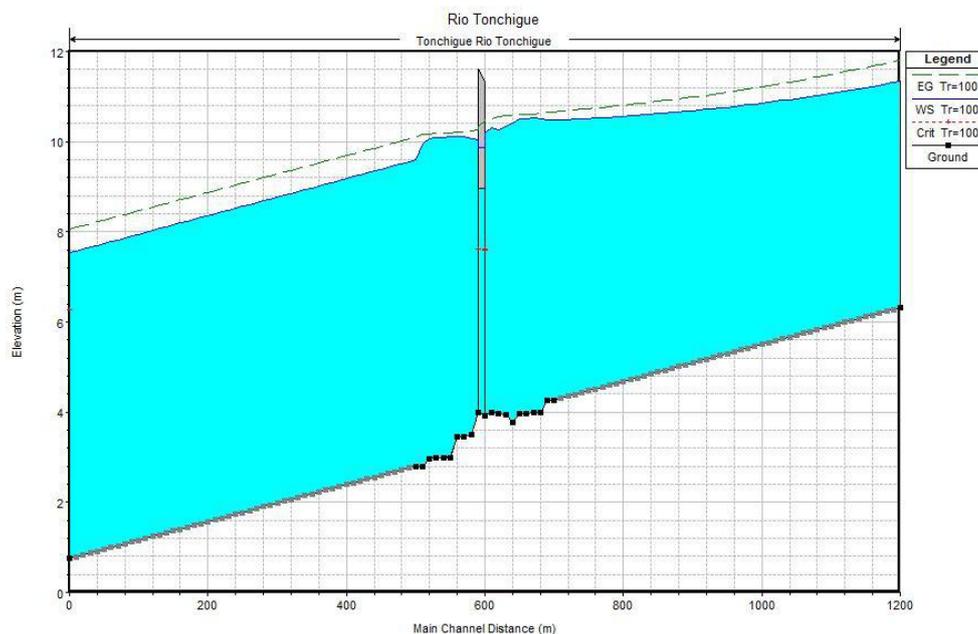
Para el análisis de Socavación es necesario contar con los datos provenientes de la modelación en el programa HEC – RAS.



**Fig. 5.8 Vista en Planta del modelación del Río Tonchigüe, en HEC – RAS. Ubicación del puente en color gris**

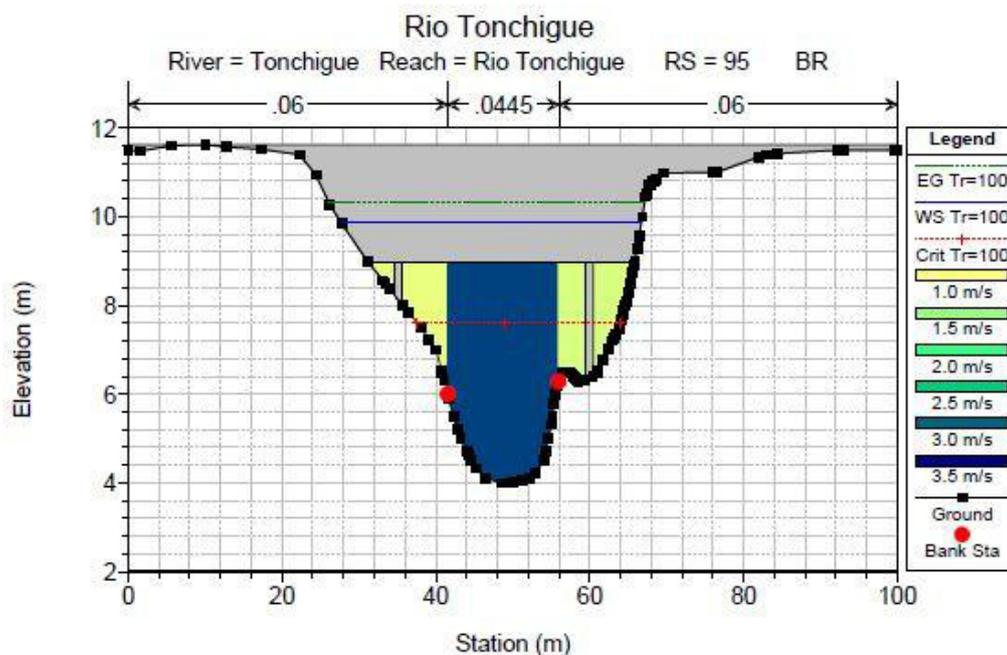
Las secciones escogidas en este río para el análisis de socavación general son las ubicadas en las abscisas 0+190 (aguas arriba), 0+100 (borde aguas arriba del puente), 0+090 (borde aguas abajo del puente), 0+000 (aguas abajo).

A continuación se muestra el gráfico de cada una de las secciones antes mencionadas con su respectiva distribución de velocidades tanto en el canal principal como en las márgenes izquierda y derecha.



**Fig. 5.9 Perfil longitudinal del Río Tonchigüe HEC –RAS**

La Fig. 5.9 muestra el efecto causado por el puente sobre el flujo del río para un periodo de retorno de 100 años. La cota inferior de las vigas es menor que la máxima de la superficie del agua, por lo cual el puente actúa como una presa. Se puede observar claramente una curva de remanso en el tramo aguas arriba del puente sin llegar a cambiar el régimen de subcrítico a supercrítico.



**Fig. 5.10 Sección Transversal (ABS 0+090)**

En la Fig. 5.10 se muestra la sección transversal del río en la abscisa del puente, se observa claramente que la superficie del agua alcanza el nivel de las vigas, esta información se pudo corroborar con encuestas realizadas en campo a los moradores del sector.

Además, permite apreciar la ubicación de las pilas en el cauce y el nivel de agua que alcanza sobrepasando las vigas.

Esto podría deberse a que al realizar el estudio del puente, la topografía debió mostrar inconsistencias, o no se estimaron bien los caudales de

diseño, o se eligieron mal los periodos de retorno, se delimitó mal la cuenca de aportación, etc.

Es necesario una rectificación del nivel de la rasante, la cual debe ser elevada hasta un nivel que garantice un gálibo mínimo de 2.00 m.

En la tabla siguiente se muestran los resultados de los análisis hidráulicos realizados a las secciones de estudio.

**Tabla XXVI Datos obtenidos del modelación con el programa HEC – RAS**

Abscisa	Elevación mínima de canal(m)	Nivel de Superficie de Agua(m)	Perfil de energía (m)	Pendiente de perfil de energía (m/m)	Velocidad del Canal (m/s)	Área Hidráulica (m <sup>2</sup> )	Ancho Superficie de Agua (m)	# Froude
200	3.47	9.37	9.61	0.001412	2.34	144.34	78.82	0.33
100	3.92	8.11	9.14	0.008401	4.54	56.70	22.25	0.76
90	4.00	8.28	8.96	0.005610	3.86	73.96	30.63	0.64
0	1.00	7.79	8.30	0.004097	3.4	88.86	36.61	0.49

#### **5.1.2.2.1 Socavación en la abscisa 0+190 Aguas arriba**

Los resultados del análisis hidráulico requeridos para el cálculo de socavación son los siguientes:

Datos

WS (m)	D50 (mm)	Q (m <sup>3</sup> /s)	A (m <sup>2</sup> )	B (m)	Hm (m)	u
9.37	28.87	237.40	144.32	78.80	1.83	1.00

### 5.1.2.2.1.1 Método de Lischtván – Lebediev

En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos por este método, donde  $y_s$  es la altura de socavación más el tirante en ese punto.

Tabla XXVII Cálculo de Socavación por Lischtván – Lebediev en el Río Tonchigüe (ABS. 0+190)

Dist. a CL (m)	Elevación (m.s.n.m.)	$y_0$ (m)	$y_s$ (m)	$y_s - y_0$ (m)	Cota de Perfil de Socavación (m.s.n.m)
-38.14	9.94	0.540	0.54	-	-
-7.29	8.10	2.380	2.38	-	-
-6.94	7.80	2.678	2.68	-	-
-6.03	7.10	3.380	3.38	-	-
-5.61	6.60	3.880	3.88	-	-
-5.23	6.10	4.380	4.38	-	-
-4.90	5.60	4.880	4.88	-	-
-4.60	5.10	5.380	5.38	-	-
-4.26	4.60	5.880	5.88	-	-
4.84	5.08	5.399	5.40	-	-
9.51	5.60	4.880	4.88	-	-
10.15	6.08	4.397	4.40	-	-
10.17	6.10	4.380	4.38	-	-
11.53	7.10	3.380	3.38	-	-
15.11	8.10	2.380	2.38	-	-
17.05	8.60	1.880	1.88	-	-
19.72	9.10	1.380	1.38	-	-
54.00	10.47	0.014	0.01	-	-

Las estimaciones mediante este método indican que es ésta abscisa en particular no habría de presentarse socavación, y probablemente pueda haber algún tipo de sedimentación. Esto podría producirse a la disminución de velocidades en el tramo aguas arriba del puente, por interferencia de éste.

#### 5.1.2.2.1.2 Método de Laursen

El análisis de la velocidad crítica indica que para esta abscisa en particular se debe realizar en análisis de socavación en Agua Clara.

En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos por este método, donde  $Y_s$  es la altura de socavación más el tirante en ese punto.

**Tabla XXVIII Cálculo de Socavación por Laursen en el Río Guachal (ABS. 0+190)**

Dist. a CL (m)	Elevación (m.s.n.m.)	$y_0$ (m)	$y_s$ (m)	$y_s - y_0$ (m)	Cota de Perfil de Socavación (m.s.n.m)
-38.14	9.94	0.54	0.27	-	-
-11.37	8.10	2.38	1.79	-	-
-6.03	7.10	3.38	2.80	-	-
-5.23	6.10	4.38	3.90	-	-
-4.60	5.10	5.38	5.08	-	-
-4.26	4.60	5.88	5.69	-	-
4.99	5.10	5.38	5.08	-	-
10.17	6.10	4.38	3.90	-	-
11.53	7.10	3.38	2.80	-	-
15.11	8.10	2.38	1.79	-	-
19.72	9.10	1.38	0.89	-	-
54.00	10.47	0.01	0.00	-	-

Los resultados de las estimaciones de socavación general mediante este método muestran que no debería presentarse socavación en esta abscisa en particular.

#### **5.1.2.2.2 Socavación en la abscisa 0+100 Cara aguas arriba del puente**

Los resultados del análisis hidráulico necesarios para el cálculo de socavación son los siguientes:

Datos						
WS (m)	D50 (mm)	Q (m <sup>3</sup> /s)	A (m <sup>2</sup> )	B (m)	Hm (m)	u
8.11	28.87	237.40	56.67	22.24	2.55	1.00

#### **5.1.2.2.2.1 Método de Lischtván – Lebediev**

Las estimaciones mediante este método indican que es ésta abscisa en particular no habría de presentarse socavación, y probablemente pueda haber algún tipo de sedimentación, lo cual debería ser comprobado mediante un modelo de transporte de sedimentos.

En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos por este método, donde  $Y_s$  es la altura de socavación más el tirante en ese punto.

**Tabla XXIX Cálculo de Socavación por Lischtván – Lebediev en el Río Tonchigüe (ABS. 0+100)**

Dist. a CL (m)	Elevación (m.s.n.m.)	$y_0$ (m)	$y_s$ (m)	$y_s - y_0$ (m)	Cota de Perfil de Socavación (m.s.n.m)
-20.38	10.00	0.20	0.07	-	-
-17.05	9.00	1.20	0.65	-	-
-12.43	8.00	2.20	1.42	-	-
-8.26	7.00	3.20	2.29	-	-
-6.52	6.00	4.20	3.25	-	-
-5.08	5.00	5.20	4.27	-	-
0.10	4.00	6.20	5.35	-	-
6.14	5.00	5.20	4.27	-	-
6.84	6.00	4.20	3.25	-	-
7.41	7.00	3.20	2.29	-	-
8.92	8.00	2.20	1.42	-	-
12.02	9.00	1.20	0.65	-	-
15.10	10.00	0.20	0.07	-	-

#### 5.1.2.2.2 Método de Laursen

El análisis de la velocidad crítica indica que para esta abscisa en particular se debe realizar en análisis de socavación en Agua Clara.

En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos por este método, donde  $Y_s$  es la altura de socavación más el tirante en ese punto.

**Tabla XXX Cálculo de Socavación por Laursen en el Río Tonchigüe (ABS. 0+100)**

Dist. a CL (m)	Elevación (m.s.n.m.)	$y_0$ (m)	$y_s$ (m)	$y_s - y_0$ (m)	Cota de Perfil de Socavación (m.s.n.m)
-20.38	10.00	0.200	0.20	-	-
-17.05	9.00	1.200	1.20	-	-
-12.43	8.00	2.200	2.20	-	-
-8.26	7.00	3.200	3.20	-	-
-6.52	6.00	4.200	4.20	-	-
-5.08	5.00	5.200	5.20	-	-
6.14	5.00	5.200	5.20	-	-
6.84	6.00	4.200	4.20	-	-
7.41	7.00	3.200	3.20	-	-
8.92	8.00	2.200	2.20	-	-
12.02	9.00	1.200	1.20	-	-
15.10	10.00	0.200	0.20	-	-

Los resultados de las estimaciones de socavación general mediante este método muestran que no debería presentarse socavación en esta abscisa en particular.

#### **5.1.2.2.3 Socavación en la abscisa 0+090 cara aguas abajo del puente**

Los resultados del análisis hidráulico necesarios para el cálculo de socavación son los siguientes:

Datos

WS (m)	D50 (mm)	Q (m <sup>3</sup> /s)	A (m <sup>2</sup> )	B (m)	Hm (m)	u
8.28	28.87	237.40	73.92	30.62	2.41	1.00

### 5.1.2.2.3.1 Método de Lischtván – Lebediev

Las estimaciones mediante este método indican que es ésta abscisa en particular no habría de presentarse socavación, y probablemente pueda haber algún tipo de sedimentación.

En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos por este método, donde  $Y_s$  es la altura de socavación más el tirante en ese punto.

**Tabla XXXI Cálculo de Socavación por Lischtván – Lebediev en el Río Tonchigüe (ABS. 0+090)**

Dist. a CL (m)	Elevación (m.s.n.m.)	$y_0$ (m)	$y_s$ (m)	$y_s - y_0$ (m)	Cota de Perfil de Socavación (m.s.n.m)
-14.28	8.00	2.04	1.42	-	-
-11.95	7.50	2.54	1.88	-	-
-9.97	7.00	3.04	2.37	-	-
-9.21	6.50	3.54	2.87	-	-
-8.47	6.00	4.04	3.40	-	-
-7.71	5.50	4.54	3.95	-	-
-6.77	5.00	5.04	4.52	-	-
-5.46	4.50	5.54	5.10	-	-
0.00	4.00	6.04	5.70	-	-
4.04	4.50	5.54	5.10	-	-
4.63	5.00	5.04	4.52	-	-
5.17	5.50	4.54	3.95	-	-
5.36	5.80	4.24	3.62	-	-
5.48	6.00	4.04	3.40	-	-
6.55	6.50	3.54	2.87	-	-
12.35	7.00	3.04	2.37	-	-
13.82	7.50	2.54	1.88	-	-
14.66	8.00	2.04	1.42	-	-

### 5.1.2.2.3.2 Método de Laursen

El análisis de la velocidad crítica muestra que para esta abscisa en particular se debe realizar el análisis de socavación en Agua Clara. Pero de acuerdo a los datos obtenidos no debería presentarse socavación en esta abscisa.

En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos por este método.

**Tabla XXXII Cálculo de Socavación por Laursen en el Río Tonchigüe (ABS. 0+090)**

Dist. a CL (m)	Elevación (m.s.n.m.)	$y_0$ (m)	$y_s$ (m)	$y_s - y_0$ (m)	Cota de Perfil de Socavación (m.s.n.m)
-18.93	9.00	1.040	1.04	-	-
-16.60	8.50	1.540	1.54	-	-
-14.28	8.00	2.040	2.04	-	-
-9.97	7.00	3.040	3.04	-	-
-8.47	6.00	4.040	4.04	-	-
-6.77	5.00	5.040	5.04	-	-
0.00	4.00	6.041	6.04	-	-
4.63	5.00	5.040	5.04	-	-
5.36	5.80	4.245	4.25	-	-
5.48	6.00	4.040	4.04	-	-
10.97	6.50	3.540	3.54	-	-
12.35	7.00	3.040	3.04	-	-
14.66	8.00	2.040	2.04	-	-
15.88	9.00	1.040	1.04	-	-
16.84	10.00	0.040	0.04	-	-

#### 5.1.2.2.4 Socavación en la abscisa 0+000 Aguas abajo

Los resultados del análisis hidráulico usados para el cálculo de socavación son los siguientes:

Datos

WS (m)	D50 (mm)	Q (m <sup>3</sup> /s)	A (m <sup>2</sup> )	B (m)	Hm (m)	u
7.79	28.87	237.40	88.86	36.61	2.43	1.00

#### 5.1.2.2.4.1 Método de Lischtván – Lebediev

En la siguiente tabla se muestran los resultados del análisis:

Tabla XXXIII Cálculo de Socavación por Lischtván – Lebediev en el Río Tonchigüe (ABS. 0+000)

Dist. a CL (m)	Elevación (m.s.n.m.)	y <sub>0</sub> (m)	y <sub>s</sub> (m)	y <sub>s</sub> -y <sub>0</sub> (m)	Cota de Perfil de Socavación (m.s.n.m)
-7.43	8.88	0.71	0.72	0.01	8.87
-6.52	7.80	1.79	2.36	0.57	7.23
-6.14	7.30	2.29	3.23	0.94	6.36
-5.79	6.80	2.79	4.16	1.37	5.43
-5.45	6.30	3.29	5.13	1.84	4.46
-5.11	5.80	3.79	6.15	2.36	3.44
-4.76	5.30	4.29	7.21	2.92	2.38
-4.43	4.80	4.79	8.30	3.51	1.29
-4.12	4.30	5.29	9.43	4.14	0.16
-3.80	3.80	5.79	10.58	4.79	-0.99
0.47	2.80	6.79	12.97	6.18	-3.38
3.32	6.73	2.86	4.29	1.43	5.30
6.00	7.05	2.54	3.69	1.15	5.90

### 5.1.2.2.4.2 Método de Laursen

El análisis de la velocidad crítica para esta abscisa en particular dio como resultado que se presentaría una socavación en Lecho Vivo.

En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos por este método, donde  $Y_s$  es la altura de socavación más el tirante en ese punto.

Tabla XXXIV Cálculo de Socavación por Laursen en el Río Tonchigüe (ABS. 0+090)

Dist. a CL (m)	Elevación (m.s.n.m.)	$y_0$ (m)	$y_s$ (m)	$y_s - y_0$ (m)	Cota de Perfil de Socavación (m.s.n.m)
-7.43	8.88	0.714	1.55	0.84	8.04
-7.33	8.80	0.790	1.72	0.93	7.87
-6.91	8.30	1.290	2.81	1.52	6.78
-6.52	7.80	1.790	3.90	2.11	5.69
-6.14	7.30	2.290	4.99	2.70	4.60
-5.79	6.80	2.790	6.08	3.29	3.51
-5.45	6.30	3.290	7.16	3.87	2.43
-5.11	5.80	3.790	8.25	4.46	1.34
-4.76	5.30	4.290	9.34	5.05	0.25
-4.43	4.80	4.790	10.43	5.64	-0.84
-4.12	4.30	5.290	11.52	6.23	-1.93
-3.99	4.10	5.490	11.96	6.47	-2.37
-3.80	3.80	5.790	12.61	6.82	-3.02
-3.46	3.30	6.290	13.70	7.41	-4.11
-2.02	2.80	6.790	14.79	8.00	-5.20
1.91	4.40	5.186	11.29	6.11	-1.70
24.20	9.19	0.403	0.88	0.47	8.71

### 5.1.2.2.4.3 Comparación de Métodos

A continuación un gráfico comparativo del perfil analizado donde se aprecia el Terreno natural, el perfil socavado por el método de Lischtván – Lebediev y por el método de Laursen:

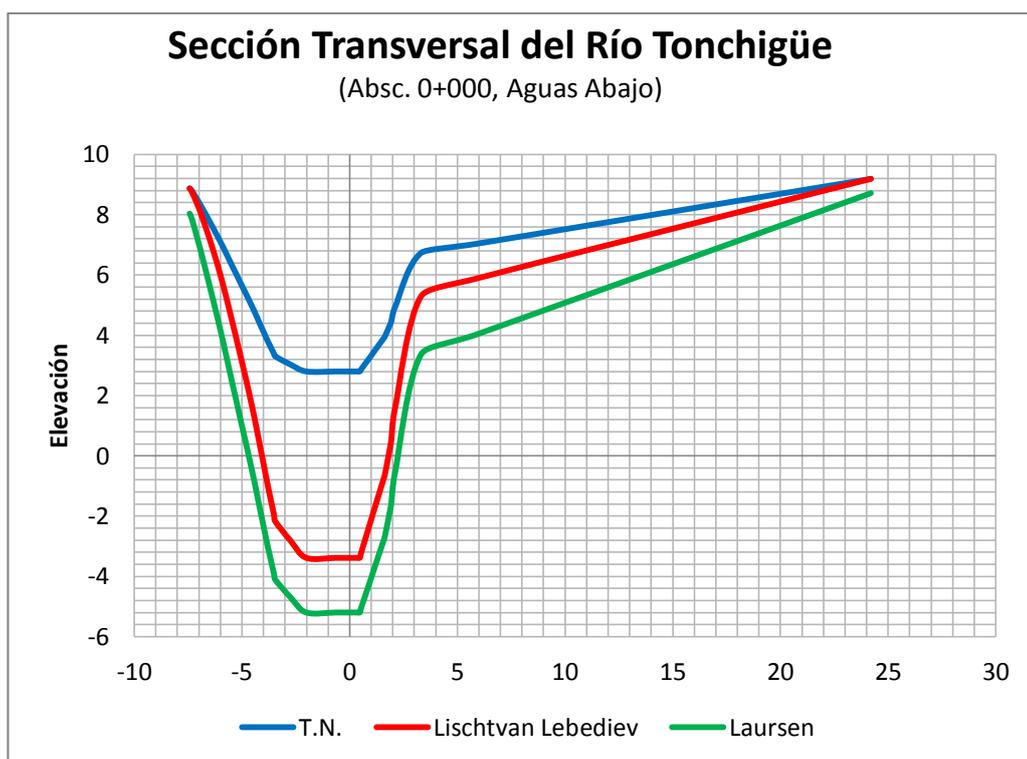


Fig. 5.1 Perfil de Socavación en la ABS (0+000)

Éste río en particular presenta dos fenómenos que producen socavación solo en una de las abscisas de las cuatro estudiadas (0+000). No se presenta socavación en las secciones que están ubicadas aguas arriba del puente por la disminución de velocidades provocada por el bajo nivel del puente.

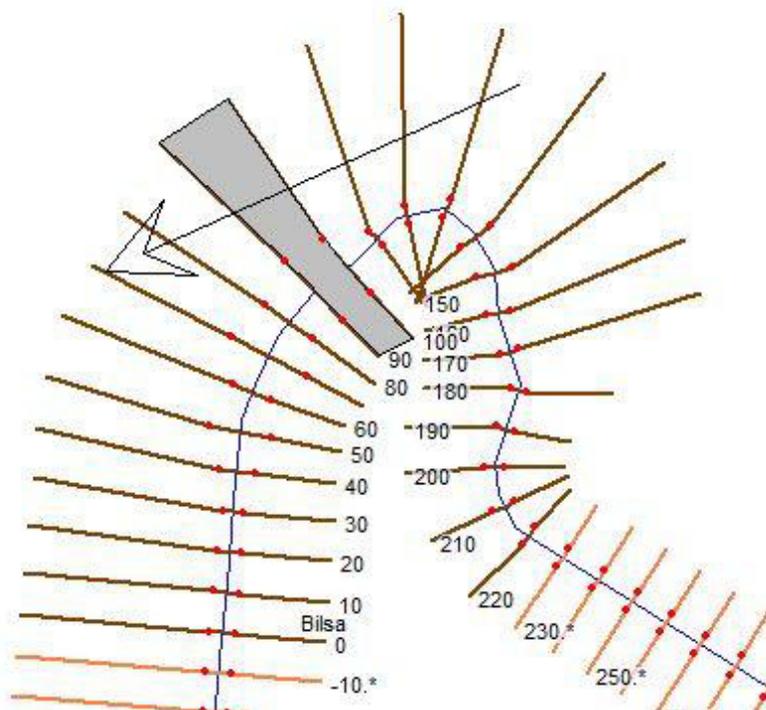
Además, al pasar el puente, el flujo aumenta su velocidad; pero no es lo suficientemente alta como para superar la velocidad crítica de las partículas del fondo, y no origina socavación en la sección inmediatamente aguas abajo del puente.

Sin embargo, este aumento de velocidad, más la estrangulación de la sección conocida más lejana aguas abajo producen en esta abscisa (0+000), el valor más alto de socavación en el río, 6.18 m. por el método de Lischtván Lebediev y 8.00 m por Laursen.

Es importante mencionar además, que sólo en esta sección la velocidad del flujo es mayor que la velocidad crítica, es decir, solo aquí se realiza análisis en Lecho Vivo, mientras que en las anteriores, se analizó socavación en Agua Clara.

### **5.1.2.3 Río Bilsa**

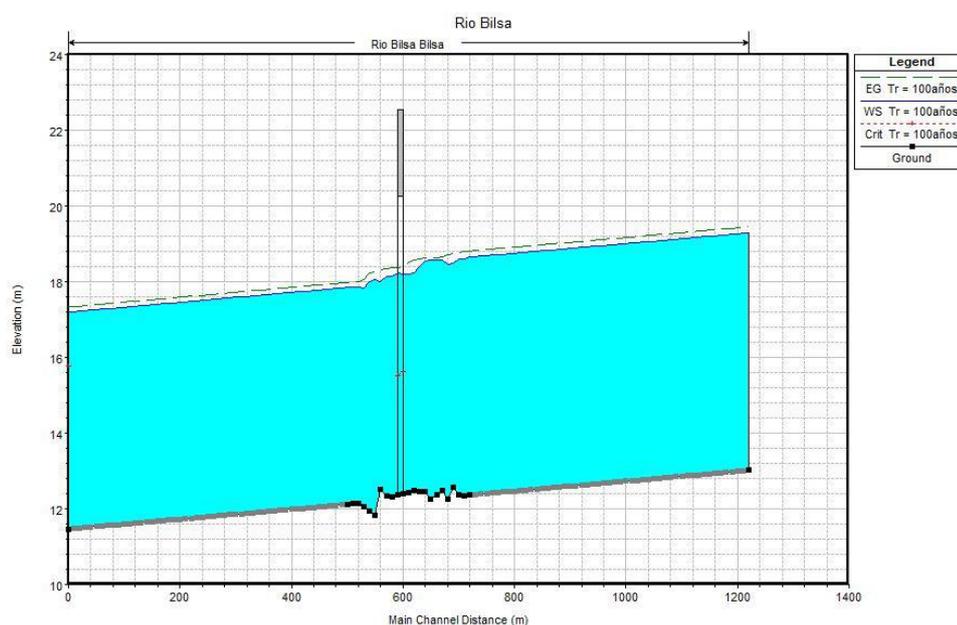
Para el análisis de Socavación es necesario contar con los datos provenientes de la modelación en el programa HEC – RAS.



**Fig. 5.11 Vista en Planta del modelación del Río Bilsa en HEC – RAS. Ubicación del puente en color gris**

La Fig. 5.11 muestra que el puente ha sido ubicado sobre uno de los meandros del río, y probablemente tenga problemas de socavación en sus estribos en el futuro. Por naturaleza geomorfológica, el río tenderá a socavar del lado exterior de sus curvas, y a decantar material sobre el lado interior de la misma. Si se construye alguna estructura de protección, en el margen exterior de la curva, debería dársele mantenimiento constantemente para no comprometer la integridad del puente. Las secciones escogidas en este río para el análisis de socavación general son las ubicadas en las abscisas 0+210 (aguas arriba), 0+100 (borde aguas arriba del puente), 0+090 (borde aguas abajo del puente), 0+000 (aguas abajo). Ahora se muestra el gráfico de

una de las secciones más representativa con su respectiva distribución de velocidades tanto en el canal principal como en las márgenes izquierda y derecha.



**Fig. 5.12 Perfil longitudinal del Río Bilsa, en HEC –RAS**

En el gráfico anterior Fig. 5.12, se puede observar que el río Bilsa tiene un fondo prácticamente regular en el tramo del puente; sin embargo, sí existe un pequeño efecto de remanso en el tramo aguas arriba del río.

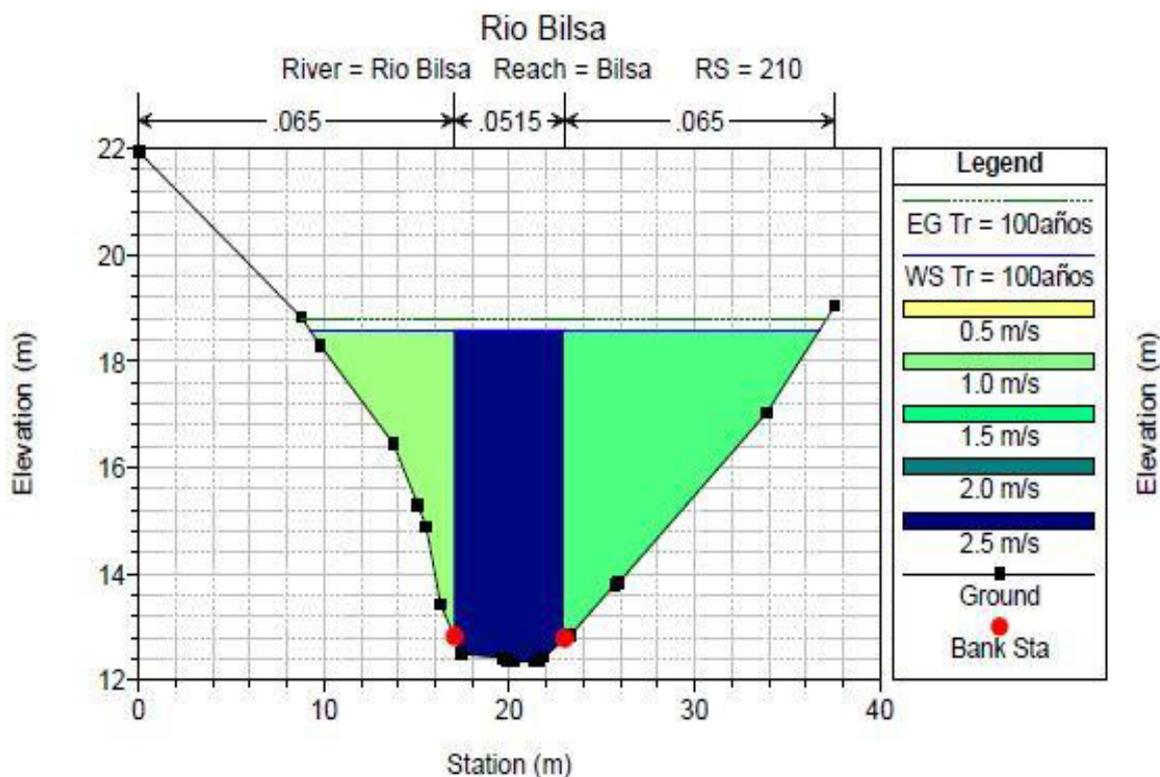


Fig. 5.13 Sección Transversal (ABS 0+210)

En la tabla siguiente se muestran los resultados de los análisis hidráulicos realizados a las secciones de estudio.

Tabla XXXV Tabla de resultados de modelación HEC-RAS

Abscisa	Elevación mínima de canal (m)	Nivel de Superficie de Agua (m)	Perfil de energía (m)	Pendiente de perfil de energía (m/m)	Velocidad del Canal (m/s)	Área Hidráulica (m <sup>2</sup> )	Ancho Superficie de Agua (m)	# Froude
220	12.37	18.65	18.81	0.001269	2.27	108.55	31.77	0.29
100	12.41	18.21	18.41	0.001885	2.01	79.78	21.61	0.31
90	12.38	18.23	18.38	0.001397	1.77	92.03	25.47	0.28
0	12.12	17.85	17.98	0.001303	2.17	137.32	64.29	0.29

### 5.1.2.3.1 Socavación en la abscisa 0+210 Aguas arriba

Los resultados del análisis hidráulico necesarios para el cálculo de socavación son los siguientes:

Datos

WS (m)	D50 (mm)	Q (m <sup>3</sup> /s)	A (m <sup>2</sup> )	B (m)	Hm (m)	U
18.59	9.17	156.70	79.78	21.61	3.69	1.00

#### 5.1.2.3.1.1 Método de Lischtván – Lebediev

En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos por este método, donde  $Y_s$  es la altura de socavación más el tirante en ese punto.

Tabla XXXVI Cálculo de Socavación por Lischtván – Lebediev en el Río Bilsa (ABS. 0+210)

Dist. a CL (m)	Elevación (m.s.n.m.)	$y_0$ (m)	$y_s$ (m)	$y_s - y_0$ (m)	Cota de Perfil de Socavación (m.s.n.m)
-2.97	12.82	5.77	5.86	0.09	12.73
-2.95	12.80	5.79	5.88	0.09	12.71
-2.56	12.49	6.10	6.27	0.17	12.32
-0.38	12.42	6.17	6.36	0.19	12.23
-0.16	12.38	6.21	6.42	0.21	12.17
0.25	12.35	6.24	6.45	0.21	12.14
1.31	12.35	6.24	6.45	0.21	12.14
1.56	12.35	6.24	6.45	0.21	12.14
1.84	12.43	6.16	6.35	0.19	12.24
2.98	12.78	5.81	5.91	0.10	12.68
2.99	12.78	5.81	5.91	0.10	12.68
3.30	12.85	5.74	5.82	0.08	12.77

### 5.1.2.3.1.2 Método de Laursen

En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos por este método, donde  $Y_s$  es la altura de socavación más el tirante en ese punto.

Tabla XXXVII Cálculo de Socavación por Laursen en el Río Bilsa (ABS. 0+210)

Dist. a CL (m)	Elevación (m.s.n.m.)	$y_0$ (m)	$y_s$ (m)	$y_s - y_0$ (m)	Cota de Perfil de Socavación (m.s.n.m)
-10.21	18.30	0.288	0.33	0.04	18.26
-6.26	16.46	2.133	2.42	0.28	16.17
-4.94	15.30	3.291	3.73	0.44	14.86
-4.49	14.89	3.703	4.19	0.49	14.40
-3.70	13.42	5.166	5.85	0.68	12.74
-2.97	12.82	5.773	6.54	0.77	12.05
-2.95	12.80	5.789	6.56	0.77	12.03
-2.56	12.49	6.097	6.91	0.81	11.68
-0.38	12.42	6.166	6.98	0.82	11.61
-0.16	12.38	6.214	7.04	0.82	11.55
0.25	12.35	6.242	7.07	0.83	11.52
1.31	12.35	6.238	7.06	0.83	11.53
1.56	12.35	6.239	7.07	0.83	11.52
1.84	12.43	6.159	6.98	0.82	11.61
2.98	12.78	5.814	6.58	0.77	12.01
2.99	12.78	5.810	6.58	0.77	12.01
3.30	12.85	5.743	6.50	0.76	12.09
5.68	13.80	4.789	5.42	0.63	13.17
5.88	13.83	4.765	5.40	0.63	13.19
13.87	17.03	1.559	1.77	0.21	16.82

### 5.1.2.3.1.3 Comparación de Métodos

A continuación se muestra un gráfico comparativo del perfil analizado donde se puede apreciar el Terreno natural, el perfil socavado por el método de Lischtván – Lebediev y por el método de Laursen:

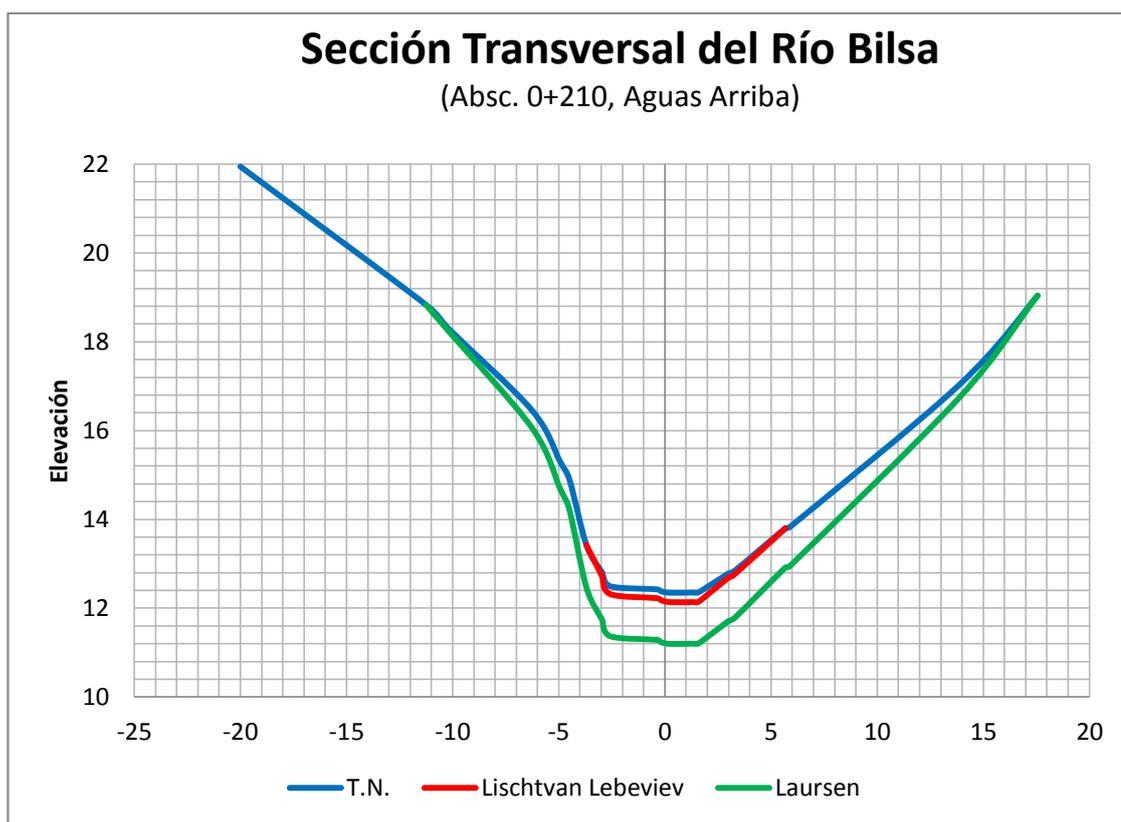


Fig. 5.14 Perfil de Socavación en la ABS (0+210)

Se puede apreciar que la profundidad calculada por el método de Laursen es mayor (0.83 m.) que la calculada por Lischtván Lebediev (0.21 m.) para esta abscisa.

### 5.1.2.3.2 Socavación en la abscisa 0+100 Cara aguas arriba del puente

Los resultados del análisis hidráulico necesarios para el cálculo de socavación son los siguientes:

Datos

WS (m)	D50 (mm)	Q (m <sup>3</sup> /s)	A (m <sup>2</sup> )	B (m)	Hm (m)	U
18.21	9.17	156.70	108.55	31.77	3.42	1.00

#### 5.1.2.3.2.1 Método de Lischtván – Lebediev

En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos por este método, donde  $Y_s$  es la altura de socavación más el tirante en ese punto.

Tabla XXXVIII Cálculo de Socavación por Lischtván – Lebediev en el Río Bilsa (ABS. 0+100)

Dist. a CL (m)	Elevación (m.s.n.m.)	$y_0$ (m)	$y_s$ (m)	$y_s - y_0$ (m)	Cota de Perfil de Socavación (m.s.n.m)
-9.98	16.61	1.60	1.61	0.01	16.60
-6.16	13.71	4.50	5.80	1.30	12.41
-5.49	13.55	4.66	6.06	1.40	12.15
-4.27	13.08	5.13	6.82	1.69	11.39
-2.03	12.41	5.80	7.94	2.14	10.27
-0.46	12.43	5.78	7.91	2.13	10.30
0.00	12.43	5.78	7.91	2.13	10.30
1.03	12.44	5.77	7.89	2.12	10.32
1.07	12.45	5.76	7.88	2.12	10.33
2.59	12.69	5.52	7.47	1.95	10.74
3.32	13.06	5.15	6.86	1.71	11.35

### 5.1.2.3.2 Método de Laursen

En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos por este método, donde  $Y_s$  es la altura de socavación más el tirante en ese punto.

Tabla XXXIX Cálculo de Socavación por Laursen en el Río Bilsa (ABS. 0+100)

Dist. a CL (m)	Elevación (m.s.n.m.)	$y_0$ (m)	$y_s$ (m)	$y_s - y_0$ (m)	Cota de Perfil de Socavación (m.s.n.m)
-9.98	16.61	1.600	1.78	0.18	16.43
-6.16	13.71	4.505	5.00	0.50	13.21
-5.49	13.55	4.662	5.18	0.51	13.03
-4.27	13.08	5.132	5.70	0.57	12.51
-2.03	12.41	5.802	6.44	0.64	11.77
-0.46	12.43	5.785	6.42	0.64	11.79
0.00	12.43	5.782	6.42	0.64	11.79
1.03	12.44	5.773	6.41	0.64	11.80
1.07	12.45	5.764	6.40	0.64	11.81
2.59	12.69	5.524	6.13	0.61	12.08
3.32	13.06	5.147	5.71	0.57	12.50
8.05	17.41	0.799	0.89	0.09	17.32

### 5.1.2.3.2.3 Comparación de Métodos

A continuación se muestra un gráfico comparativo del perfil analizado donde se puede apreciar el Terreno natural, el perfil socavado por el método de Lischtván – Lebediev y por el método de Laursen:

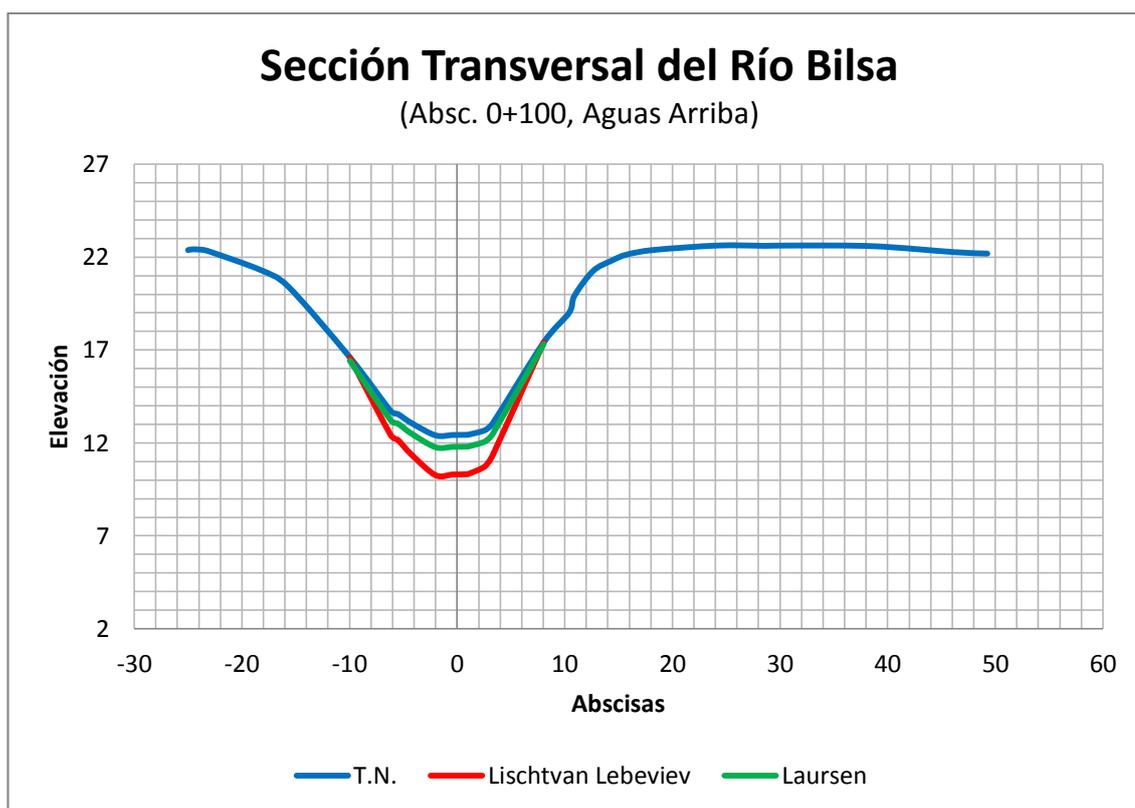


Fig. 5.15 Perfil de Socavación en la ABS (0+100)

A diferencia de la abscisa anterior (0+210) en esta sección, la profundidad de socavación en lecho vivo calculada por el método de Laursen es menor (0.64 m.) que la calculada por el Lischtván Lebediev (2.14 m.). La pendiente del

perfil de energía es la mayor de todo el cauce en este punto. Esto provoca un aumento de velocidad en el flujo de agua.

Adicionalmente esta sección es la de menor área hidráulica, lo que aumenta su potencial de arrastre de sedimentos. Sin embargo, la diferencia de anchos entre la sección 0+100 y su anterior 0+110 es apenas del 15 %, por lo que no representa una contracción importante para el cálculo del método de Laursen, por cuanto la profundidad de socavación es menor, o despreciable en términos prácticos.

#### **5.1.2.3.3 Socavación en la abscisa 0+090 Cara aguas abajo del puente**

Los resultados del análisis hidráulico necesarios para el cálculo de socavación son los siguientes:

WS (m)	D50 (mm)	Q (m <sup>3</sup> /s)	A (m <sup>2</sup> )	B (m)	Hm (m)	U
18.23	9.17	156.70	92.03	25.47	3.61	1.00

#### **5.1.2.3.3.1 Método de Lischtván – Lebediev**

En la siguiente tabla se muestran los resultados, donde  $Y_s$  es la altura de socavación más el tirante en ese punto.

**Tabla XL Cálculo de Socavación por Lischtván – Lebediev en el Río Bilsa (ABS. 0+090)**

Dist. a CL (m)	Elevación (m.s.n.m.)	$y_0$ (m)	$y_s$ (m)	$y_s - y_0$ (m)	Cota de Perfil de Socavación (m.s.n.m)
-12.71	17.57	0.66	0.38	-	-
-8.09	15.03	3.20	2.71	-	-
-4.67	12.76	5.47	5.27	-	-
-4.48	12.66	5.57	5.39	-	-
-0.89	12.39	5.84	5.72	-	-
-0.86	12.39	5.84	5.72	-	-
-0.70	12.39	5.84	5.72	-	-
0.00	12.45	5.78	5.64	-	-
2.25	12.66	5.57	5.39	-	-
2.51	12.74	5.49	5.30	-	-
3.39	13.00	5.23	4.99	-	-
7.84	15.66	2.57	2.07	-	-

#### **5.1.2.3.3.2 Método de Laursen**

En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos por este método, donde  $Y_s$  es la altura de socavación más el tirante en ese punto.

Tabla XLI Cálculo de Socavación por Laursen en el Río Bilsa (ABS. 0+090)

Dist. a CL (m)	Elevación (m.s.n.m.)	$y_0$ (m)	$y_s$ (m)	$y_s - y_0$ (m)	Cota de Perfil de Socavación (m.s.n.m)
-12.71	17.57	0.659	0.57	-	-
-8.09	15.03	3.200	2.78	-	-
-4.67	12.76	5.474	4.75	-	-
-4.48	12.66	5.567	4.83	-	-
-0.89	12.39	5.842	5.07	-	-
-0.86	12.39	5.845	5.07	-	-
-0.70	12.39	5.845	5.07	-	-
0.00	12.45	5.780	5.02	-	-
2.25	12.66	5.573	4.84	-	-
2.51	12.74	5.486	4.76	-	-
3.39	13.00	5.234	4.54	-	-
7.84	15.66	2.575	2.23	-	-

#### 5.1.2.3.4 Socavación en la abscisa 0+000 aguas abajo

Los resultados del análisis hidráulico necesarios para el cálculo de socavación son los siguientes:

#### Datos

WS (m)	D50 (mm)	Q (m <sup>3</sup> /s)	A (m <sup>2</sup> )	B (m)	Hm (m)	u
17.85	9.17	156.70	137.32	64.29	2.14	1.00

### 5.1.2.3.4.1 Método de Lischtván – Lebediev

En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos por este método, donde  $Y_s$  es la altura de socavación más el tirante en ese punto.

**Tabla XLII Cálculo de Socavación por Lischtván – Lebediev en el Río Bilsa (ABS. 0+000)**

Dist. a CL (m)	Elevación (m.s.n.m.)	$y_0$ (m)	$y_s$ (m)	$y_s - y_0$ (m)	Cota de Perfil de Socavación (m.s.n.m)
-12.08	16.00	1.85	1.36	-	-
-10.34	15.68	2.17	1.66	-	-
-8.74	15.17	2.68	2.16	-	-
-7.61	14.23	3.62	3.13	-	-
-6.02	12.56	5.29	5.01	-	-
-5.95	12.53	5.32	5.04	-	-
-5.72	12.43	5.42	5.16	-	-
-5.17	12.12	5.73	5.53	-	-
-2.46	12.25	5.60	5.37	-	-
0.35	12.51	5.34	5.06	-	-
0.39	12.52	5.33	5.05	-	-
1.05	13.71	4.14	3.69	-	-
1.97	14.63	3.22	2.71	-	-
4.57	15.49	2.36	1.84	-	-
12.09	15.70	2.15	1.64	-	-
19.94	15.80	2.05	1.55	-	-

### 5.1.2.3.4.2 Método de Laursen

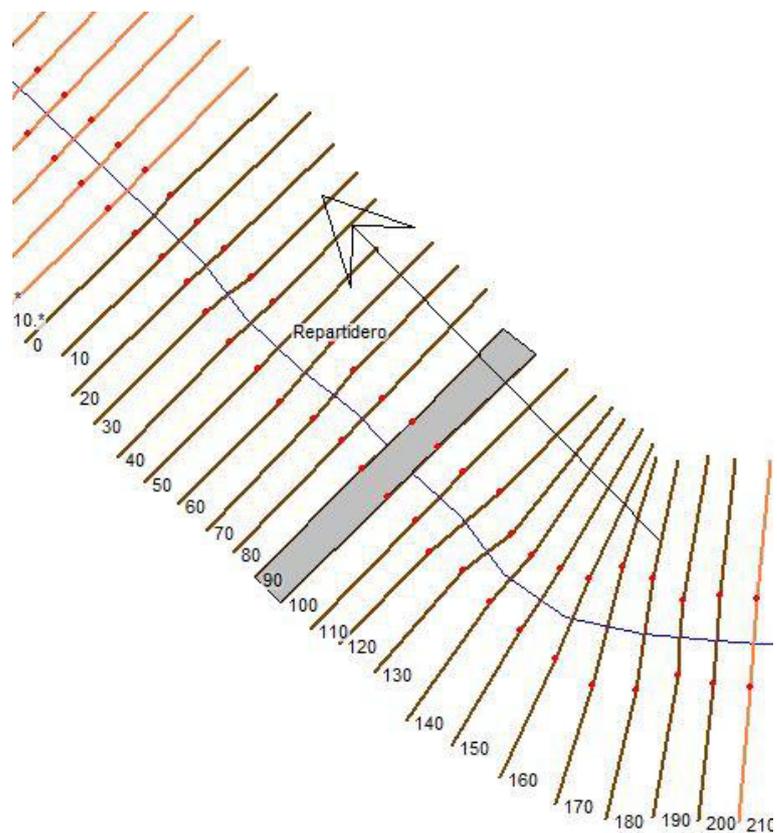
En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos por este método, donde  $Y_s$  es la altura de socavación más el tirante en ese punto.

Tabla XLIII Cálculo de Socavación por Laursen en el Río Bilsa (ABS. 0+000)

Dist. a CL (m)	Elevación (m.s.n.m.)	$y_0$ (m)	$y_s$ (m)	$y_s - y_0$ (m)	Cota de Perfil de Socavación (m.s.n.m)
-12.08	16.00	1.852	1.85	-	-
-10.34	15.68	2.174	2.17	-	-
-8.74	15.17	2.679	2.68	-	-
-7.61	14.23	3.623	3.62	-	-
-6.02	12.56	5.289	5.29	-	-
-5.95	12.53	5.318	5.32	-	-
-5.72	12.43	5.416	5.42	-	-
-5.17	12.12	5.733	5.73	-	-
-4.73	12.17	5.676	5.68	-	-
-3.00	12.17	5.679	5.68	-	-
-2.74	12.17	5.680	5.68	-	-
-2.46	12.25	5.601	5.60	-	-
0.35	12.51	5.336	5.34	-	-
0.39	12.52	5.332	5.33	-	-
1.05	13.71	4.143	4.14	-	-
1.97	14.63	3.223	3.22	-	-
4.57	15.49	2.363	2.36	-	-
12.09	15.70	2.153	2.15	-	-
19.94	15.80	2.053	2.05	-	-
37.86	16.92	0.933	0.93	-	-

### 5.1.2.4 Río Repartidero

Para el análisis de Socavación es necesario contar con los datos provenientes de la modelación en el programa HEC – RAS.

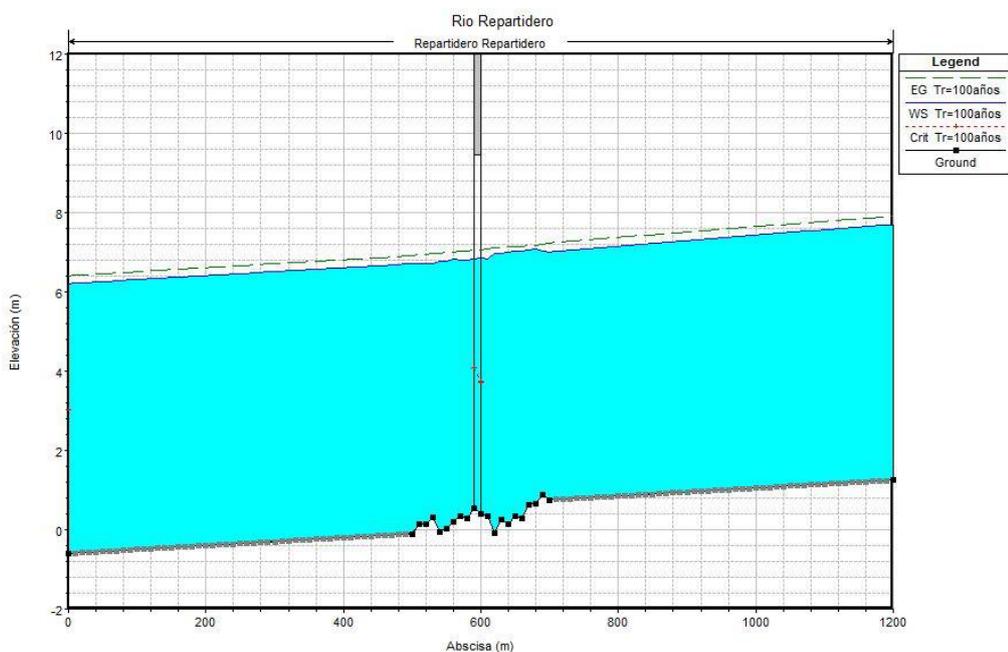


**Fig. 5.16 Vista en Planta de la modelación del Río Repartidero en HEC – RAS. Ubicación del puente en color gris**

Las secciones escogidas en este río para el análisis de socavación general son las ubicadas en las abscisas 0+190 (aguas arriba), 0+100 (borde aguas

arriba del puente), 0+090 (borde aguas abajo del puente), 0+000 (aguas abajo).

A continuación se muestra el gráfico de cada una de las secciones antes mencionadas con su respectiva distribución de velocidades tanto en el canal principal como en las márgenes izquierda y derecha.



**Fig. 5.17 Perfil longitudinal del Río Repartidero, en HEC – RAS**

La Fig. 5.17 denota que el río tiene un fondo irregular, sin embargo la pendiente media del río es considerablemente baja (0.0010 m/m), que casi no se observa el efecto del lecho sobre la superficie de agua.

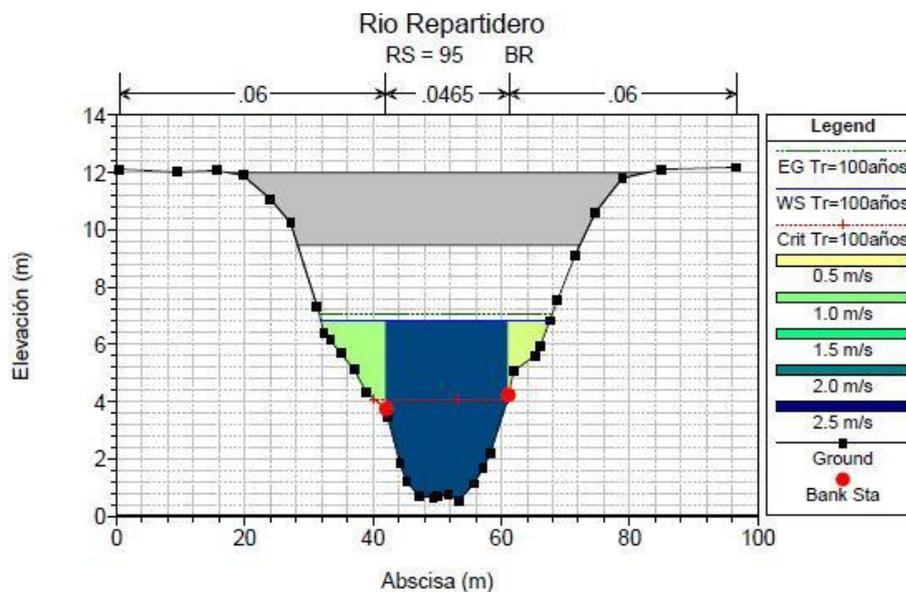


Fig. 5.18 Sección Transversal (ABS 0+090)

El gráfico anterior permite apreciar que con un caudal de diseño para un periodo de retorno de 100 años ( $245.60 \text{ m}^3/\text{s}$ ), el nivel alcanzado por el agua (6.87 m.s.n.m.) no compromete la estructura, ya sea por gálibo, o por posible socavación en sus estribos, ya que estos se encuentran fuera del cauce.

En la tabla siguiente se muestran los resultados de los análisis hidráulicos realizados a las secciones de estudio.

Tabla XLIV Tabla de resultados de modelación HEC – RAS

Abscisa	Elevación mínima de canal (m)	Nivel de Superficie de Agua (m)	Perfil de energía (m)	Pendiente de perfil de energía (m/m)	Velocidad del Canal (m/s)	Área Hidráulica (m <sup>2</sup> )	Ancho Superficie de Agua (m)	# Froude
200	0.75	7.00	7.23	0.001468	2.14	124.16	40.92	0.32
100	0.39	6.87	7.07	0.000968	2.06	137.14	33.69	0.27
90	0.54	6.82	7.05	0.001310	2.22	127.17	35.67	0.31
0	-0.10	6.71	6.91	0.001001	2.17	159.10	59.47	0.27

Luego de analizar todas las secciones antes mencionadas, se obtuvo como resultado socavación nula tanto por el método de Lischtvan Lebediev como por el método de Laursen para cada una de las abscisas en estudio.

Esto puede deberse a que este río presenta un fondo muy regular, no tiene una zona de estrangulamiento marcada, tiene una pendiente longitudinal muy baja (0.0010 m/m).

De entre todos los ríos estudiados, este es el segundo de partículas más grandes en el fondo del cauce (23.64 ms.).

#### 5.1.2.4.1 Socavación en la abscisa 0+190 Aguas arriba

Los resultados del análisis hidráulico necesarios para el cálculo de socavación son los siguientes:

#### 5.1.2.4.1.1 Método de Lischtván – Lebediev

En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos por este método, donde  $Y_s$  es la altura de socavación más el tirante en ese punto.

WS (m)	D50 (mm)	Q (m <sup>3</sup> /s)	A (m <sup>2</sup> )	B (m)	Hm (m)	u
7.00	23.64	245.60	124.16	40.92	3.03	1.00

Tabla XLV Cálculo de Socavación por Lischtván – Lebediev en el Río Repartidero (ABS. 0+190)

Dist. a CL (m)	Elevación (m.s.n.m.)	$y_0$ (m)	$y_s$ (m)	$y_s - y_0$ (m)	Cota de Perfil de Socavación (m.s.n.m)
-22.32	6.56	0.46	0.23	-	-
-17.38	5.17	1.85	1.34	-	-
-15.99	4.92	2.10	1.57	-	-
-12.67	2.86	4.16	3.72	-	-
-9.58	1.45	5.57	5.39	-	-
-8.21	1.16	5.86	5.74	-	-
-6.11	0.88	6.14	6.09	-	-
-2.53	1.26	5.76	5.62	-	-
5.47	1.56	5.46	5.25	-	-
6.95	2.24	4.78	4.44	-	-
7.87	3.67	3.35	2.83	-	-
10.53	4.92	2.10	1.57	-	-
15.22	6.39	0.63	0.34	-	-

#### 5.1.2.4.1.2 Método de Laursen

En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos por este método, donde  $Y_s$  es la altura de socavación más el tirante en ese punto.

**Tabla XLVI Cálculo de Socavación por Laursen en el Río Repartidero (ABS. 0+190)**

Dist. a CL (m)	Elevación (m.s.n.m.)	$y_0$ (m)	$y_s$ (m)	$y_s - y_0$ (m)	Cota de Perfil de Socavación (m.s.n.m)
-22.32	6.56	0.460	0.46	-	-
-17.38	5.17	1.855	1.86	-	-
-15.99	4.92	2.098	2.10	-	-
-12.67	2.86	4.159	4.16	-	-
-9.58	1.45	5.571	5.57	-	-
-8.21	1.16	5.860	5.86	-	-
-6.11	0.88	6.140	6.14	-	-
-2.53	1.26	5.761	5.76	-	-
-2.00	1.28	5.737	5.74	-	-
0.46	1.39	5.626	5.63	-	-
4.00	1.33	5.693	5.69	-	-
5.47	1.56	5.460	5.46	-	-
6.95	2.24	4.780	4.78	-	-
7.87	3.67	3.351	3.35	-	-
10.53	4.92	2.100	2.10	-	-
13.59	6.08	0.943	0.94	-	-
15.22	6.39	0.628	0.63	-	-

#### **5.1.2.4.2 Socavación en la abscisa 0+100 Cara aguas arriba del puente**

Los resultados del análisis hidráulico necesarios para el cálculo de socavación son los siguientes:

### 5.1.2.4.2.1 Método de Lischtván – Lebediev

En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos por este método, donde  $y_s$  es la altura de socavación más el tirante en ese punto.

**Tabla XLVII Cálculo de Socavación por Lischtván – Lebediev en el Río Repartidero (ABS. 0+100)**

Dist. a CL (m)	Elevación (m.s.n.m.)	$y_0$ (m)	$y_s$ (m)	$y_s - y_0$ (m)	Cota de Perfil de Socavación (m.s.n.m)
-20.40	6.20	0.67	0.33	-	-
-19.97	6.02	0.85	0.45	-	-
-16.21	5.30	1.57	0.97	-	-
-13.79	4.34	2.53	1.77	-	-
-10.66	3.35	3.52	2.69	-	-
-10.24	2.86	4.01	3.17	-	-
-8.53	1.79	5.08	4.27	-	-
-6.84	1.16	5.71	4.95	-	-
-5.05	0.50	6.37	5.69	-	-
4.04	0.86	6.01	5.29	-	-
4.10	0.88	5.99	5.26	-	-
4.83	1.09	5.78	5.03	-	-
7.05	2.03	4.84	4.02	-	-
9.00	3.20	3.67	2.83	-	-
9.70	3.85	3.02	2.21	-	-
11.83	6.36	0.51	0.23	-	-

### 5.1.2.4.2 Método de Laursen

En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos por este método, donde  $Y_s$  es la altura de socavación más el tirante en ese punto.

Tabla XLVIII Cálculo de Socavación por Laursen en el Río Repartidero (ABS. 0+100)

Dist. a CL (m)	Elevación (m.s.n.m.)	$y_0$ (m)	$y_s$ (m)	$y_s - y_0$ (m)	Cota de Perfil de Socavación (m.s.n.m)
-20.40	6.20	0.672	0.67	-	-
-19.97	6.02	0.852	0.85	-	-
-16.21	5.30	1.570	1.57	-	-
-13.79	4.34	2.530	2.53	-	-
-10.66	3.35	3.518	3.52	-	-
-10.24	2.86	4.011	4.01	-	-
-8.53	1.79	5.080	5.08	-	-
-6.84	1.16	5.710	5.71	-	-
-5.05	0.50	6.370	6.37	-	-
-2.00	0.39	6.481	6.48	-	-
-1.92	0.39	6.482	6.48	-	-
1.68	0.65	6.220	6.22	-	-
4.04	0.86	6.006	6.01	-	-
4.10	0.88	5.990	5.99	-	-
4.83	1.09	5.784	5.78	-	-
7.05	2.03	4.840	4.84	-	-
9.00	3.20	3.671	3.67	-	-
9.70	3.85	3.017	3.02	-	-
11.83	6.36	0.512	0.51	-	-

### 5.1.2.4.3 Socavación en la abscisa 0+090 Cara aguas abajo del puente

Los resultados del análisis hidráulico necesarios para el cálculo de socavación son los siguientes:

#### 5.1.2.4.3.1 Método de Lischtván – Lebediev

Resultados obtenidos donde  $Y_s$  es la altura de socavación más el tirante.

Tabla XLIX Cálculo de Socavación por Lischtván – Lebediev en el Río Repartidero (ABS. 0+090)

Dist. a CL (m)	Elevación (m.s.n.m.)	$y_0$ (m)	$y_s$ (m)	$y_s - y_0$ (m)	Cota de Perfil de Socavación (m.s.n.m)
-17.68	6.41	0.41	0.16	-	-
-16.63	6.14	0.68	0.31	-	-
-15.05	5.68	1.14	0.59	-	-
-12.95	5.12	1.70	0.98	-	-
-11.05	4.31	2.51	1.61	-	-
-8.01	3.74	3.08	2.08	-	-
-7.71	3.46	3.36	2.32	-	-
-5.79	1.83	4.99	3.83	-	-
-4.74	1.20	5.62	4.45	-	-
-0.59	0.64	6.18	5.02	-	-
3.37	0.54	6.28	5.12	-	-
5.68	1.13	5.69	4.52	-	-
7.16	1.68	5.14	3.98	-	-
8.26	2.18	4.64	3.49	-	-
11.16	4.23	2.59	1.67	-	-
15.24	5.60	1.22	0.64	-	-
16.00	5.92	0.90	0.44	-	-

### 5.1.2.4.3.2 Método de Laursen

En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos por este método, donde  $Y_s$  es la altura de socavación más el tirante en ese punto.

Tabla L Cálculo de Socavación por Laursen en el Río Repartidero (ABS. 0+090)

Dist. a CL (m)	Elevación (m.s.n.m.)	$y_0$ (m)	$y_s$ (m)	$y_s - y_0$ (m)	Cota de Perfil de Socavación (m.s.n.m)
-17.68	6.41	0.410	0.41	-	-
-16.63	6.14	0.680	0.68	-	-
-15.05	5.68	1.140	1.14	-	-
-12.95	5.12	1.700	1.70	-	-
-11.05	4.31	2.510	2.51	-	-
-8.01	3.74	3.082	3.08	-	-
-7.71	3.46	3.364	3.36	-	-
-5.79	1.83	4.990	4.99	-	-
-4.74	1.20	5.620	5.62	-	-
-2.84	0.71	6.110	6.11	-	-
0.00	0.68	6.142	6.14	-	-
1.68	0.74	6.080	6.08	-	-
3.37	0.54	6.280	6.28	-	-
5.68	1.13	5.690	5.69	-	-
7.16	1.68	5.143	5.14	-	-
8.26	2.18	4.640	4.64	-	-
11.16	4.23	2.594	2.59	-	-
11.87	5.05	1.771	1.77	-	-
15.24	5.60	1.218	1.22	-	-
16.00	5.92	0.900	0.90	-	-

#### 5.1.2.4.4 Socavación en la abscisa 0+000 Aguas abajo

##### 5.1.2.4.4.1 Método de Lischtván – Lebediev

En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos por este método, donde  $Y_s$  es la altura de socavación más el tirante en ese punto.

Tabla LI Cálculo de Socavación por Lischtván – Lebediev en el Río Repartidero (ABS. 0+000)

Dist. a CL (m)	Elevación (m.s.n.m.)	$y_0$ (m)	$y_s$ (m)	$y_s - y_0$ (m)	Cota de Perfil de Socavación (m.s.n.m)
-30.21	6.67	0.04	0.01	-	-
-20.63	6.02	0.69	0.29	-	-
-16.11	5.70	1.01	0.47	-	-
-12.00	5.03	1.68	0.89	-	-
-6.96	1.98	4.73	3.30	-	-
-6.76	1.90	4.81	3.37	-	-
-5.76	0.40	6.31	4.75	-	-
-3.34	-0.06	6.77	5.19	-	-
1.68	-0.10	6.81	5.23	-	-
4.63	0.19	6.52	4.95	-	-
5.68	0.51	6.20	4.64	-	-
6.00	0.85	5.86	4.32	-	-
7.31	2.32	4.39	3.00	-	-
16.42	4.24	2.47	1.45	-	-
16.92	4.32	2.39	1.39	-	-
17.49	4.56	2.15	1.22	-	-
20.79	6.30	0.41	0.15	-	-
23.58	6.62	0.09	0.02	-	-

##### 5.1.2.4.4.2 Método de Laursen

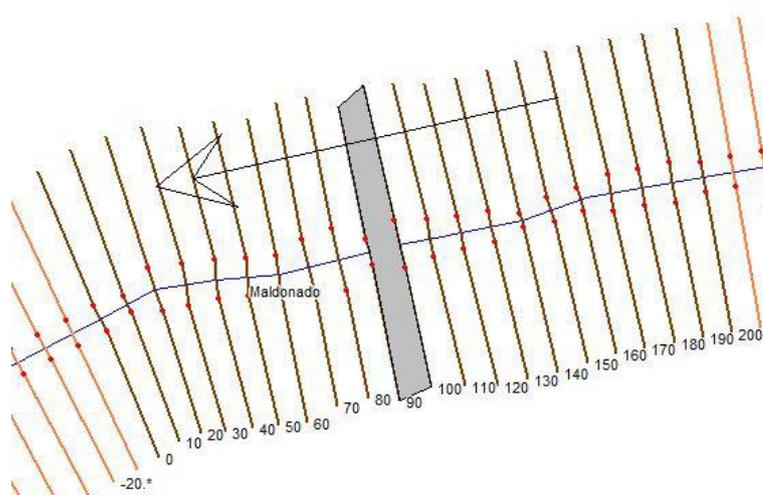
En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos por este método, donde  $Y_s$  es la altura de socavación más el tirante en ese punto.

Tabla LII Cálculo de Socavación por Laursen en el Río Repartidero (ABS. 0+000)

Dist. a CL (m)	Elevación (m.s.n.m.)	$y_0$ (m)	$y_s$ (m)	$y_s - y_0$ (m)	Cota de Perfil de Socavación (m.s.n.m)
-30.21	6.67	0.040	0.04	-	-
-23.93	6.19	0.522	0.52	-	-
-23.76	6.19	0.522	0.52	-	-
-20.63	6.02	0.690	0.69	-	-
-16.11	5.70	1.010	1.01	-	-
-12.00	5.03	1.680	1.68	-	-
-6.96	1.98	4.729	4.73	-	-
-6.76	1.90	4.806	4.81	-	-
-5.76	0.40	6.315	6.32	-	-
-3.34	-0.06	6.774	6.77	-	-
1.68	-0.10	6.810	6.81	-	-
4.63	0.19	6.520	6.52	-	-
5.68	0.51	6.200	6.20	-	-
6.00	0.85	5.865	5.87	-	-
7.31	2.32	4.388	4.39	-	-
7.51	2.47	4.238	4.24	-	-
16.42	4.24	2.474	2.47	-	-
16.92	4.32	2.394	2.39	-	-
17.49	4.56	2.154	2.15	-	-
20.79	6.30	0.415	0.42	-	-

### 5.1.2.5 Río Maldonado

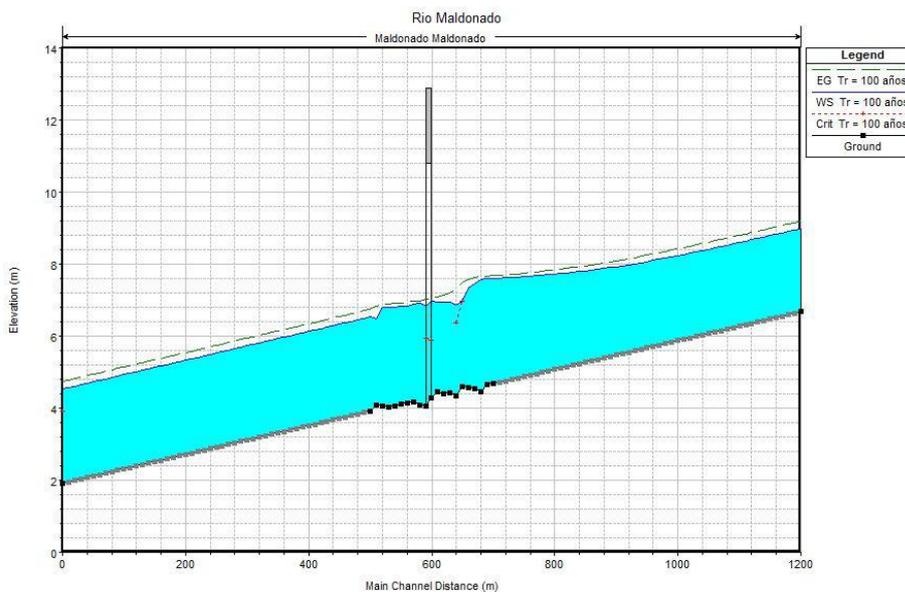
Para el análisis de socavación se requirió contar con los datos provenientes de la modelación en el programa HEC – RAS.



**Fig. 5.19 Vista en Planta del modelación del Río Maldonado en HEC – RAS. Ubicación del puente en color gris**

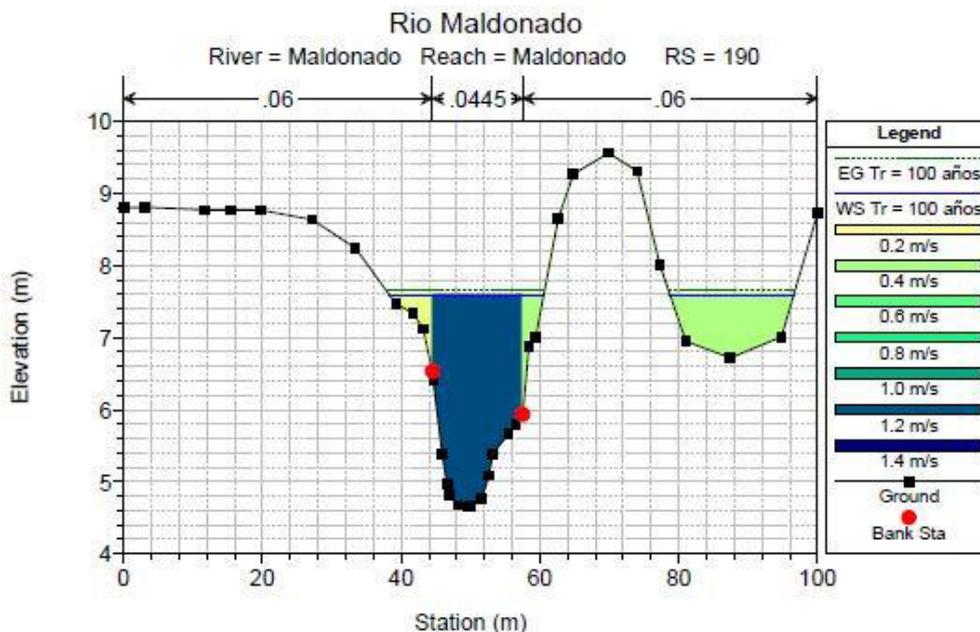
Las secciones escogidas en este río para el análisis de socavación general son las ubicadas en las abscisas 0+190 (aguas arriba), 0+100 (borde aguas arriba del puente), 0+090 (borde aguas abajo del puente), 0+000 (aguas abajo).

A continuación se muestra el gráfico de cada una de las secciones antes mencionadas con su respectiva distribución de velocidades tanto en el canal principal como en las márgenes izquierda y derecha.



**Fig. 5.20 Perfil longitudinal del Río Maldonado**

En la Fig. 5.20 se puede apreciar un efecto de remanso antes del puente producido posiblemente por la irregularidad del fondo. También se puede denotar la pendiente alta que tiene este río (0.0040 m/m).



**Fig. 5.21 Seccion Transversal (ABS 0+190)**

La Fig. 5.21 muestra la configuración que tiene el río en la abscisa 0+190, se puede observar que existe un cauce secundario a la derecha del principal. Sin embargo, no es de mucha influencia sobre las estimaciones realizadas, ya que el nivel del fondo de este cauce secundario es muy alto y la velocidad del flujo que transita muy éste, es muy baja.

En la tabla siguiente se muestran los resultados de los análisis hidráulicos realizados a las secciones de estudio.

**Tabla LIII Tabla de resultados de modelación HEC – RAS**

Abscisa	Elevación mínima de canal (m)	Nivel de Superficie de Agua (m)	Perfil de energía (m)	Pendiente de perfil de energía (m/m)	Velocidad del Canal (m/s)	Área Hidráulica (m <sup>2</sup> )	Ancho Superficie de Agua (m)	# Froude
190	4.65	7.59	7.66	0.001006	1.22	46.43	40.07	0.25
100	4.27	6.96	7.06	0.001693	1.41	31.64	19.60	0.32
90	4.07	6.83	7.03	0.002831	2.03	26.57	26.64	0.43
0	3.92	6.53	6.74	0.003999	2.12	23.78	16.36	0.48

#### 5.1.2.5.1 Socavación en la abscisa 0+190 Aguas arriba

Los resultados del análisis hidráulico necesarios para el cálculo de socavación son los siguientes:

Datos

WS (m)	D50 (mm)	Q (m <sup>3</sup> /s)	A (m <sup>2</sup> )	B (m)	Hm (m)	u
7.60	15.96	43.40	46.26	38.06	1.22	1.00

### 5.1.2.5.1.1 Método de Lischtván – Lebediev

En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos por este método, donde  $Y_s$  es la altura de socavación más el tirante en ese punto.

Tabla LIV Cálculo de Socavación por Lischtván – Lebediev en el Río Maldonado (ABS. 0+190)

Dist. a CL (m)	Elevación (m.s.n.m.)	$y_0$ (m)	$y_s$ (m)	$y_s - y_0$ (m)	Cota de Perfil de Socavación (m.s.n.m)
-10.73	7.47	0.12	0.04		-
-6.84	7.12	0.47	0.24	-	-
-5.50	6.53	1.06	0.67	-	-
-5.37	6.42	1.17	0.75	-	-
-4.08	5.39	2.20	1.67	-	-
-3.38	4.97	2.62	2.08	-	-
-3.06	4.81	2.78	2.24	-	-
-0.38	4.65	2.94	2.41	-	-
0.08	4.67	2.92	2.39	-	-
1.58	4.76	2.83	2.30	-	-
2.62	5.09	2.50	1.96	-	-
3.15	5.39	2.20	1.67	-	-
5.48	5.67	1.92	1.41	-	-
6.50	5.80	1.79	1.29	-	-
7.54	5.93	1.66	1.17	-	-
8.39	6.87	0.72	0.41	-	-
9.37	7.00	0.59	0.32	-	-
12.65	8.66	-	-	-	-

### 5.1.2.5.1.2 Método de Laursen

En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos por este método, donde  $Y_s$  es la altura de socavación más el tirante en ese punto.

**Tabla LV Cálculo de Socavación por Laursen en el Río Maldonado (ABS. 0+190)**

Dist. a CL (m)	Elevación (m.s.n.m.)	$y_0$ (m)	$y_s$ (m)	$y_s - y_0$ (m)	Cota de Perfil de Socavación (m.s.n.m)
-10.73	7.47	0.124	0.12	-	-
-8.27	7.34	0.250	0.25	-	-
-6.84	7.12	0.470	0.47	-	-
-5.50	6.53	1.058	1.06	-	-
-5.37	6.42	1.175	1.18	-	-
-4.08	5.39	2.200	2.20	-	-
-3.38	4.97	2.623	2.62	-	-
-3.06	4.81	2.780	2.78	-	-
-1.87	4.67	2.917	2.92	-	-
-0.38	4.65	2.945	2.95	-	-
1.58	4.76	2.833	2.83	-	-
2.62	5.09	2.505	2.51	-	-
3.15	5.39	2.202	2.20	-	-
5.48	5.67	1.921	1.92	-	-
6.50	5.80	1.790	1.79	-	-
7.54	5.93	1.656	1.66	-	-
8.39	6.87	0.718	0.72	-	-
9.37	7.00	0.588	0.59	-	-
12.65	8.66	-	-	-	-
14.80	9.27	-	-	-	-

#### **5.1.2.5.2 Socavación en la abscisa 0+100 Cara aguas arriba del puente**

Los resultados del análisis hidráulico necesarios para el cálculo de socavación son los siguientes:

WS (m)	D50 (mm)	Q (m <sup>3</sup> /s)	A (m <sup>2</sup> )	B (m)	Hm (m)	u
6.96	15.96	43.40	31.64	19.60	1.61	1.00

#### 5.1.2.5.2.1 Método de Lischtván – Lebediev

En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos por este método, donde  $Y_s$  es la altura de socavación más el tirante en ese punto.

Tabla LVI Cálculo de Socavación por Lischtván – Lebediev en el Río Maldonado (ABS. 0+100)

Dist. a CL (m)	Elevación (m.s.n.m.)	$y_0$ (m)	$y_s$ (m)	$y_s - y_0$ (m)	Cota de Perfil de Socavación (m.s.n.m)
-5.57	4.73	2.23	2.28	0.05	4.68
-5.53	4.73	2.23	2.28	0.05	4.68
-2.41	4.40	2.56	2.71	0.15	4.25
-2.37	4.39	2.57	2.72	0.15	4.24
-1.66	4.29	2.67	2.86	0.19	4.10
-1.60	4.29	2.67	2.86	0.19	4.10
-1.00	4.27	2.69	2.88	0.19	4.08
0.27	4.31	2.65	2.83	0.18	4.13

#### 5.1.2.5.2.2 Método de Laursen

En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos por este método, donde  $Y_s$  es la altura de socavación más el tirante en ese punto.

**Tabla LVII Cálculo de Socavación por Laursen en el Río Maldonado (ABS. 0+100)**

Dist. a CL (m)	Elevación (m.s.n.m.)	$y_0$ (m)	$y_s$ (m)	$y_s - y_0$ (m)	Cota de Perfil de Socavación (m.s.n.m)
-11.62	6.09	0.870	0.87	-	-
-10.55	5.64	1.320	1.32	-	-
-7.90	5.38	1.580	1.58	-	-
-6.49	5.24	1.720	1.72	-	-
-6.10	4.97	1.990	1.99	-	-
-5.57	4.73	2.227	2.23	-	-
-5.53	4.73	2.231	2.23	-	-
-2.41	4.40	2.560	2.56	-	-
-2.37	4.39	2.575	2.58	-	-
-1.66	4.29	2.672	2.67	-	-
-1.60	4.29	2.670	2.67	-	-
-1.00	4.27	2.688	2.69	-	-
0.27	4.31	2.650	2.65	-	-
2.07	4.90	2.060	2.06	-	-
3.99	6.26	0.700	0.70	-	-

### 5.1.2.5.2.3 Comparación de Métodos

Si bien se muestra un valor de socavación en esta abscisa por el método de Lischtvan Lebediev, éste es muy bajo (0.16 m.), por lo que podría decirse que no existe socavación en esta sección.

A continuación se muestra un gráfico comparativo del perfil analizado donde se puede apreciar el Terreno natural, el perfil socavado por el método de Lischtvan – Lebediev ya que el método de Laursen no presenta socavación:

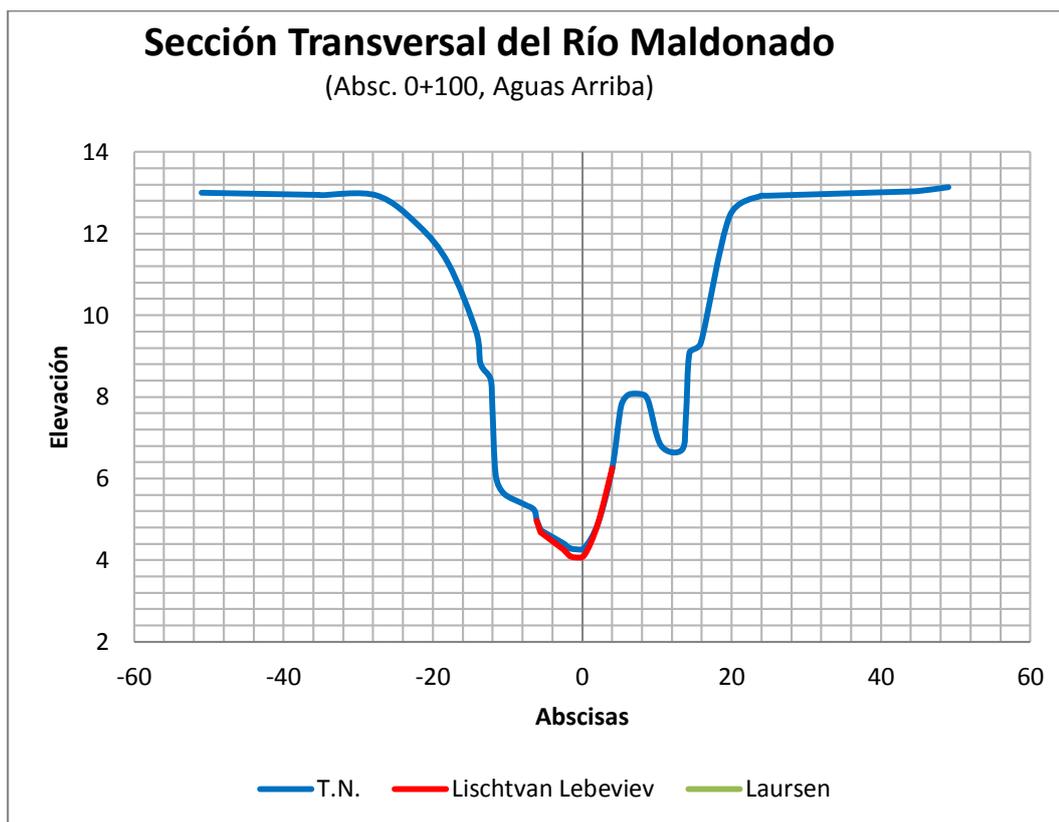


Fig. 5.22 Perfil de Socavación en la ABS (0+100)

### 5.1.2.5.3 Socavación en la abscisa 0+090 Cara aguas abajo del puente

Los resultados del análisis hidráulico necesarios para el cálculo de socavación son los siguientes:

WS (m)	D50 (mm)	Q (m <sup>3</sup> /s)	A (m <sup>2</sup> )	B (m)	Hm (m)	U
6.83	15.96	43.40	26.57	26.64	1.00	1.00

### 5.1.2.5.3.1 Método de Lischtván – Lebediev

La siguiente tabla muestra los resultados por este método, donde  $Y_s$  es la altura de socavación más el tirante en ese punto.

Tabla LVIII Cálculo de Socavación por Lischtván – Lebediev en el Río Maldonado (ABS. 0+090)

Dist. a CL (m)	Elevación (m.s.n.m.)	$y_0$ (m)	$y_s$ (m)	$y_s - y_0$ (m)	Cota de Perfil de Socavación (m.s.n.m)
-13.62	6.81	0.02	0.00	-	-
-7.30	5.18	1.65	1.11	-	-
-6.97	5.03	1.80	1.24	-	-
-6.93	5.01	1.82	1.25	-	-
-4.22	4.73	2.10	1.50	-	-
-3.15	4.36	2.47	1.84	-	-
-2.70	4.16	2.67	2.03	-	-
0.17	4.36	2.47	1.84	-	-
1.18	4.89	1.94	1.36	-	-
4.70	6.77	0.06	0.02	-	-
10.61	6.71	0.12	0.04	-	-

### 5.1.2.5.3.2 Método de Laursen

En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos por este método, donde  $Y_s$  es la altura de socavación más el tirante en ese punto.

Tabla LIX Cálculo de Socavación por Laursen en el Río Maldonado (ABS. 0+090)

Dist. a CL (m)	Elevación (m.s.n.m.)	$y_0$ (m)	$y_s$ (m)	$y_s - y_0$ (m)	Cota de Perfil de Socavación (m.s.n.m)
-13.62	6.81	0.021	0.01	-	-
-9.97	6.20	0.630	0.30	-	-
-8.62	5.73	1.098	0.53	-	-
-8.47	5.73	1.102	0.53	-	-
-7.30	5.18	1.648	0.80	-	-
-6.97	5.03	1.804	0.87	-	-
-6.93	5.01	1.819	0.88	-	-
-4.42	4.76	2.074	1.00	-	-
-4.22	4.74	2.095	1.01	-	-
-4.22	4.73	2.096	1.01	-	-
-3.15	4.36	2.470	1.19	-	-
-2.70	4.16	2.670	1.29	-	-
-2.03	4.07	2.760	1.33	-	-
-0.85	4.07	2.760	1.33	-	-
0.17	4.36	2.470	1.19	-	-
1.18	4.89	1.940	0.94	-	-
2.20	6.09	0.740	0.36	-	-
3.27	6.59	0.240	0.12	-	-
4.70	6.77	0.065	0.03	-	-
10.61	6.71	0.125	0.06	-	-

#### 5.1.2.5.4 Socavación en la abscisa 0+000 Aguas abajo

Los resultados del análisis hidráulico necesarios para el cálculo de socavación son los siguientes:

WS (m)	D50 (mm)	Q (m <sup>3</sup> /s)	A (m <sup>2</sup> )	B (m)	Hm (m)	U
6.53	15.96	43.40	23.78	16.36	1.45	1.00

#### 5.1.2.5.4.1 Método de Lischtván – Lebediev

En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos por este método, donde  $Y_s$  es la altura de socavación más el tirante en ese punto.

Tabla LX Cálculo de Socavación por Lischtván – Lebediev en el Río Maldonado (ABS. 0+000)

Dist. a CL (m)	Elevación (m.s.n.m.)	$y_0$ (m)	$y_s$ (m)	$y_s - y_0$ (m)	Cota de Perfil de Socavación (m.s.n.m.)
-9.32	5.57	0.96	1.26	0.30	5.27
-6.00	5.32	1.21	1.69	0.48	4.84
-3.58	5.06	1.47	2.16	0.69	4.37
-2.86	4.84	1.69	2.58	0.89	3.95
-2.00	4.09	2.44	4.10	1.66	2.43
-1.32	3.94	2.59	4.42	1.83	2.11
0.00	3.92	2.61	4.46	1.85	2.07
0.76	3.95	2.58	4.39	1.81	2.14
1.61	4.20	2.33	3.86	1.53	2.67
3.16	5.35	1.18	1.64	0.46	4.89

#### 5.1.2.5.4.2 Método de Laursen

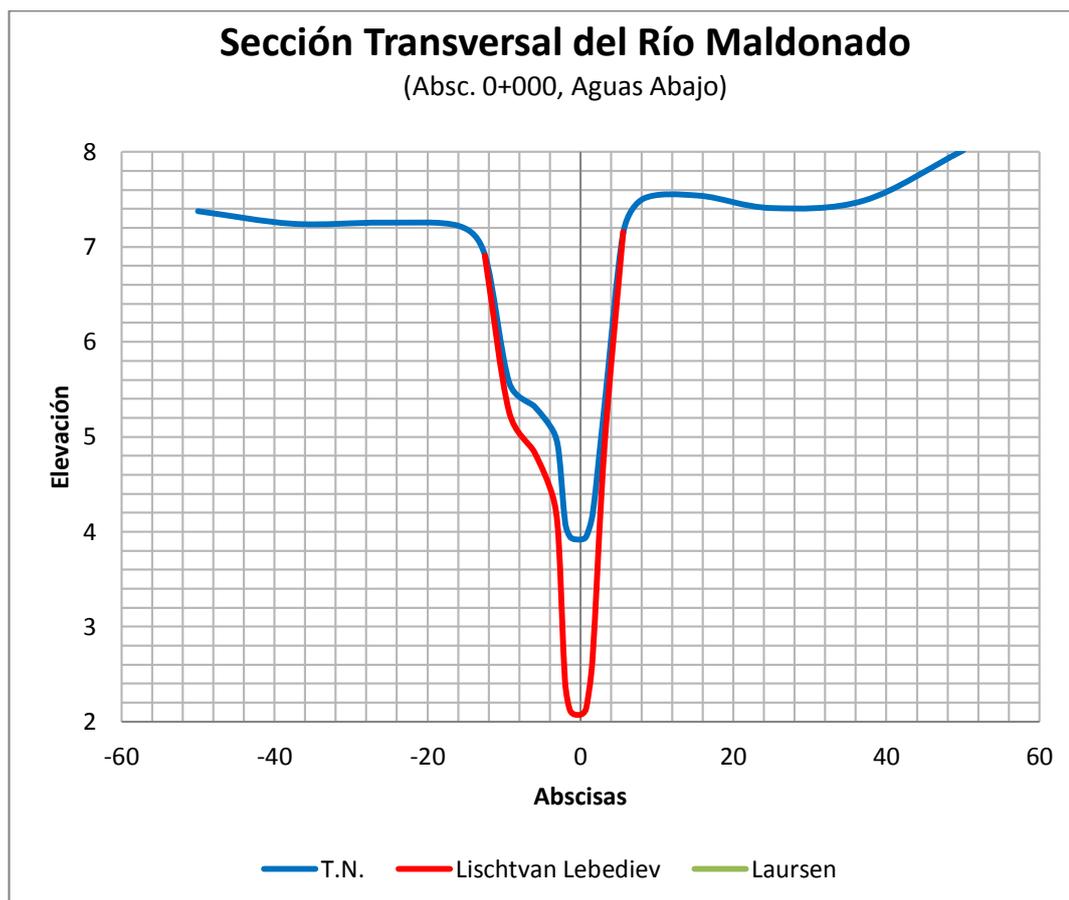
En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos por este método, donde  $Y_s$  es la altura de socavación más el tirante en ese punto.

Tabla LXI Cálculo de Socavación por Laursen en el Río Maldonado (ABS. 0+000)

Dist. a CL (m)	Elevación (m.s.n.m.)	$y_0$ (m)	$y_s$ (m)	$y_s - y_0$ (m)	Cota de Perfil de Socavación (m.s.n.m)
-9.32	5.57	0.962	0.95	-	-
-6.00	5.32	1.213	1.19	-	-
-3.58	5.06	1.470	1.44	-	-
-2.86	4.84	1.686	1.66	-	-
-2.00	4.09	2.440	2.40	-	-
-1.32	3.94	2.590	2.54	-	-
0.00	3.92	2.613	2.57	-	-
0.76	3.95	2.580	2.53	-	-
1.61	4.20	2.330	2.29	-	-
3.16	5.35	1.181	1.16	-	-

#### 5.1.2.5.4.3 Comparación de Métodos

A continuación se muestra un gráfico comparativo (Fig. 5.23) del perfil analizado, donde se puede apreciar el terreno natural y el perfil socavado por el método de Lischtvan – Lebediev, ya que por el método de Laursen no se obtuvo socavación:



**Fig. 5.23 Perfil de Socavación en la ABS (0+000)**

En este río solo se da socavación en la abscisa 0+000 y sólo por el método de Lischtván Lebediev. De las cuatro secciones estudiadas en este río, ésta es la que presenta una mayor pendiente en su perfil de energía (0.0039 m/m), y la mayor velocidad de todas (2.12 m/s). Sin embargo, no existe gran diferencia entre los anchos de la sección en estudio y sus similares aguas arriba, por lo que la profundidad de socavación por el método de Laursen es nula.

### 5.1.2.6 Río Aguas Claras

Para el análisis de Socavación es necesario contar con los datos provenientes de la modelación en el programa HEC – RAS.

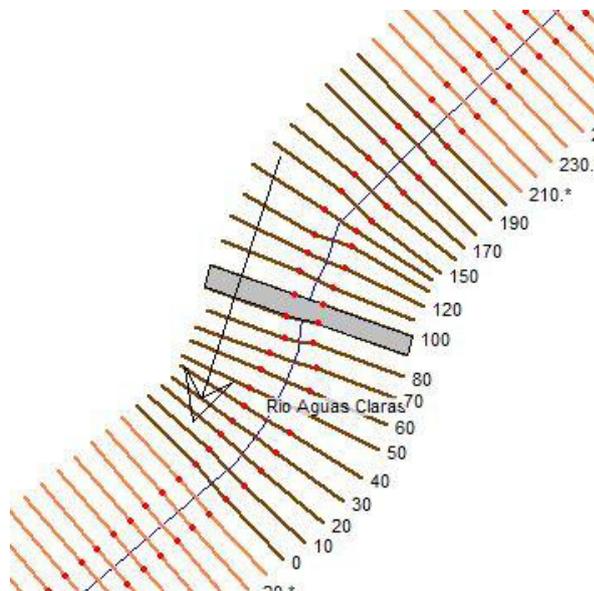


Fig. 5.24 Vista en Planta del modelación del Río Aguas Claras en HEC – RAS. Ubicación del puente en color gris

En el gráfico anterior que el puente está ubicado sobre un pequeño meandro del río. A pesar que la curvatura de éste no es muy pronunciada, debería ser necesaria alguna estructura de protección sobre los estribos de ese lado, para prevenir posibles problemas de socavación local. Las secciones escogidas en este río para el análisis de socavación general son las ubicadas en las abscisas 0+190 (aguas arriba), 0+100 (borde aguas arriba del puente), 0+090 (borde aguas abajo del puente), 0+000 (aguas abajo).

A continuación se muestra el gráfico de cada una de las secciones antes mencionadas con su respectiva distribución de velocidades tanto en el canal principal como en las márgenes izquierda y derecha.

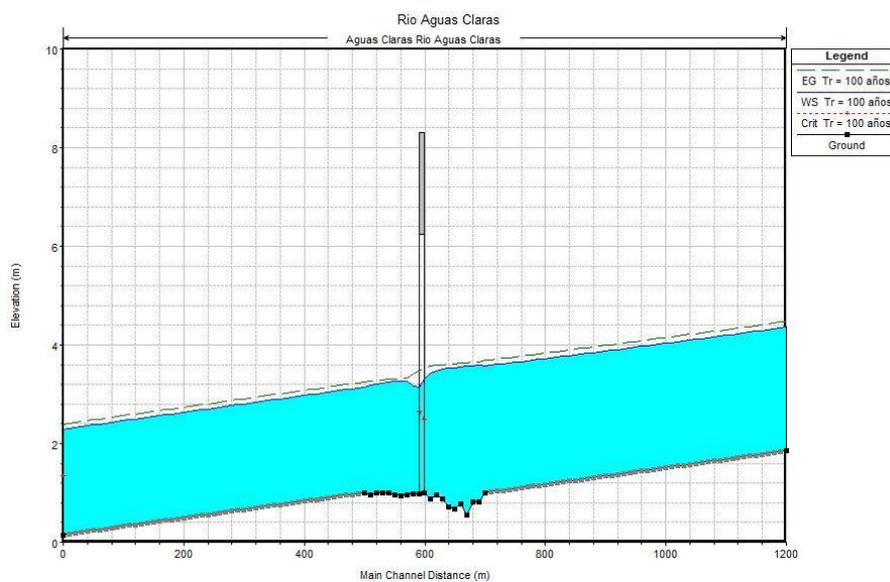


Fig. 5.25 Perfil longitudinal del Río Aguas Claras HEC – RAS

En la Fig. 5.25 se observa claramente una hondonada antes del tramo del puente, y el efecto que tiene ésta sobre la superficie de agua.

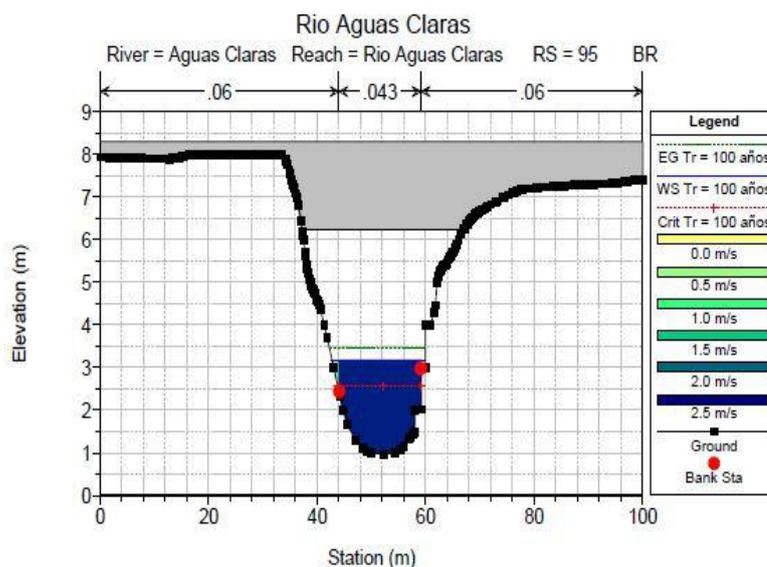


Fig. 5.26 Sección Transversal (ABS 0+090)

La configuración del río en la abscisa del puente, mostrada en la Fig. 5.26, muestra que los estribos no se verían comprometidos con el nivel de agua alcanzado (3.14 m.s.n.m.) por el caudal de diseño (67.00 m<sup>3</sup>/s).

En la tabla siguiente se muestran los resultados de los análisis hidráulicos realizados a las secciones de estudio.

**Tabla LXII Tabla de resultados de modelación HEC – RAS**

Abscisa	Elevación mínima de canal (m)	Nivel de Superficie de Agua (m)	Perfil de energía (m)	Pendiente de perfil de energía (m/m)	Velocidad del Canal (m/s)	Área Hidráulica (m <sup>2</sup> )	Ancho Superficie de Agua (m)	# Froude
200	1.00	3.57	3.68	0.001472	1.48	47.30	26.26	0.32
100	1.00	3.31	3.53	0.003231	2.1	33.11	18.26	0.47
90	0.97	3.14	3.48	0.005911	2.61	26.61	16.83	0.61
0	1.00	3.14	3.25	0.001707	1.48	53.87	47.58	0.34

#### **5.1.2.6.1 Socavación en la abscisa 0+190 Aguas arriba**

Los resultados del análisis hidráulico necesarios para el cálculo de socavación son los siguientes:

## DATOS

WS (m)	D50 (mm)	Q (m <sup>3</sup> /s)	A (m <sup>2</sup> )	B (m)	Hm (m)	U
3.57	2.10	67.00	47.30	26.26	1.80	1.00

**5.1.2.6.1.1 Método de Lischtván – Lebediev**

En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos por este método, donde  $Y_s$  es la altura de socavación más el tirante en ese punto.

**Tabla LXIII Cálculo de Socavación por Lischtván – Lebediev en el Río Aguas Claras (ABS. 0+190)**

Dist. a CL (m)	Elevación (m.s.n.m.)	$y_0$ (m)	$y_s$ (m)	$y_s - y_0$ (m)	Cota de Perfil de Socavación (m.s.n.m)
-9.77	2.00	1.56	1.80	0.24	1.76
-9.00	1.72	1.84	2.20	0.36	1.36
-7.55	1.33	2.23	2.77	0.54	0.79
-6.00	1.00	2.56	3.27	0.71	0.29
-4.13	0.88	2.68	3.45	0.77	0.11
0.00	1.00	2.56	3.27	0.71	0.29
4.06	0.81	2.75	3.56	0.81	0.00
6.86	0.90	2.66	3.42	0.76	0.14
7.93	1.01	2.55	3.25	0.70	0.31
8.67	1.12	2.44	3.08	0.64	0.48
9.67	1.59	1.97	2.39	0.42	1.17
10.35	2.00	1.56	1.80	0.24	1.76

### 5.1.2.6.1.2 Método de Laursen

En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos por este método, donde  $Y_s$  es la altura de socavación más el tirante en ese punto.

Tabla LXIV Cálculo de Socavación por Laursen en el Río Aguas Claras (ABS. 0+190)

Dist. a CL (m)	Elevación (m.s.n.m.)	$y_0$ (m)	$y_s$ (m)	$y_s - y_0$ (m)	Cota de Perfil de Socavación (m.s.n.m)
-12.84	3.00	0.560	0.45	-	-
-12.83	3.00	0.560	0.45	-	-
-12.81	3.00	0.560	0.45	-	-
-12.39	2.85	0.714	0.57	-	-
-9.77	2.00	1.560	1.25	-	-
-9.00	1.72	1.844	1.48	-	-
-7.55	1.33	2.230	1.79	-	-
-6.00	1.00	2.560	2.06	-	-
-4.13	0.88	2.680	2.16	-	-
0.00	1.00	2.560	2.06	-	-
4.06	0.81	2.750	2.21	-	-
6.86	0.90	2.660	2.14	-	-
7.93	1.01	2.550	2.05	-	-
8.67	1.12	2.440	1.96	-	-
9.67	1.59	1.970	1.58	-	-
10.35	2.00	1.560	1.25	-	-
11.79	3.00	0.560	0.45	-	-

### 5.1.2.6.1.3 Comparación de Métodos

A continuación se muestra un gráfico comparativo del perfil analizado donde se puede apreciar el Terreno natural, el perfil socavado por el método de Lischtvan – Lebediev:

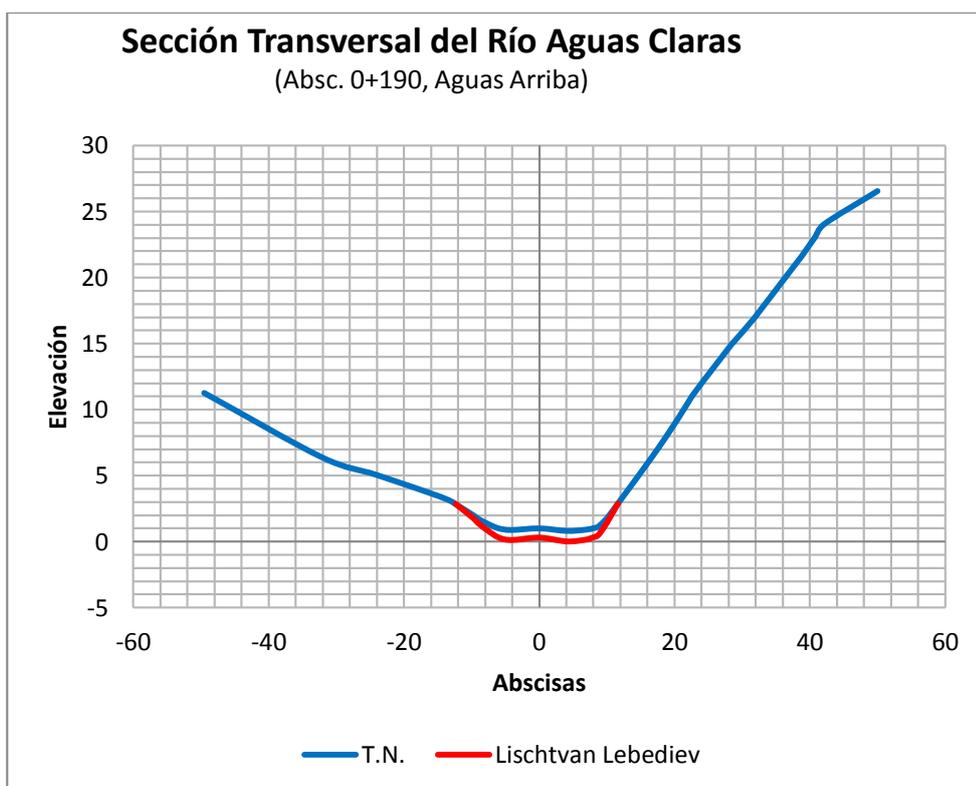


Fig. 5.2 Perfil de Socavación en la ABS (0+190)

### 5.1.2.6.2 Socavación en la abscisa 0+100 Cara aguas arriba del puente

Los resultados del análisis hidráulico necesarios para el cálculo de socavación son los siguientes:

WS (m)	D50 (mm)	Q (m <sup>3</sup> /s)	A (m <sup>2</sup> )	B (m)	Hm (m)	U
3.31	2.10	67.00	33.11	18.26	1.81	1.00

#### 5.1.2.6.2.1 Método de Lischtván – Lebediev

En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos por este método, donde  $Y_s$  es la altura de socavación más el tirante en ese punto.

Tabla LXV Cálculo de Socavación por Lischtván – Lebediev en el Río Aguas Claras (ABS. 0+100)

Dist. a CL (m)	Elevación (m.s.n.m.)	$y_0$ (m)	$y_s$ (m)	$y_s - y_0$ (m)	Cota de Perfil de Socavación (m.s.n.m)
-7.76	2.12	1.14	1.47	0.33	1.79
-7.56	2.00	1.26	1.66	0.40	1.60
-7.51	1.96	1.30	1.72	0.42	1.54
-7.30	1.81	1.45	1.97	0.52	1.29
-7.00	1.59	1.67	2.33	0.66	0.93
-5.74	1.28	1.98	2.86	0.88	0.40
-2.10	1.00	2.26	3.35	1.09	-0.09
-1.00	1.00	2.26	3.35	1.09	-0.09
2.11	1.00	2.26	3.35	1.09	-0.09
2.42	1.00	2.26	3.35	1.09	-0.09
3.92	1.04	2.22	3.28	1.06	-0.02
4.64	1.12	2.14	3.14	1.00	0.12
5.17	1.23	2.03	2.95	0.92	0.31
5.53	1.33	1.93	2.77	0.84	0.49
5.77	1.47	1.79	2.53	0.74	0.73
6.00	1.56	1.70	2.38	0.68	0.88
6.04	2.01	1.25	1.65	0.40	1.61
6.96	2.02	1.24	1.63	0.39	1.63

### 5.1.2.6.2.2 Método de Laursen

En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos por este método, donde  $Y_s$  es la altura de socavación más el tirante en ese punto.

Tabla LXVI Cálculo de Socavación por Laursen en el Río Aguas Claras (ABS. 0+100)

Dist. a CL (m)	Elevación (m.s.n.m.)	$y_0$ (m)	$y_s$ (m)	$y_s - y_0$ (m)	Cota de Perfil de Socavación (m.s.n.m)
-9.26	3.00	0.260	0.35	0.09	2.91
-7.76	2.12	1.145	1.55	0.41	1.71
-7.56	2.00	1.260	1.71	0.45	1.55
-7.51	1.96	1.298	1.76	0.46	1.50
-7.30	1.81	1.451	1.97	0.52	1.29
-7.00	1.59	1.672	2.27	0.59	0.99
-5.74	1.28	1.980	2.68	0.70	0.58
-2.10	1.00	2.260	3.06	0.80	0.20
-1.00	1.00	2.260	3.06	0.80	0.20
1.48	1.00	2.260	3.06	0.80	0.20
3.92	1.04	2.220	3.01	0.79	0.25
4.64	1.12	2.140	2.90	0.76	0.36
5.17	1.23	2.030	2.75	0.72	0.51
5.53	1.33	1.930	2.62	0.69	0.64
5.77	1.47	1.791	2.43	0.64	0.83
6.00	1.56	1.705	2.31	0.61	0.95
6.04	2.01	1.250	1.69	0.44	1.57
6.96	2.02	1.240	1.68	0.44	1.58
6.99	3.00	0.260	0.35	0.09	2.91
8.38	3.01	0.250	0.34	0.09	2.92

### 5.1.2.6.2.3 Comparación de Métodos

Esta abscisa muestra una profundidad de socavación de 1.09 m. por el método de Lischvan Lebediev, y 0.80 m. por Laursen.

Se puede decir que como son valores cercanos, son comparables; no obstante, se diferencian de la sección anterior, en la cual no existía socavación, porque se presenta una reducción del área hidráulica de 55.95 m<sup>2</sup> a 33.11 m<sup>2</sup>.

De esta manera, la velocidad aumentó, y por tanto, la capacidad de arrastre de partículas del flujo.

A continuación se muestra un gráfico comparativo del perfil analizado donde se puede apreciar el Terreno natural, el perfil socavado por el método de Lischtván – Lebediev y por el método de Laursen:

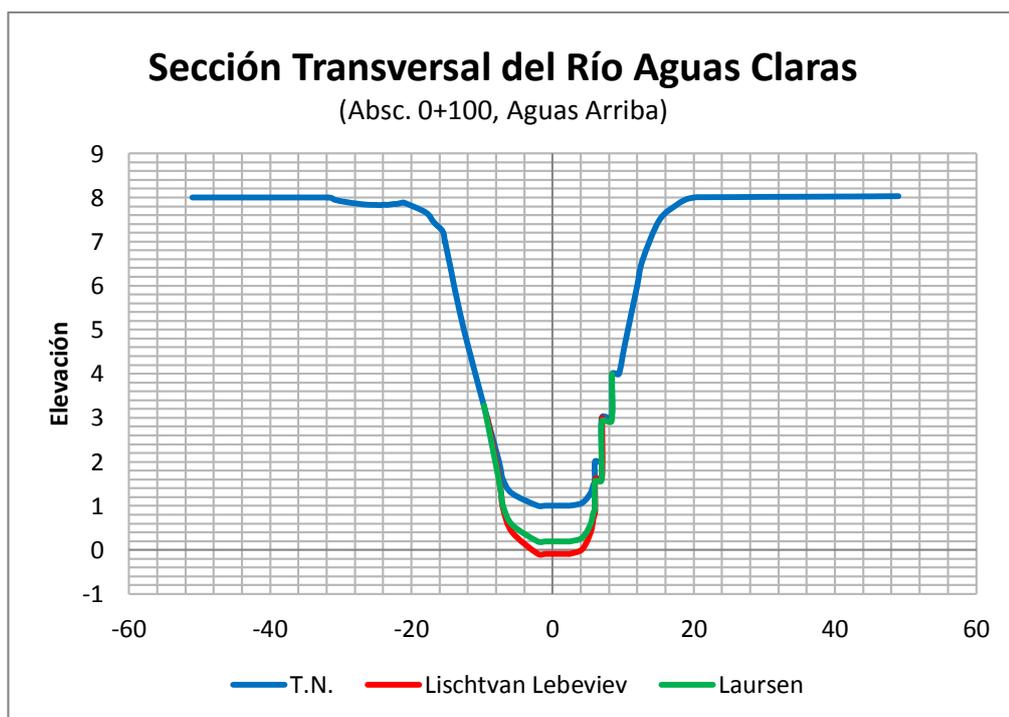


Fig. 5.27 Perfil de Socavación en la ABS (0+100)

### 5.1.2.6.3 Socavación en la abscisa 0+090 Cara aguas abajo del puente

Los resultados del análisis hidráulico necesarios para el cálculo de socavación son los siguientes:

Datos

WS (m)	D50 (mm)	Q (m <sup>3</sup> /s)	A (m <sup>2</sup> )	B (m)	Hm (m)	U
3.14	2.10	67.00	26.61	16.83	1.58	1.00

#### 5.1.2.6.3.1 Método de Lischtván – Lebediev

En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos por este método, donde  $Y_s$  es la altura de socavación más el tirante en ese punto.

Tabla LXVII Cálculo de Socavación por Lischtván – Lebediev (ABS. 0+090)

Dist. a CL (m)	Elevación (m.s.n.m.)	$y_0$ (m)	$y_s$ (m)	$y_s - y_0$ (m)	Cota de Perfil de Socavación (m.s.n.m)
-8.97	3.00	0.18	0.20	0.02	2.98
-7.25	2.00	1.18	1.89	0.71	1.29
-6.40	1.66	1.52	2.56	1.04	0.62
-4.86	1.30	1.88	3.31	1.43	-0.13
-3.58	1.11	2.07	3.71	1.64	-0.53
-2.00	1.00	2.18	3.95	1.77	-0.77
0.19	0.97	2.21	4.02	1.81	-0.84
3.41	1.06	2.12	3.82	1.70	-0.64
5.60	1.44	1.74	3.01	1.27	0.17
5.92	1.49	1.69	2.91	1.22	0.27
5.97	2.01	1.17	1.87	0.70	1.31
7.96	2.99	0.19	0.21	0.02	2.97

### 5.1.2.6.3.2 Método de Laursen

En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos por este método, donde  $Y_s$  es la altura de socavación más el tirante en ese punto.

**Tabla LXVIII Cálculo de Socavación por Laursen en el Río Aguas Claras (ABS. 0+090)**

Dist. a CL (m)	Elevación (m.s.n.m.)	$y_0$ (m)	$y_s$ (m)	$y_s - y_0$ (m)	Cota de Perfil de Socavación (m.s.n.m)
-8.97	3.00	0.180	0.19	0.01	2.99
-8.00	2.44	0.739	0.80	0.06	2.38
-7.25	2.00	1.180	1.28	0.10	1.90
-6.40	1.66	1.521	1.65	0.13	1.53
-4.86	1.30	1.880	2.04	0.16	1.14
-3.58	1.11	2.070	2.24	0.17	0.94
-2.97	1.05	2.130	2.31	0.18	0.87
-2.00	1.00	2.180	2.36	0.18	0.82
0.19	0.97	2.210	2.39	0.18	0.79
2.39	0.99	2.190	2.37	0.18	0.81
3.41	1.06	2.120	2.30	0.18	0.88
4.02	1.16	2.020	2.19	0.17	0.99
4.83	1.32	1.860	2.01	0.15	1.17
5.15	1.36	1.820	1.97	0.15	1.21
5.60	1.44	1.740	1.88	0.14	1.30
5.92	1.49	1.690	1.83	0.14	1.35
5.97	2.01	1.170	1.27	0.10	1.91
7.15	2.02	1.160	1.26	0.10	1.92
7.15	2.98	0.200	0.22	0.02	2.96
7.96	2.99	0.190	0.21	0.02	2.97

### 5.1.2.6.3.3 Comparación de Métodos

A continuación se muestra un gráfico comparativo del perfil analizado donde se puede apreciar el Terreno natural, el perfil socavado por el método de Lischtvan – Lebediev y por el método de Laursen:

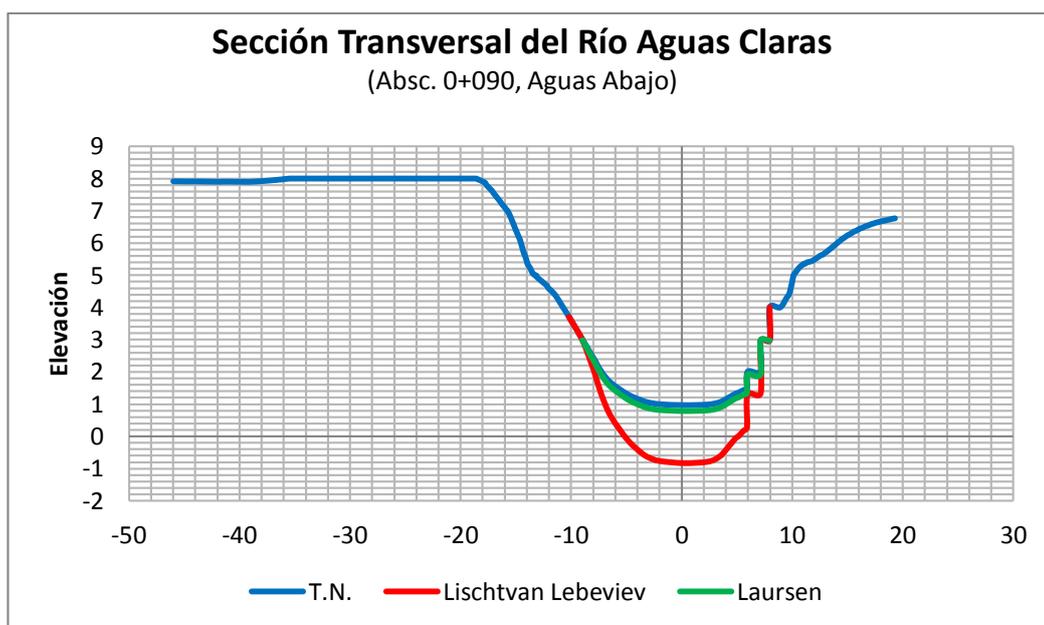


Fig. 5.28 Perfil de Socavación en la ABS (0+090)

Esta abscisa muestra como resultado la menor de las áreas hidráulicas de todo el río Aguas Claras. De todas las secciones, ésta es la que tiene mayor fuerza de arrastre. En esta sección existe la particularidad que para el método de Lischtvan Lebediev la profundidad de socavación es de 1.81 m., y para Laursen es de 0.18 m.

Esta diferencia tan marcada tiene su origen en que existe una contracción en el área hidráulica, pero debido a que el tirante se aminora, mas no por que las márgenes estrangulen el cauce, la socavación calculada por Laursen resulta considerablemente baja con respecto a la del otro método.

#### **5.1.2.6.4 Socavación en la abscisa 0+000 Aguas abajo**

Los resultados del análisis hidráulico necesarios para el cálculo de socavación son los siguientes:

WS (m)	D50 (mm)	Q (m <sup>3</sup> /s)	A (m <sup>2</sup> )	B (m)	Hm (m)	U
3.14	2.10	67.00	53.87	47.58	1.13	1.00

##### **5.1.2.6.4.1 Método de Lischtván – Lebediev**

En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos por este método, donde  $Y_s$  es la altura de socavación más el tirante en ese punto.

Tabla LXIX Cálculo de Socavación por Lischtván – Lebediev (ABS. 0+000)

Dist. a CL (m)	Elevación (m.s.n.m.)	$y_0$ (m)	$y_s$ (m)	$y_s - y_0$ (m)	Cota de Perfil de Socavación (m.s.n.m)
-15.27	2.19	0.95	1.05	0.10	2.09
-14.87	2.00	1.14	1.30	0.16	1.84
-12.16	1.33	1.81	2.27	0.46	0.87
-9.16	1.08	2.06	2.65	0.59	0.49
-4.00	1.00	2.14	2.78	0.64	0.36
5.73	1.50	1.64	2.02	0.38	1.12
6.32	1.77	1.37	1.62	0.25	1.52
6.56	1.88	1.26	1.47	0.21	1.67
6.63	1.92	1.22	1.41	0.19	1.73
6.79	2.00	1.14	1.30	0.16	1.84
11.15	2.31	0.83	0.89	0.06	2.25
13.22	2.45	0.69	0.71	0.02	2.43

#### 5.1.2.6.4.2 Método de Laursen

En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos por este método, donde  $Y_s$  es la altura de socavación más el tirante en ese punto.

Tabla LXX Cálculo de Socavación por Laursen en el Río Aguas Claras (ABS. 0+000)

Dist. a CL (m)	Elevación (m.s.n.m.)	$y_0$ (m)	$y_s$ (m)	$y_s - y_0$ (m)	Cota de Perfil de Socavación (m.s.n.m)
-15.27	2.19	0.948	1.17	0.23	1.97
-14.87	2.00	1.140	1.41	0.27	1.73
-14.55	1.86	1.285	1.59	0.31	1.55
-4.00	1.00	2.140	2.65	0.51	0.49
2.17	1.09	2.050	2.54	0.49	0.60
3.87	1.20	1.940	2.40	0.46	0.74
5.73	1.50	1.640	2.03	0.39	1.11
6.32	1.77	1.368	1.69	0.33	1.45
6.63	1.92	1.220	1.51	0.29	1.63
11.79	2.09	1.052	1.30	0.25	1.84
12.56	2.13	1.012	1.25	0.24	1.89
13.51	2.17	0.969	1.20	0.23	1.94
14.58	2.23	0.915	1.13	0.22	2.01
15.58	2.27	0.866	1.07	0.21	2.07
17.21	2.36	0.785	0.97	0.19	2.17
17.80	2.38	0.756	0.94	0.18	2.20
18.22	2.41	0.735	0.91	0.18	2.23
28.62	2.92	0.217	0.27	0.05	2.87
29.85	2.99	0.155	0.19	0.04	2.95
31.06	3.00	0.140	0.17	0.03	2.97

### 5.1.2.6.4.3 Comparación de Métodos

A continuación se muestra un gráfico comparativo del perfil analizado donde se puede apreciar el Terreno natural, el perfil socavado por el método de Lischtvan – Lebediev y por el método de Laursen:

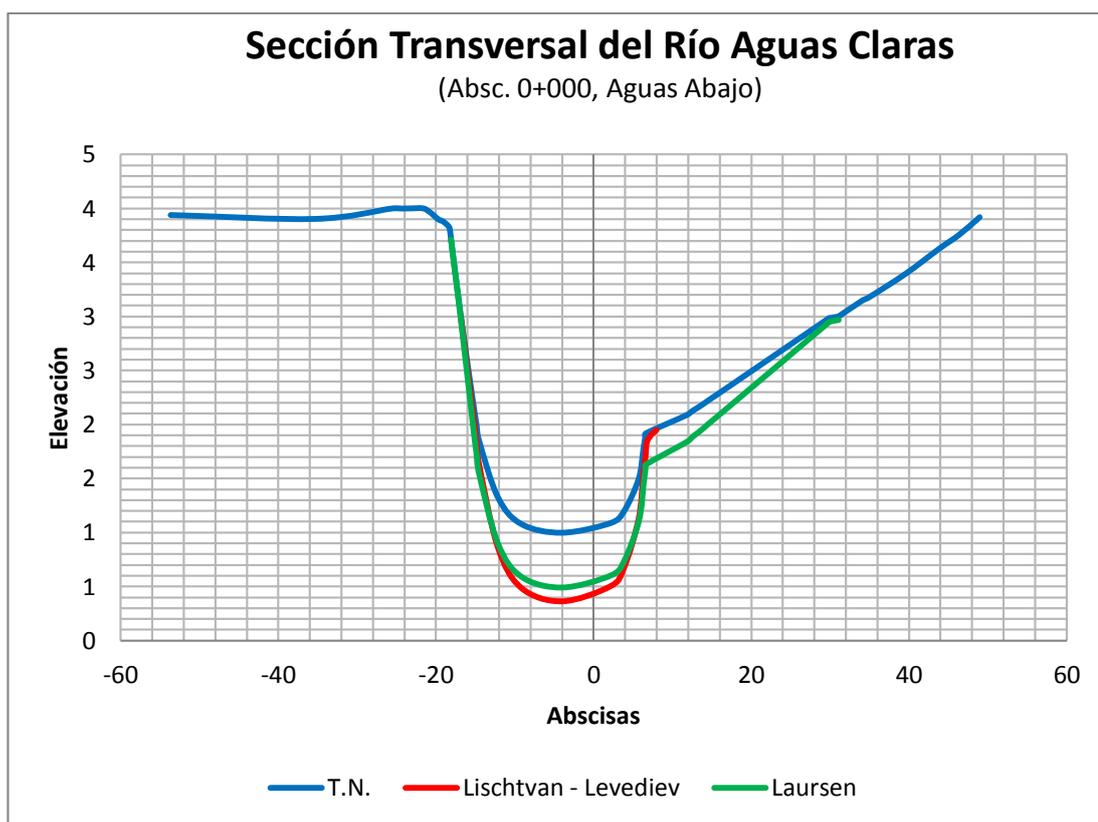


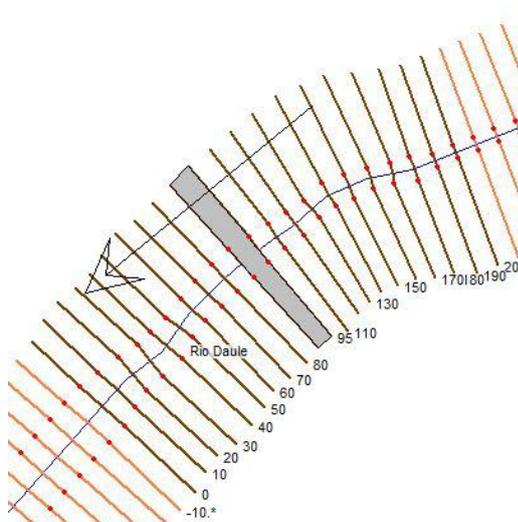
Fig. 5.29 Perfil de Socavación en la ABS (0+000)

La abscisa 0+000 con respecto a la 0+090 muestra un ensanchamiento en las márgenes del cauce, este es el posible motivo por el que aumente el área hidráulica, se disminuya la velocidad y bajen las profundidades de

socavación. Obteniéndose para el método de Lischtvan Lebediev 0.64 m. de socavación y 0.51 m. para el método de Laursen.

### 5.1.2.7 Río Daule

Para el análisis de Socavación es necesario contar con los datos provenientes de la modelación en el programa HEC – RAS.

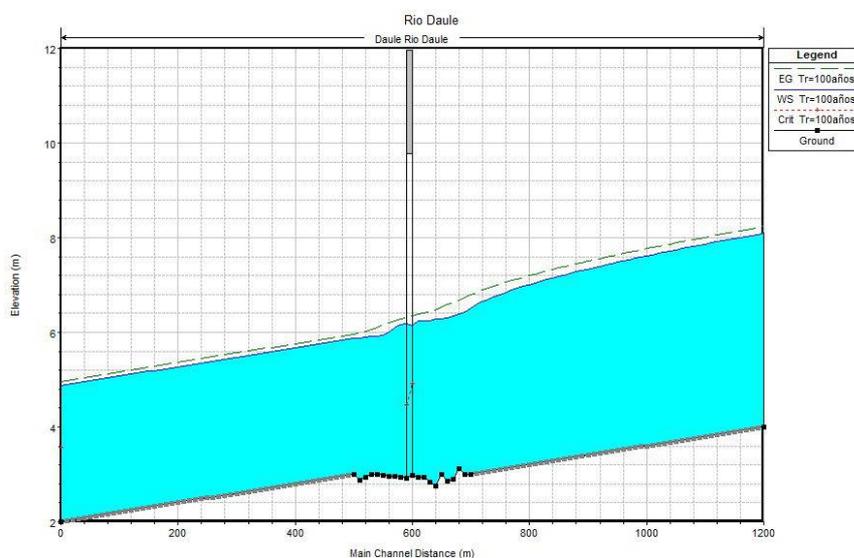


**Fig. 5.30 Vista en Planta del modelación del Río Daule en HEC – RAS. Ubicación del puente en color gris**

Las secciones escogidas en este río para el análisis de socavación general son las ubicadas en las abscisas 0+190 (aguas arriba), 0+100 (borde aguas arriba del puente), 0+090 (borde aguas abajo del puente), 0+000 (aguas abajo). A continuación se muestra el gráfico de cada una de las secciones

antes mencionadas con su respectiva distribución de velocidades tanto en el canal principal como en las márgenes izquierda y derecha.

En la figura Fig. 5.31 se puede observar que en el tramo del puente el flujo va en contrapendiente, esto produce que el tirante se aminore, se forme una curva de remanso aguas arriba, y se acelere el flujo aguas abajo pero sin alcanzar el régimen supercrítico.



**Fig. 5.31 Perfil longitudinal del Río Daule, en HEC – RAS**

En la Fig. 5.32 se puede notar una depresión del margen izquierdo del río, esto ha sido causado por los pobladores de la zona, porque se dedican a cortar árboles y los transportan por el río. Cuando hay una crecida, esta depresión actúa como una llanura de inundación.

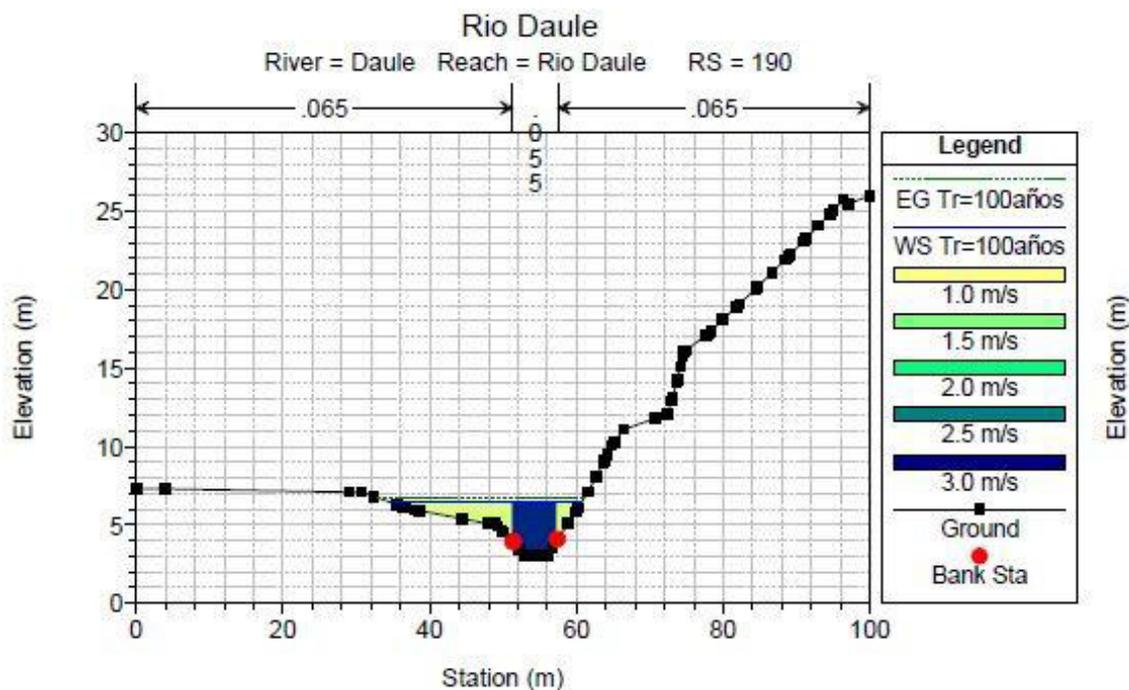


Fig. 5.32 Sección Transversal (ABS 0+190)

En la tabla siguiente se muestran los resultados de los análisis hidráulicos realizados a las secciones de estudio.

Tabla LXXI Tabla de resultados de modelación HEC – RAS

Abcisa	Elevación mínima de canal (m)	Nivel de Superficie de Agua (m)	Perfil de energía (m)	Pendiente de perfil de energía (m/m)	Velocidad del Canal (m/s)	Área Hidráulica (m <sup>2</sup> )	Ancho Superficie de Agua (m)	# Froude
190	3.00	6.42	6.80	0.001626	2.85	38.95	26.03	0.48
100	2.97	6.14	6.35	0.003674	2.02	39.52	17.16	0.40
90	2.91	6.18	6.30	0.001898	1.53	51.09	18.70	0.29
0	3.00	5.87	5.96	0.002000	1.33	58.65	28.36	0.29

Luego de los respectivos análisis a cada una de las secciones antes mencionadas, se tiene que solo en la sección ubicada aguas arriba (0+190) existe socavación, por el método de Lischtván Lebediev 0.99 m. y por el de Laursen 0.34 m.

Esta sección (0+190), es la que presenta la mayor velocidad de todas las abscisas estudiadas, y la menor área hidráulica.

#### **5.1.2.7.1 Socavación en la abscisa 0+190 Aguas arriba**

Los resultados del análisis hidráulico necesarios para el cálculo de socavación son los siguientes:

WS (m)	D50 (mm)	Q (m <sup>3</sup> /s)	A (m <sup>2</sup> )	B (m)	Hm (m)	u
6.52	18.74	77.30	41.50	26.73	1.55	1.00

##### **5.1.2.7.1.1 Método de Lischtván – Lebediev**

En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos por este método, donde  $Y_s$  es la altura de socavación más el tirante en ese punto.

Tabla LXXII Cálculo de Socavación por Lischtván – Lebediev en el Río Daule (ABS. 0+190)

Dist. a CL (m)	Elevación (m.s.n.m.)	$y_0$ (m)	$y_s$ (m)	$y_s - y_0$ (m)	Cota de Perfil de Socavación (m.s.n.m)
-6.16	5.08	1.34	1.36	0.02	5.06
-5.04	5.08	1.34	1.36	0.02	5.06
-4.71	4.92	1.50	1.57	0.07	4.85
-4.23	4.68	1.74	1.89	0.15	4.53
-4.00	4.56	1.86	2.05	0.19	4.37
-3.05	4.08	2.34	2.74	0.40	3.68
-2.68	3.90	2.52	3.01	0.49	3.41
-1.80	3.45	2.97	3.69	0.72	2.73
-1.07	3.08	3.34	4.28	0.94	2.14
-0.29	3.04	3.38	4.35	0.97	2.07
0.23	3.02	3.40	4.38	0.98	2.04
0.59	3.00	3.42	4.41	0.99	2.01
1.12	3.03	3.39	4.36	0.97	2.06
1.20	3.03	3.39	4.36	0.97	2.06
2.04	3.08	3.34	4.28	0.94	2.14
2.75	3.59	2.83	3.48	0.65	2.94
3.45	4.08	2.34	2.74	0.40	3.68
4.80	5.04	1.38	1.41	0.03	5.01
4.86	5.08	1.34	1.36	0.02	5.06

#### 5.1.2.7.1.2 Método de Laursen

En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos por este método:

Tabla 5.73 Cálculo de Socavación por Laursen en el Río Daule (ABS. 0+190)

Dist. a CL (m)	Elevación (m.s.n.m.)	$y_0$ (m)	$y_s$ (m)	$y_s - y_0$ (m)	Cota de Perfil de Socavación (m.s.n.m)
-18.45	6.27	0.149	0.16	0.01	6.26
-17.35	6.08	0.340	0.37	0.03	6.05
-16.06	5.96	0.459	0.50	0.05	5.92
-15.76	5.93	0.486	0.53	0.05	5.89
-15.35	5.90	0.521	0.57	0.05	5.85
-6.16	5.08	1.339	1.47	0.13	4.95
-4.71	4.92	1.504	1.65	0.15	4.77
-4.23	4.68	1.744	1.92	0.17	4.50
-4.00	4.56	1.859	2.04	0.19	4.38
-3.05	4.08	2.340	2.57	0.23	3.85
-2.68	3.90	2.524	2.78	0.25	3.64
-1.80	3.45	2.972	3.27	0.30	3.15
-1.07	3.08	3.340	3.67	0.33	2.75
-0.29	3.04	3.378	3.71	0.34	2.71
0.59	3.00	3.418	3.76	0.34	2.66
2.04	3.08	3.340	3.67	0.33	2.75
2.75	3.59	2.835	3.12	0.28	3.30
3.45	4.08	2.340	2.57	0.23	3.85
4.80	5.04	1.383	1.52	0.14	4.90
5.87	5.81	0.611	0.67	0.06	5.75
6.26	6.09	0.326	0.36	0.03	6.06

### 5.1.2.7.1.3 Comparación de Métodos

A continuación se muestra un gráfico comparativo del perfil analizado donde se puede apreciar el Terreno natural, el perfil socavado por el método de Lischtván – Lebediev y por el método de Laursen:

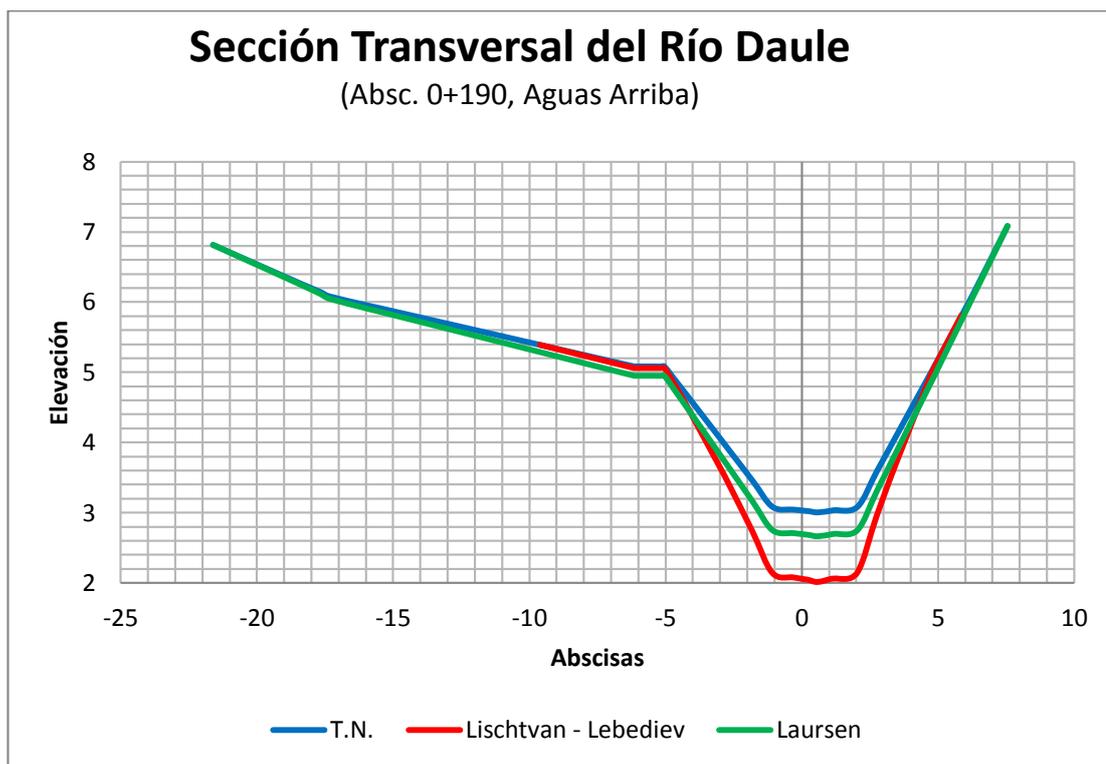


Fig. 5.33 Perfil de Socavación en la ABS (0+190)

#### 5.1.2.7.2 Socavación en la abscisa 0+100 Cara aguas arriba del puente

Los resultados del análisis hidráulico necesarios para el cálculo de socavación son los siguientes:

WS (m)	D50 (mm)	Q (m <sup>3</sup> /s)	A (m <sup>2</sup> )	B (m)	Hm (m)	U
6.14	18.74	77.30	39.52	17.16	2.30	1.00

### 5.1.2.7.2.1 Método de Lischtván – Lebediev

En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos por este método, donde  $Y_s$  es la altura de socavación más el tirante en ese punto.

Tabla LXXIV Cálculo de Socavación por Lischtván – Lebediev en el Río Daule (ABS. 0+100)

Dist. a CL (m)	Elevación (m.s.n.m.)	$y_0$ (m)	$y_s$ (m)	$y_s - y_0$ (m)	Cota de Perfil de Socavación (m.s.n.m)
-8.55	6.00	0.18	0.09	-	-
-8.53	5.97	0.21	0.10	-	-
-8.48	5.89	0.29	0.16	-	-
-8.38	5.72	0.46	0.28	-	-
-8.26	5.51	0.67	0.45	-	-
-7.96	5.00	1.18	0.91	-	-
-7.77	4.37	1.81	1.55	-	-
-7.65	4.00	2.18	1.96	-	-
-7.36	3.75	2.43	2.25	-	-
-5.69	3.17	3.01	2.94	-	-
-4.00	3.03	3.15	3.11	-	-
0.74	2.91	3.27	3.26	-	-
3.08	3.00	3.18	3.15	-	-
6.17	3.12	3.06	3.00	-	-
7.44	3.47	2.71	2.57	-	-
8.00	4.00	2.18	1.96	-	-
8.37	4.34	1.84	1.58	-	-
9.08	5.00	1.18	0.91	-	-
9.71	6.00	0.18	0.09	-	-
9.73	6.09	0.09	0.04	-	-

### 5.1.2.7.2.2 Método de Laursen

En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos por este método, donde  $Y_s$  es la altura de socavación más el tirante en ese punto.

Tabla LXXV Cálculo de Socavación por Laursen en el Río Daule (ABS. 0+100)

Dist. a CL (m)	Elevación (m.s.n.m.)	$y_0$ (m)	$y_s$ (m)	$y_s - y_0$ (m)	Cota de Perfil de Socavación (m.s.n.m)
-8.94	6.17	0.012	0.01	-	-
-8.55	6.00	0.181	0.18	-	-
-8.53	5.97	0.213	0.21	-	-
-8.48	5.89	0.290	0.29	-	-
-8.38	5.72	0.456	0.46	-	-
-8.26	5.51	0.673	0.67	-	-
-7.96	5.00	1.180	1.18	-	-
-7.77	4.37	1.806	1.81	-	-
-7.65	4.00	2.180	2.18	-	-
-7.36	3.75	2.433	2.43	-	-
-4.00	3.03	3.150	3.15	-	-
0.74	2.91	3.270	3.27	-	-
3.08	3.00	3.180	3.18	-	-
6.17	3.12	3.060	3.06	-	-
7.44	3.47	2.706	2.71	-	-
8.00	4.00	2.180	2.18	-	-
8.37	4.34	1.841	1.84	-	-
9.08	5.00	1.180	1.18	-	-
9.67	5.92	0.257	0.26	-	-
9.71	6.00	0.180	0.18	-	-
9.73	6.09	0.087	0.09	-	-

### 5.1.2.7.3 Socavación en la abscisa 0+090 Cara aguas abajo del puente

Los resultados del análisis hidráulico son los siguientes:

#### 5.1.2.7.3.1 Método de Lischvan – Lebediev

En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos por este método, donde  $Y_s$  es la altura de socavación más el tirante en ese punto.

Tabla LXXVI Cálculo de Socavación por Lischtván – Lebediev en el Río Daule (ABS. 0+090)

Dist. a CL (m)	Elevación (m.s.n.m.)	$y_0$ (m)	$y_s$ (m)	$y_s - y_0$ (m)	Cota de Perfil de Socavación (m.s.n.m)
-8.94	6.17	0.01	0.00	-	-
-8.55	6.00	0.18	0.09	-	-
-8.26	5.51	0.67	0.45	-	-
-7.96	5.00	1.18	0.91	-	-
-7.77	4.37	1.81	1.55	-	-
-7.65	4.00	2.18	1.96	-	-
-7.36	3.75	2.43	2.25	-	-
-6.27	3.25	2.93	2.84	-	-
-4.00	3.03	3.15	3.11	-	-
0.74	2.91	3.27	3.26	-	-
3.08	3.00	3.18	3.15	-	-
6.17	3.12	3.06	3.00	-	-
8.00	4.00	2.18	1.96	-	-
9.08	5.00	1.18	0.91	-	-
9.71	6.00	0.18	0.09	-	-
9.73	6.09	0.09	0.04	-	-

#### 5.1.2.7.3.2 Método de Laursen

En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos por este método, donde  $Y_s$  es la altura de socavación más el tirante en ese punto.

Tabla LXXVII Cálculo de Socavación por Laursen en el Río Daule (ABS. 0+090)

Dist. a CL (m)	Elevación (m.s.n.m.)	$y_0$ (m)	$y_s$ (m)	$y_s - y_0$ (m)	Cota de Perfil de Socavación (m.s.n.m)
-8.94	6.17	0.012	0.01	-	-
-8.53	5.97	0.213	0.21	-	-
-8.48	5.89	0.290	0.29	-	-
-8.38	5.72	0.456	0.46	-	-
-8.26	5.51	0.673	0.67	-	-
-7.96	5.00	1.180	1.18	-	-
-7.77	4.37	1.806	1.81	-	-
-7.65	4.00	2.180	2.18	-	-
-7.36	3.75	2.433	2.43	-	-
-6.27	3.25	2.928	2.93	-	-
-5.69	3.17	3.012	3.01	-	-
-4.00	3.03	3.150	3.15	-	-
0.74	2.91	3.270	3.27	-	-
3.08	3.00	3.180	3.18	-	-
6.17	3.12	3.060	3.06	-	-
7.44	3.47	2.706	2.71	-	-
8.00	4.00	2.180	2.18	-	-
8.37	4.34	1.841	1.84	-	-
9.08	5.00	1.180	1.18	-	-
9.71	6.00	0.180	0.18	-	-
9.73	6.09	0.087	0.09	-	-

#### 5.1.2.7.4 Socavación en la abscisa 0+000 Aguas abajo

##### 5.1.2.7.4.1 Método de Lischtvan – Lebediev

En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos por este método.

Tabla LXXVIII Cálculo de Socavación por Lischtván – Lebediev en el Río Daule (ABS. 0+000)

Dist. a CL (m)	Elevación (m.s.n.m.)	$y_0$ (m)	$y_s$ (m)	$y_s - y_0$ (m)	Cota de Perfil de Socavación (m.s.n.m)
-8.16	5.00	0.87	0.64	-	-
-7.98	4.16	1.71	1.50	-	-
-7.94	4.00	1.87	1.67	-	-
2.84	3.17	2.70	2.66	-	-
3.80	3.29	2.58	2.51	-	-
6.00	3.59	2.28	2.15	-	-
7.79	3.79	2.08	1.91	-	-
9.41	3.91	1.96	1.78	-	-
9.89	3.94	1.93	1.74	-	-
11.23	4.00	1.87	1.67	-	-
12.57	4.21	1.66	1.44	-	-
13.19	4.30	1.57	1.34	-	-
13.70	4.37	1.50	1.27	-	-
14.61	4.50	1.37	1.13	-	-
16.51	4.78	1.09	0.85	-	-
18.03	5.00	0.87	0.64	-	-
18.40	5.15	0.72	0.51	-	-
18.84	5.35	0.52	0.34	-	-
19.35	5.57	0.30	0.17	-	-
19.55	5.66	0.21	0.11	-	-

#### 5.1.2.7.4.2 Método de Laursen

En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos por este método, donde  $Y_s$  es la altura de socavación más el tirante en ese punto.

Tabla LXXIX Cálculo de Socavación por Laursen en el Río Daule (ABS. 0+000)

Dist. a CL (m)	Elevación (m.s.n.m.)	$y_0$ (m)	$y_s$ (m)	$y_s - y_0$ (m)	Cota de Perfil de Socavación (m.s.n.m)
-8.16	5.00	0.870	0.87	-	-
-7.98	4.16	1.710	1.71	-	-
-7.92	3.98	1.890	1.89	-	-
-6.58	3.24	2.630	2.63	-	-
-3.62	3.00	2.870	2.87	-	-
6.00	3.59	2.285	2.29	-	-
9.41	3.91	1.962	1.96	-	-
10.86	3.98	1.887	1.89	-	-
11.21	4.00	1.873	1.87	-	-
13.19	4.30	1.572	1.57	-	-
14.61	4.50	1.368	1.37	-	-
16.51	4.78	1.094	1.09	-	-
18.03	5.00	0.871	0.87	-	-
18.84	5.35	0.525	0.53	-	-
19.55	5.66	0.207	0.21	-	-

## 5.2 Socavación local

### 5.2.1 Río Guachal

La tabla siguiente muestra los resultados obtenidos en las estimaciones de socavación local por los métodos del HEC-18 y el de Laursen - Toch

	Hec 18		Laursen - Toch			
	Fr	$y_s$	$y/a$	i	k1	$y_s$
Pila Izquierda	0.60	2.17	2.33	2.00	0.90	1.80
Pila Derecha	-	-	-	-	-	-

### 5.2.1.1 Comparación de Métodos

En la Fig. 5.34 se observa que en el caso de la pila derecha, no es necesaria ninguna estimación de socavación local, ya que el nivel de agua (7.83 m.s.n.m.) no tiene influencia sobre ésta. Sin embargo, la pila izquierda sí se encuentra expuesta. Para ésta última, la estimación de socavación local por el método de Laursen-Toch es de 1.80 m., mientras que para el HEC-18 es de 2.17 m. Valores bastante cercanos por lo que se podría interpretar que los métodos utilizados con bastante comparables, porque usan las mismas variables como parámetros fundamentales.

A continuación se muestra un gráfico comparativo de los resultados obtenidos por los dos métodos.

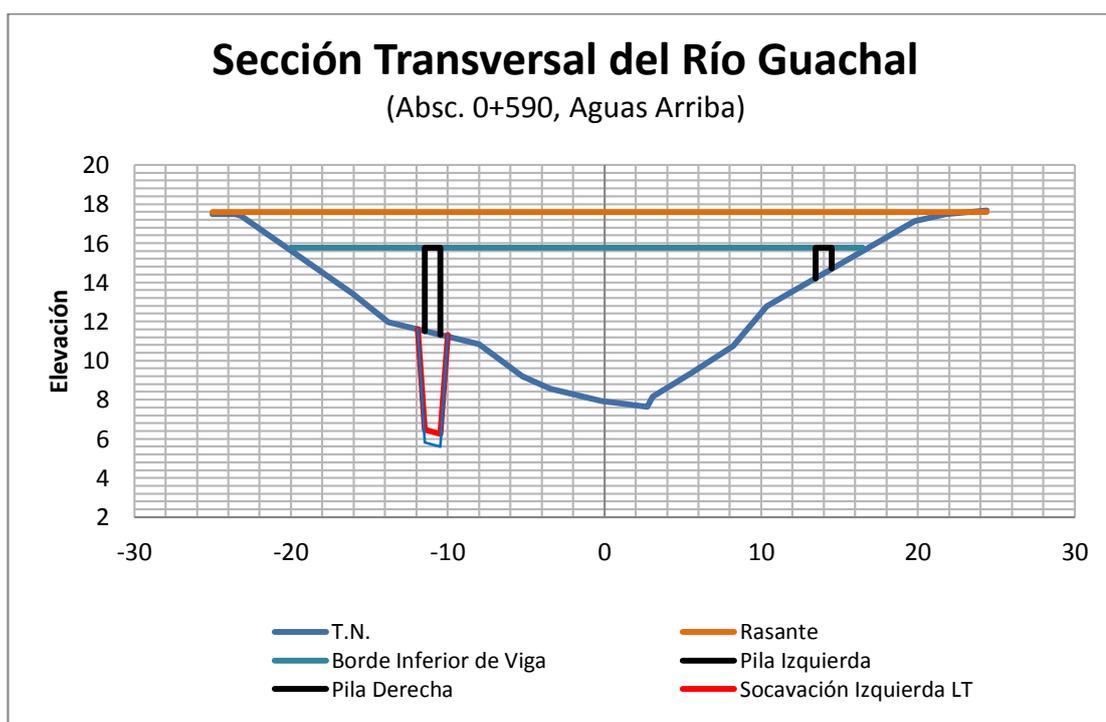


Fig. 5.34 Perfil de Socavación local en la pila del Río Guachal en la ABS (0+585)

## 5.2.2 Río Tonchigüe

La tabla siguiente muestra los resultados obtenidos en las estimaciones de socavación local por los métodos del HEC-18 y el de Laursen - Toch

	Hec 18		Laursen - Toch			
	Fr	ys	y/a	i	k1	ys
Pila Izquierda	0.56	2.03	2.15	2.00	0.90	1.80
Pila Derecha	0.41	2.20	3.87	2.40	0.90	2.16

### 5.2.2.1 Comparación de Métodos

En la Fig. 5.36 se observa que ambas pilas están expuestas al fenómeno de socavación local, ya que el nivel de agua (10.04 m.s.n.m) influye sobre estas. Los resultados de las estimaciones de socavación local por el método de Laursen-Toch son de 1.80 m. para la pila izquierda y de 2.16 para la pila derecha, mientras que para el HEC-18 son de 2.03 m y 2.20 m. para las pilas izquierda y derecha respectivamente. Valores bastante cercanos para cada una de las pilas, por lo que se podría interpretar que los métodos utilizados son bastante comparables e indican que la socavación local varía en el orden de 2.00 m. a 2.50 m. de profundidad.

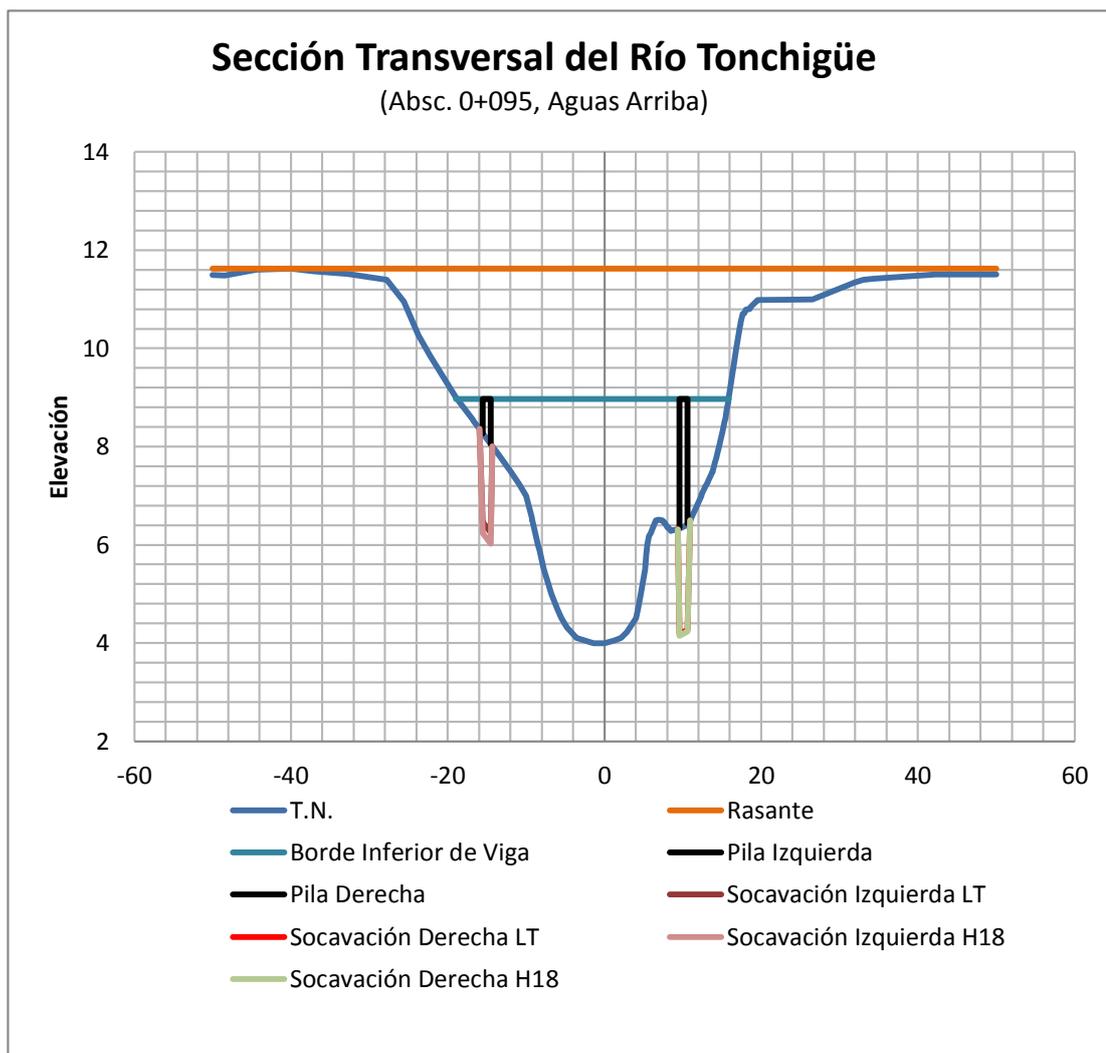


Fig. 5.35 Perfil de Socavación local en las pilas del Río Tonchigüe en la ABS (0+095)

## 5.3 Conclusiones

### 5.3.1 Río Guachal

Como resultado de los análisis de socavación en este río se obtuvo que existe un estrangulamiento progresivo entre cada sección, cada una de éstas tiene un área menor a su inmediata anterior, lo que se traduce como una

aumento de la velocidad del flujo, y por consiguiente una mayor capacidad de arrastre de partículas. Sin embargo, el ancho superior del río (*top width*) es prácticamente igual a lo largo de todo el tramo en estudio, en consecuencia lo que se aminora es el tirante. De aquí nace la diferencia entre los resultados de los 2 métodos, ya que Lischtván Lebediev usa como parámetro principal el tirante, y Laursen, el ancho superior.

### **5.3.2 Río Tonchigue**

De todos los ríos en estudio, éste es uno de los que tiene partículas en el fondo del lecho de mayor tamaño (28.87 mm.). Esto impide que la “fuerza de arrastre” del flujo del río no produzca socavación en las 3 primeras secciones analizadas (0+190, 0+100 y 0+090). No obstante, sí se origina socavación en la última abscisa (0+000). Esto se debe a que esta sección presenta un estrangulamiento (reducción del área hidráulica) con respecto a sus similares aguas arriba. Así, se produce un aumento de la velocidad de flujo y se tenga una mayor capacidad de arrastre. Además de lo anteriormente mencionado la velocidad es mucho mayor (3.40 m/s) a la velocidad crítica (2.60 m/s) calculada por el método de Laursen, debiendo calcularse socavación en lecho vivo, y no en agua clara como para las secciones anteriores.

### **5.3.3 Río Bilsa**

Este río presenta socavación en las abscisas 0+210 y 0+100, y la mayor profundidad está presente en la abscisa 0+100. Esto se debe a que esta sección es la de menor área hidráulica de todas las estudiadas, y por lo tanto la de mayor capacidad de arrastre de sedimentos. Este río presenta un ensanchamiento en las abscisas aguas abajo del puente, en estos puntos se reduce la velocidad, y por tanto no se produce socavación general.

### **5.3.4 Río Repartidero**

Analizando las áreas hidráulicas de cada una de las secciones de estudio se puede notar que no existe estrangulamiento puesto que no hay variaciones significativas. Además, en el análisis de socavación por el método de Laursen, al determinar la velocidad crítica de las partículas del fondo, ésta no es superada por la velocidad del lecho, es decir que podría presentarse socavación en agua clara. Sin embargo, ésta no se presenta, ya que este río también tiene un ancho regular, es decir que W1 (ancho de la sección aguas arriba) y W2 (ancho en la sección de estudio) son muy similares.

En este río en particular no se presenta socavación de ningún tipo en ninguna de las abscisas estudiadas, esto podría indicar que es un lecho ya estabilizado y que se ha socavado al máximo hasta llegar al equilibrio entre la

agradación y degradación del cauce, es decir la más de lo que se socaba es igual a la de lo que se deposita.

### **5.3.5 Río Maldonado**

En el río Maldonado se analizaron las abscisas 0+190, 0+100, 0+090 y 0+000, existiendo un estrangulamiento paulatino, pero no considerable, lo que ocasiona que se vaya aumentando la velocidad, pero no lo suficiente como para producir socavación. En la abscisa 0+000, el método de Laursen no estima una profundidad de socavación ya que no existe un cambio mayor en el ancho de la sección estudiada con la que se encuentra ubicada aguas arriba. Sin embargo el método de Lischtvan Lebediev que tiene como variable principal el tirante, si muestra una socavación considerable (1.85 m. de profundidad), y esto podría deberse a que es la sección con menor área hidráulica en todo el tramo del río estudiado.

### **5.3.6 Río Aguas Claras**

Este río tiene la particularidad de que presenta socavación en 3 de las 4 secciones estudiadas. En la sección más alejada aguas arriba del puente no se presenta socavación ya que es la que presenta más bajas velocidades de flujo. Las secciones ubicadas en las abscisas 0+100 y 0+090 presentan una

reducción en su área hidráulica, lo que provoca que aumente su velocidad, y su capacidad de arrastre de sedimentos.

Sin embargo al comparar los resultados obtenidos por los dos métodos en la abscisa 0+090 se tiene que, para Lischtván Lebediev la profundidad de socavación es de 1.81 m. mientras que para Laursen es solo de 0.12 m. Esta diferencia se da, debido a que el ancho de la sección estudiada cambia poco con relación a su similar ubicada inmediatamente aguas arriba, lo que ocasiona que para Laursen no haya una socavación importante.

### **5.3.7 Río Daule**

En este río se presenta socavación solo en la abscisa conocida más alejada del puente ubicada aguas arriba, y esto se debe a que con respecto a las otras secciones analizadas, es la de menor área hidráulica. Sin embargo podría darse el caso de que este cauce ya esté estabilizado, puesto que los valores que se obtienen para profundidad de socavación por ambos métodos de estudio son cercanos a cero. Sería necesario realizar un levantamiento topográfico aguas arriba de este punto para poder obtener con certeza un criterio de lo que sucede en esta sección.

# CAPÍTULO 6

## 6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1. La rugosidad asumida para el río Guachal es la más alta de entre todos los ríos de estudio y esto está relacionado con la irregularidad del fondo del cauce y de sus paredes.
2. La comparación de los 2 métodos utilizados para la determinación del coeficiente de rugosidad del cauce del río indica que el método de “Cowan” tiende a ser un tanto exagerado al método “Ponderado” en proporción de 1.5 a 1.7 veces.
3. Los cálculos de socavación general donde se obtuvo valores negativos indican que en la abscisa en estudio no se presentaría socavación. Por el contrario, podría producirse sedimentación. No obstante, esto debería ser comprobado mediante métodos de

agradación en ríos, ya que las metodologías utilizadas en el presente documento simplemente sirven para estimar socavación.

## 6.1 Socavación general

1. Las metodologías utilizadas en este documento para estimar profundidades de socavación general fueron las de Lischtván Lebediev y la de Laursen. Ambas son frecuentemente empleadas para socavación en secciones contraídas, la primera tomando como variable principal el tirante, y la segunda el ancho superior de la sección. Una contracción hidráulica se da cuando el área hidráulica de una sección disminuye con respecto a una sección aguas arriba. Esto puede presentarse cuando el cauce es más angosto en un tramo, cuando el fondo del río es muy irregular, o cuando se colocan estructuras que interrumpen el flujo normal del agua. De aquí nace la diferencia de resultados de profundidades, puesto que un estrangulamiento del cauce puede darse en más de una forma y dependiendo de qué tipo sea, este fenómeno podría afectar más o menos a uno u otro método.
2. Los métodos utilizados para estimar profundidades de socavación general, no toman en consideración la estratigrafía del suelo, tanto en las márgenes como en el canal principal, solo toman un parámetro

respecto del suelo estudiado que es el diámetro medio de las partículas ( $d_{50}$ ).

3. En el río Guachal se tiene que hay un estrangulamiento paulatino, es decir cada sección tiene una menor área hidráulica que su inmediata aguas arriba. Lo cual se traduce en un aumento de la velocidad del flujo, y por consiguiente una mayor capacidad de arrastre de sedimentos.
4. Los resultados de profundidades de socavación general varían entre cada uno de los ríos, incluso en los que son parecidos geomorfológicamente. Existen factores que pueden modificar estas estimaciones tales como, la ubicación del puente en el río (meandros, tramos rectos, etc.), el tipo de estructura (puentes con una sola luz, con pilas intermedias, atirantado, colgante, etc.), la vegetación presente, el tipo de suelo, el tamaño de las partículas del río, las estructuras de protección (gaviones, enrocados, enchapados, etc.), el tamaño de la cuenca de aportación, etc. Por lo que no se puede generalizar una profundidad de socavación incluso si un puente estuviera a muy cerca de otro. Cada uno tiene su análisis particular, cada uno merece una atención especial.
5. El río Tonchigüe tiene las partículas del fondo más grandes de todos los estudiados (28.87 mm.), y ya que estos puentes tienen más de 15 años en funcionamiento, se puede estimar que el flujo ha socavado los

materiales más finos del lecho, dejando en el fondo del cauce blindado contra caudales normales, y crecientes de no más de 100 años de retorno.

6. El método de Laursen se basa en la velocidad crítica para categorizar el tipo de lecho en el que se presentaría socavación general ya sea esta agua clara o lecho vivo. Esta categorización está intrínsecamente ligada a la pendiente longitudinal del río, ya que ésta aumenta o disminuye el potencial de arrastre de sedimentos del río. Sin embargo, en el mismo río podrían presentarse ambos tipos de socavación en distintos tramos, por lo que se vuelve indispensable analizar esta categorización en cada sección de un río que se estudie.
7. El método de Lischtván Lebediev permite calcular de manera puntual la socavación, ya que su variable principal es el tirante, y la profundidad resultante depende de ésta. Por el contrario al utilizar el método de Laursen nos encontramos con la problemática del valor resultante está basado en profundidades de socavación promedio.
8. En el río Daule se obtuvo socavación solo en una de las secciones estudiadas (0+190). Si bien, ésta es la de menor área hidráulica, las profundidades de socavación son cercanas a cero. Por lo que se puede concluir que este cauce ya se encuentra estabilizado, es decir que las crecientes que el cauce ha sufrido ya han socavado hasta su máximo nivel.

## 6.2 Socavación local

1. La pendiente longitudinal del río influye de sobremanera en las estimaciones de profundidades de socavación, puesto que esta influye directamente en la capacidad de arrastre de partículas del flujo. Existe una relación directamente proporcional entre la pendiente longitudinal y la velocidad del canal principal, y esta velocidad a su vez es parámetro fundamental de las dos metodologías utilizadas para el cálculo de profundidad de socavación local.
2. Los métodos utilizados para el cálculo de socavación local en pilas generalmente no toman a consideración la estratigrafía, sólo consideran un tipo de suelo. Por lo que se recomienda en caso de existir varios estratos, tomar en cuenta sobre todo los suelos cohesivos, ya que estos tardan más en socavarse, y ofrecen un factor de seguridad mayor.
3. La estimación de la profundidad de socavación local es de suprema importancia. Si es sobrestimada, se incurrirá en gastos innecesarios ya que la profundidad de desplante de la cimentación de pilas y/o estribos será muy alta. Si es subestimada, el flujo podría socavar la cimentación y ocasionar gastos en obras de remediación, o en el peor de los casos derrumbes que provoquen pérdidas humanas o incomunicación entre ciudades, paralización de economías, etc.

### 6.3 Recomendaciones Generales

1. Al estimar la socavación general por el método de Laursen, se obtiene un valor “ $y_s$ ” que es la profundidad promedio de socavación, mientras que al hacerlo mediante el método de Lischtvan Lebediev se obtienen profundidades de socavación en puntos específicos, ya que esta depende del tirante en ese mismo punto. Sin embargo, para poder comparar ambos métodos, fue necesario “distribuir” la profundidad promedio obtenida para cada punto de la sección transversal del puente. Esto se lo logró calculando un tirante existente promedio en la sección analizada y extrapolando para cada caso una profundidad de socavación ponderada.
2. Particularmente en el río Tonchigüe, se debería subir la rasante a un nivel en donde se asegure al menos 2 metros de gálibo (con respecto al nivel de máxima crecida), lo cual garantice que habrá una altura suficiente entre el nivel de agua de la máxima crecida considerada y la cota inferior de las vigas, para el paso de palizada y vegetación.
3. Al diseñar una vía, es posible que sea inevitable atravesar ríos. Por tanto, se recomienda evitar ubicar las estructuras que los atraviesen en meandros, y más aún que sus pilas y/o estribos queden expuestos, como en el caso de los puentes sobre los ríos Guachal o Bilsa. Por características geomorfológicas el flujo del río tenderá a socavar en el

lado convexo de la curva, por los que serán indispensables estructuras de protección, y el mantenimiento rutinario de las mismas, con el inherente costo operacional mayor.

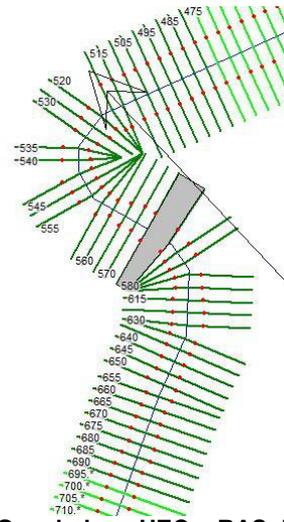
4. Si por alguna ordenanza o requerimiento de alguna entidad es inevitable ubicar un puente en un meandro, se recomienda ubicar los estribos lo más alejados posible del cauce del río, usando vigas presforzadas de mayor longitud, asegurando así la integridad del puente durante las crecientes.
5. Cuando se presenten profundidades de socavación, tanto general como local, mínimas o nulas, de cualquier modo se debería ubicar estructuras de protección para garantizar un grado más alto de seguridad, en caso de que se produjese un evento con un periodo de retorno mayor al considerado en el caudal de diseño. Estas estructuras podrían ser gaviones, enrocados, enchapados, geo textiles, etc.
6. Cuando se analicen varios métodos para la estimación de socavación general en secciones contraídas, y los resultados de estos, no sean comprobables, se recomienda revisar la influencia de cada una de las variables.
7. Cuando se analice el perfil de un río y aparentemente el flujo que por este circule vaya en contrapendiente, se recomienda tomar niveles del fondo en puntos más alejados del puente, como por ej. 200 m. ó 500

m. aguas arriba y aguas abajo, para estimar de mejor manera la pendiente promedio del río. Los ríos estudiados en el presente documento son costeros, y tienden a tener pendientes en el orden de 0.0010 m/m, por lo que fácilmente en temporadas donde no hay mucho caudal circulando podrían formarse bancos de sedimentos, y aparentar una pendiente negativa.

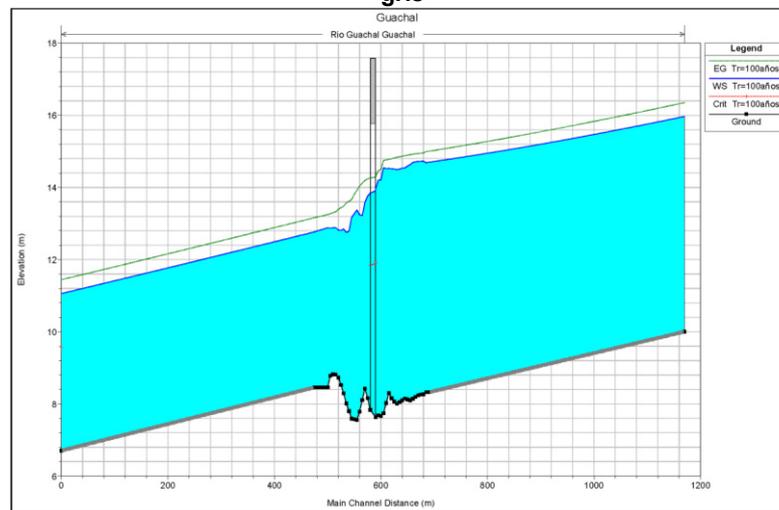
8. Si se usa el método de estimación de socavación local de Laursen, antes debe calcularse la velocidad crítica de las partículas del lecho del río para poder categorizar el tipo de socavación que podría presentarse. Sin embargo, se recomienda realizar este proceso en cada sección estudiada, puesto que podría presentarse más de un tipo de socavación en el mismo río en diferentes tramos.

## **APÉNDICES**

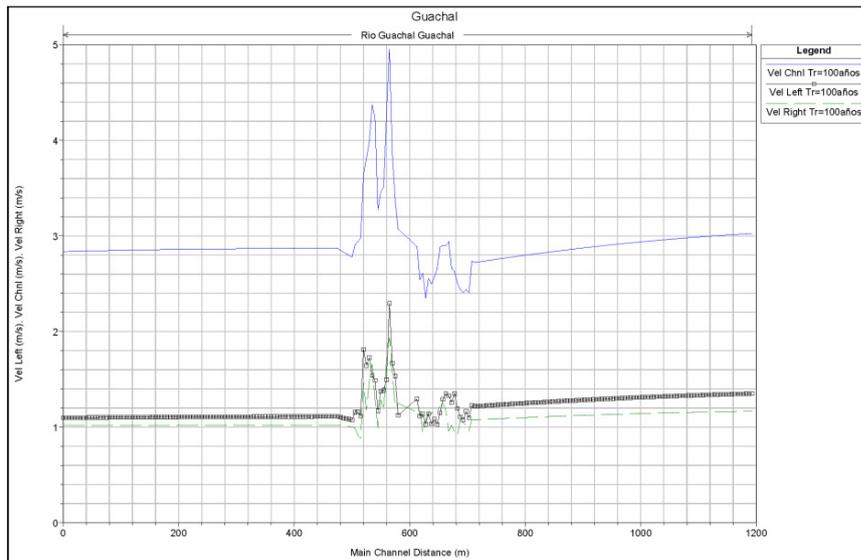
# 1 Guachal



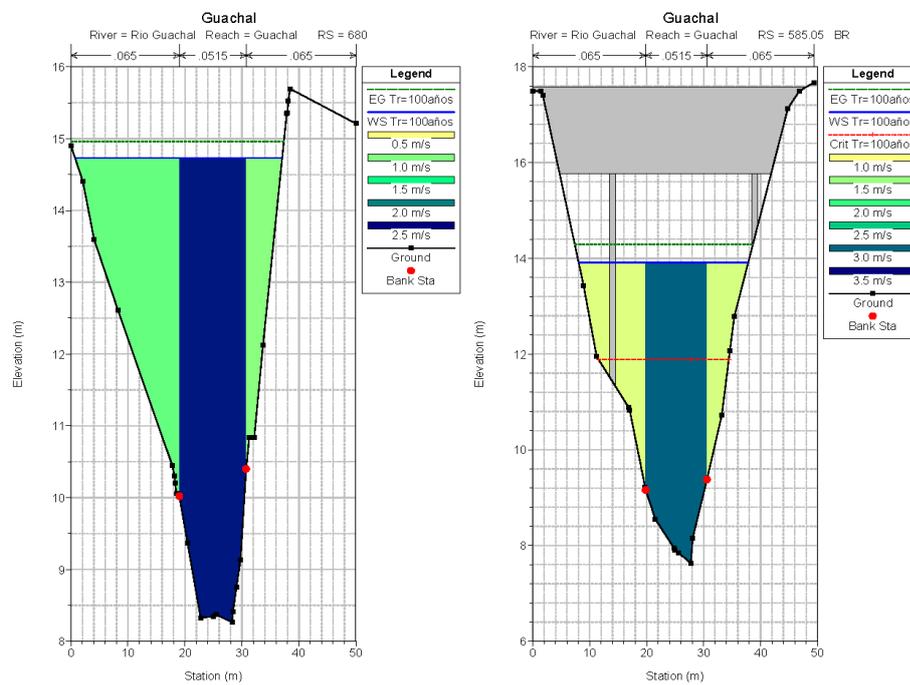
**A - 1 Vista en Planta del modelo del Río Guachal, en HEC – RAS. Ubicación del puente en color gris**



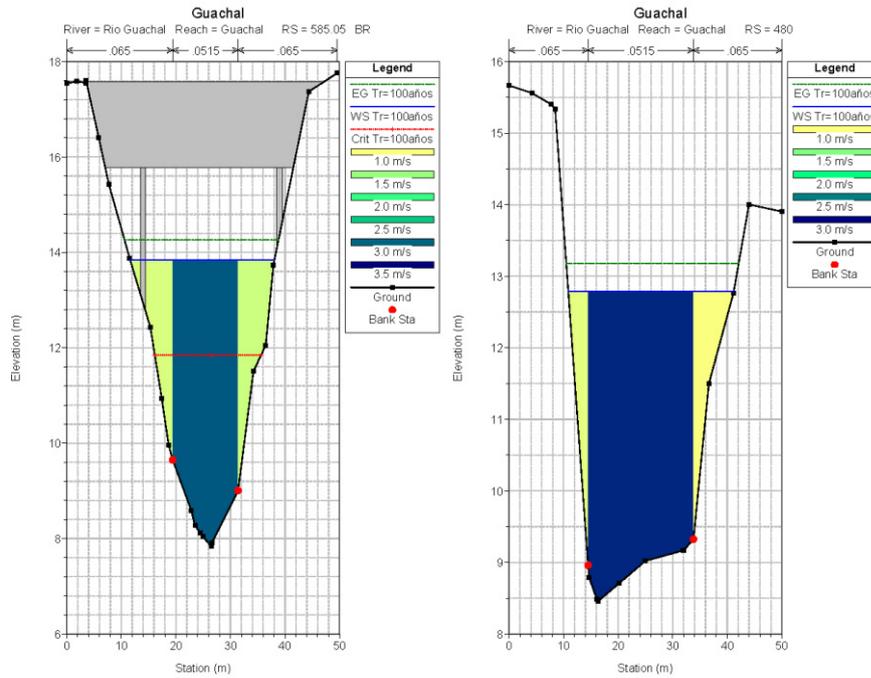
**A - 2 Perfil Longitudinal del Río Guachal, en HEC – RAS**



**A - 3 Distribución de velocidades en canal principal y márgenes del Río Guachal, en HEC – RAS**

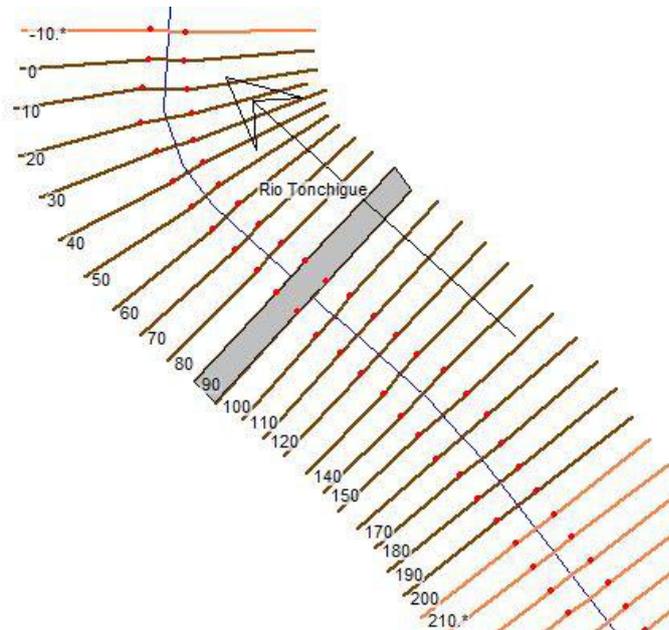


**A - 4. Secciones Transversales ABS 0+680 y ABS 0+590**

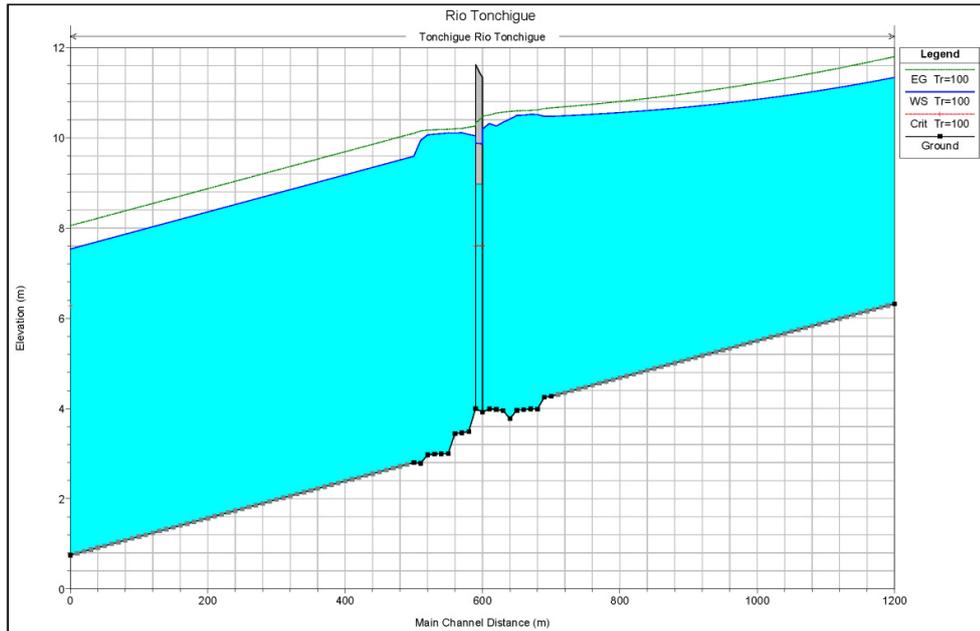


A - 5 Secciones Transversales ABS 0+580 y ABS 0+480

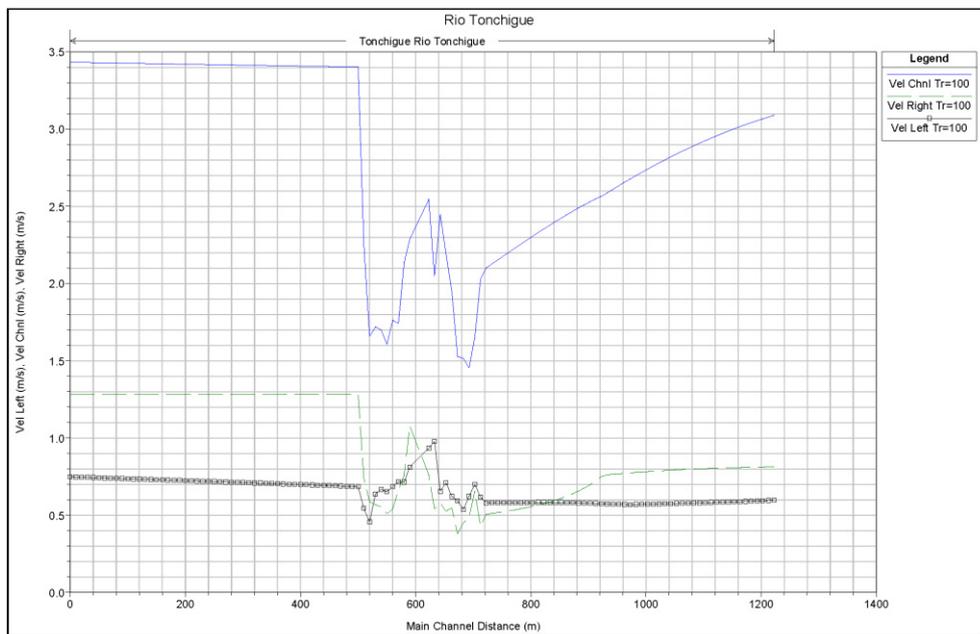
## 2 Tonchigüe



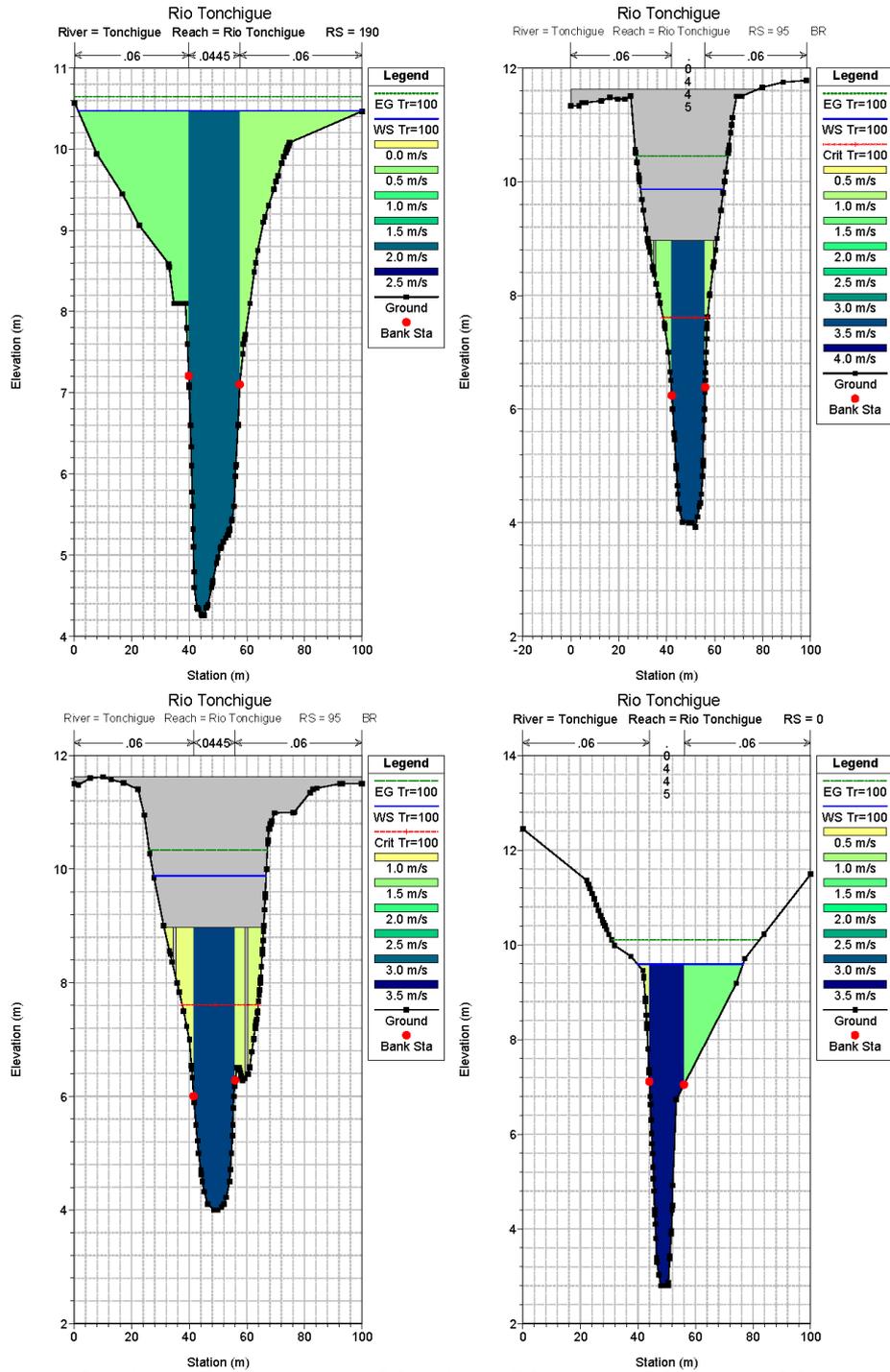
A - 6 Vista en Planta del modelación del Río Tonchigüe, en HEC – RAS. Ubicación del puente en color gris



**A - 7 Perfil Longitudinal del Río Tonchigüe, en HEC – RAS**

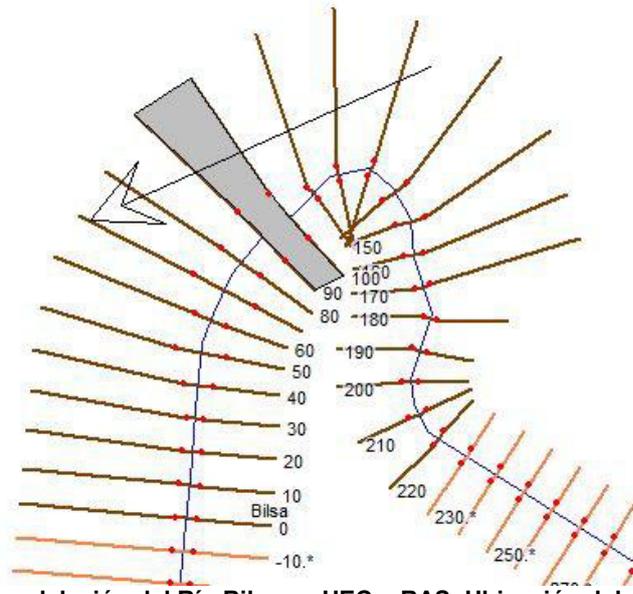


**A - 8 Distribución de velocidades en canal principal y márgenes del Río Tonchigüe, en HEC – RAS**

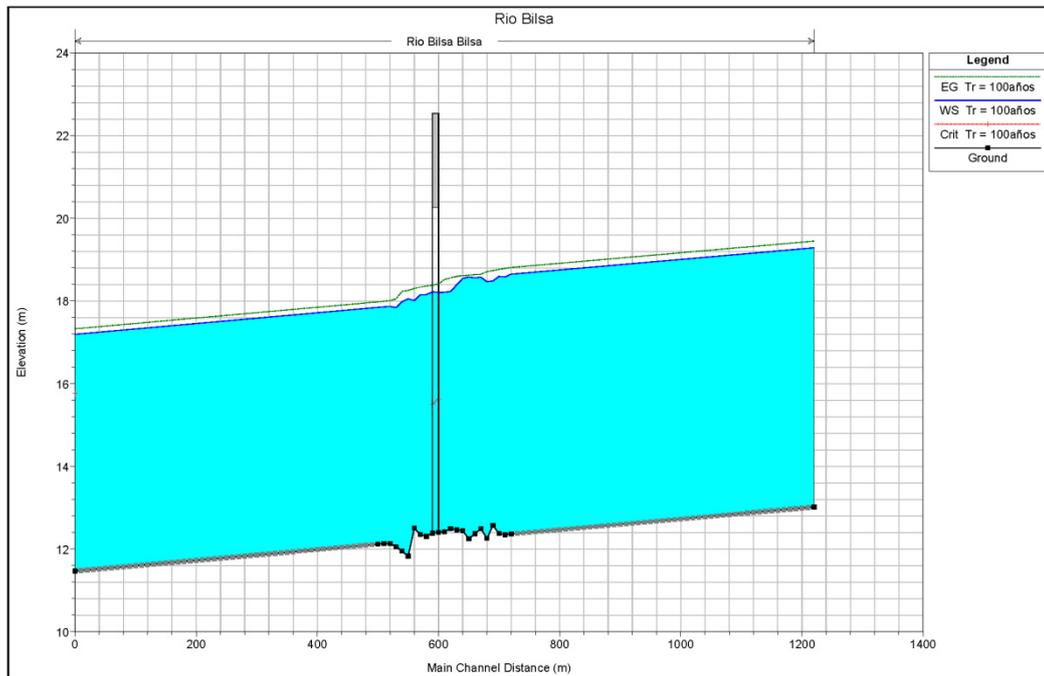


**A - 9 Secciones Transversales ABS 0+190, ABS 0+100, ABS 0+090, ABS 0+000**

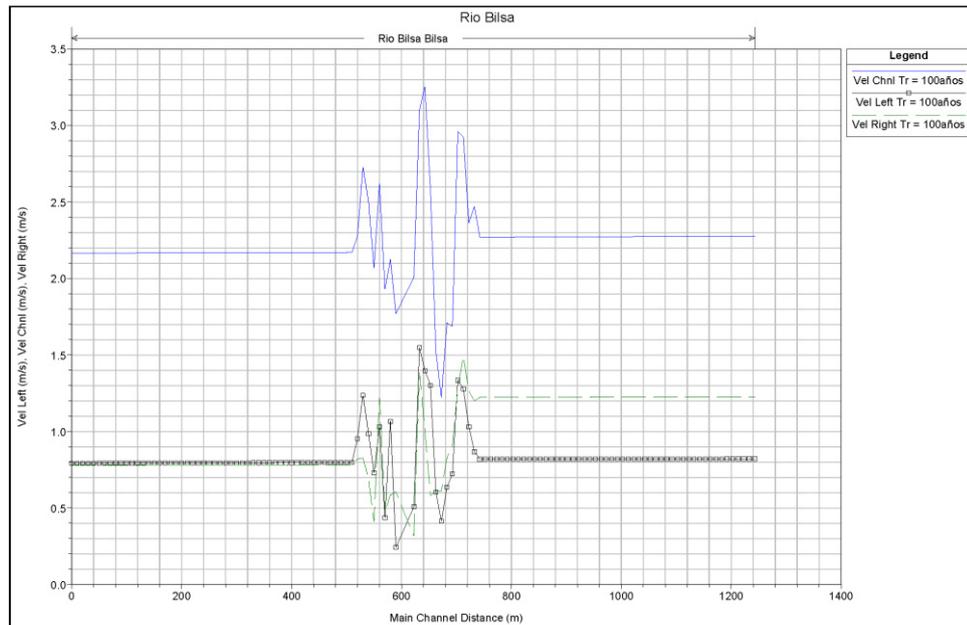
### 3 Bilsa



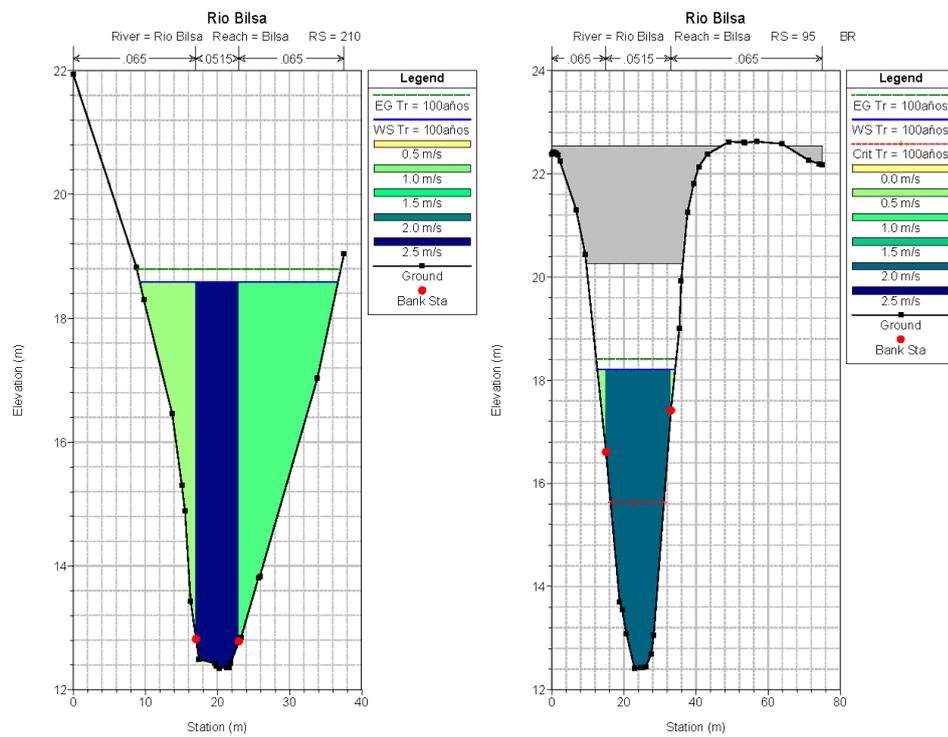
A - 10 Vista en Planta del modelación del Río Bilsa en HEC – RAS. Ubicación del puente en color gris



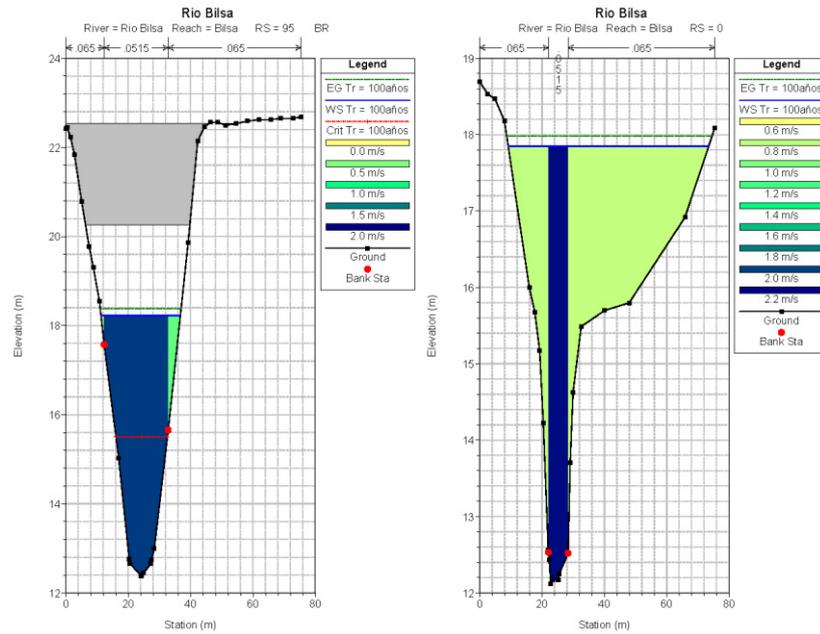
A - 11 Perfil Longitudinal del Río Bilsa, en HEC – RAS



A - 12 Distribución de velocidades en canal principal y márgenes del Río Bilsa, en HEC – RAS

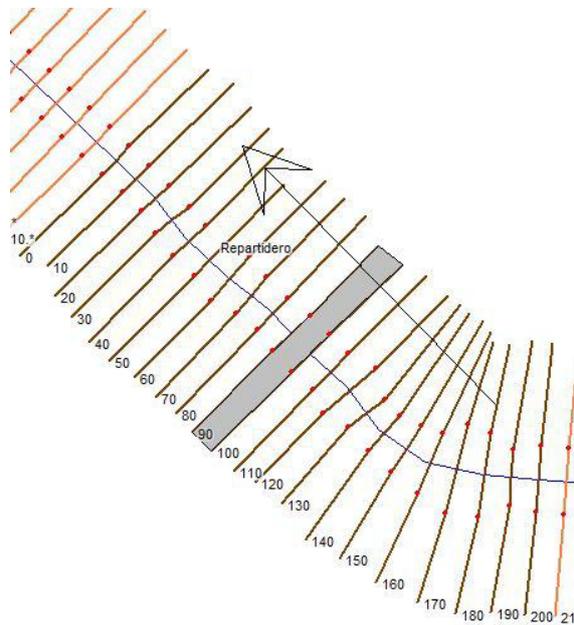


A - 13 Secciones Transversales ABS 0+210 y ABS 0+100

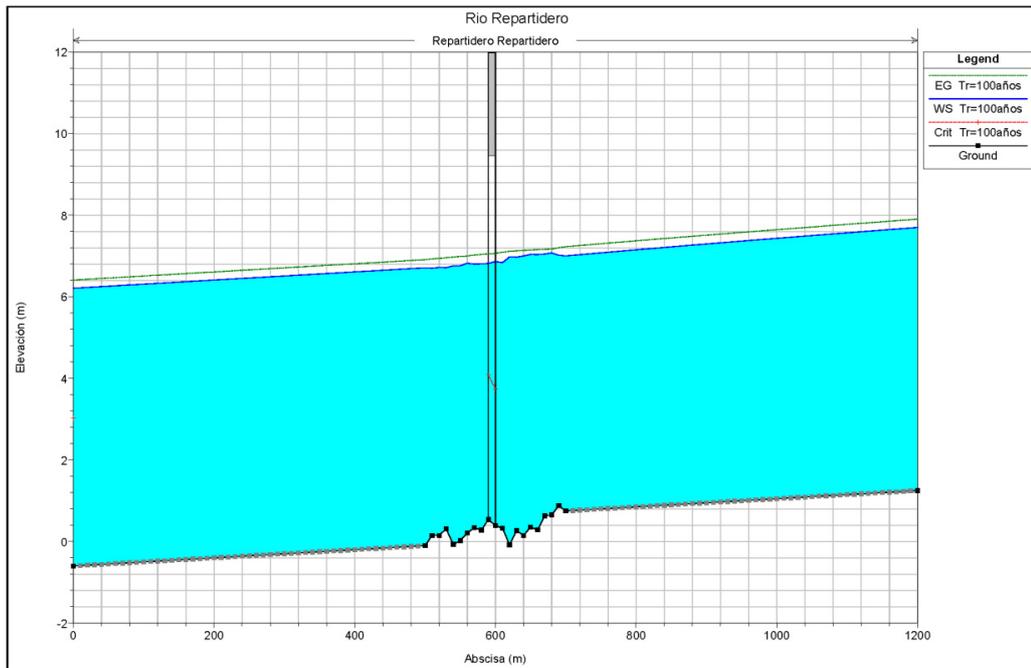


A - 14 Secciones Transversales ABS 0+090 y ABS 0+000

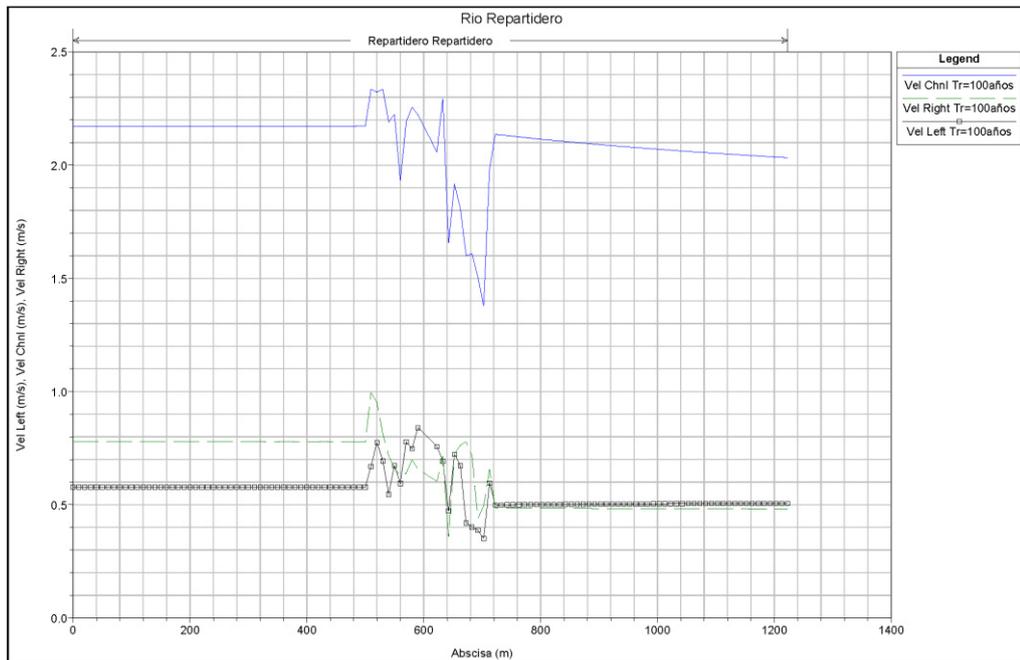
## 4 Repartidero



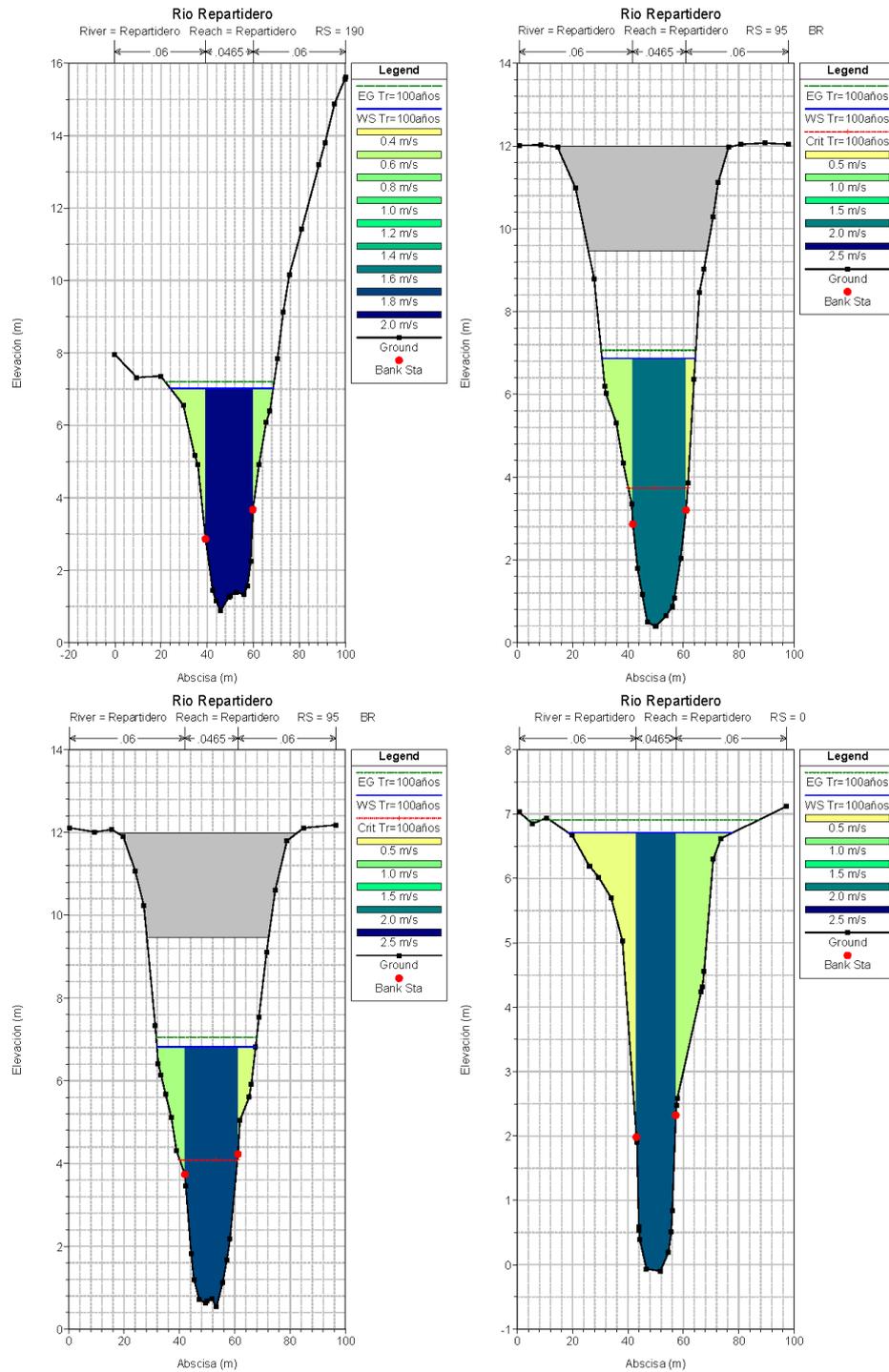
A - 15 Vista en Planta del modelación del Río Repartidero en HEC – RAS. Ubicación del puente en color gris



A - 16 Perfil Longitudinal del Río Repartidero, en HEC – RAS

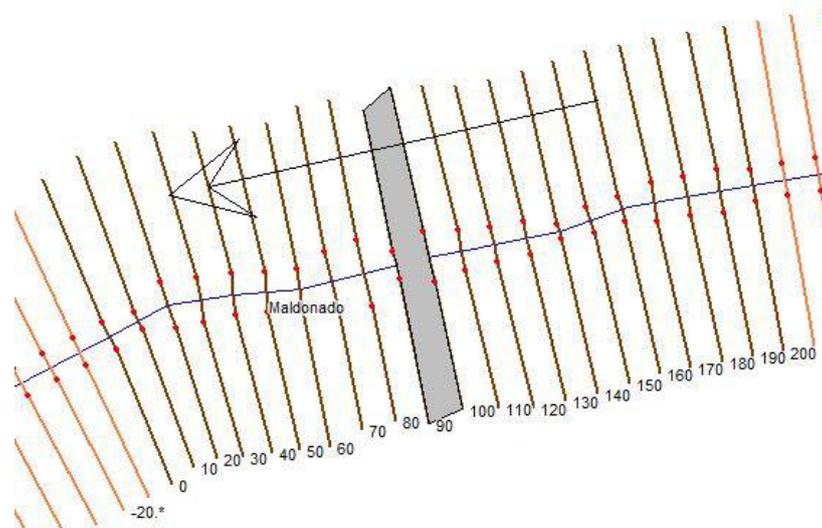


A - 17 Distribución de velocidades en canal principal y márgenes del Río Repartidero, en HEC – RAS

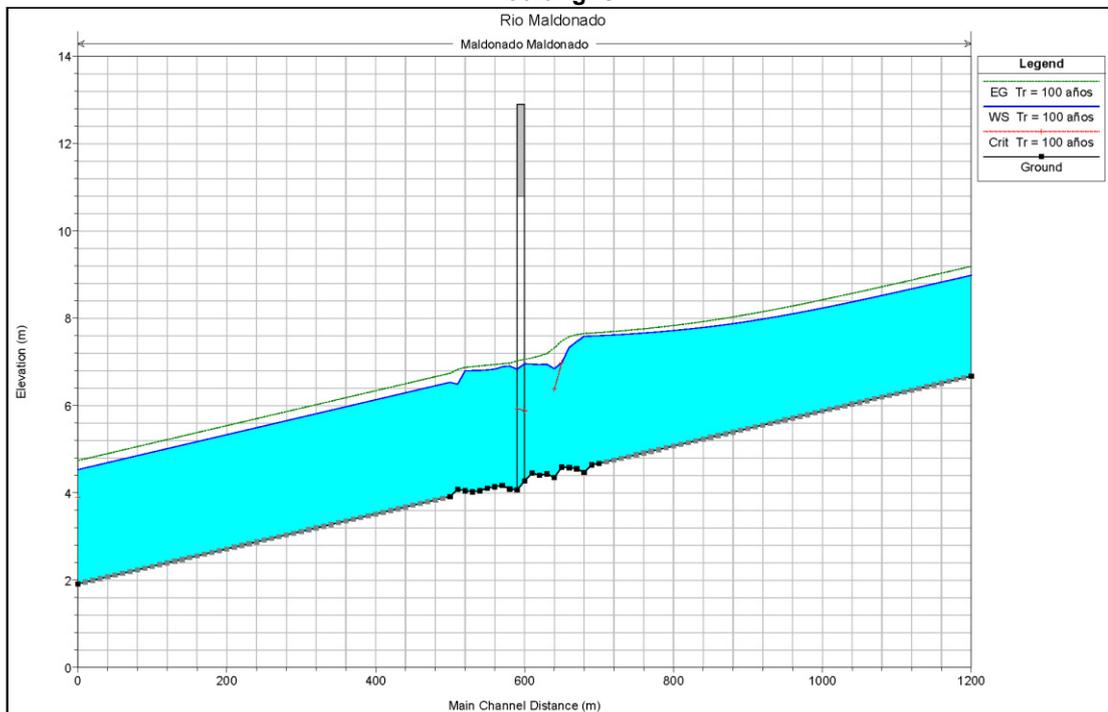


**A - 18 Secciones Transversales ABS 0+190, ABS 0+100, ABS 0+090, ABS 0+000**

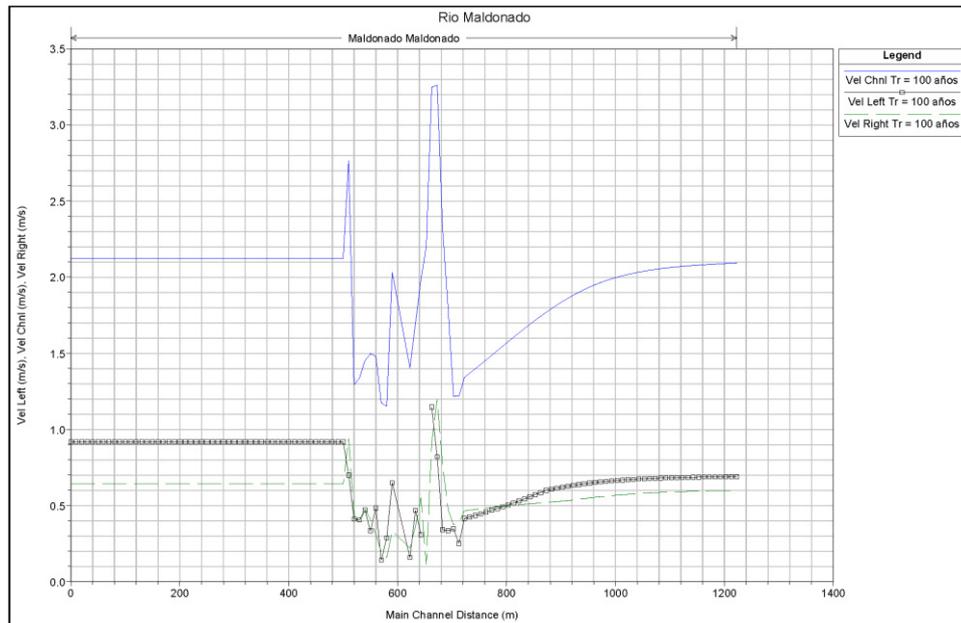
## 5 Maldonado



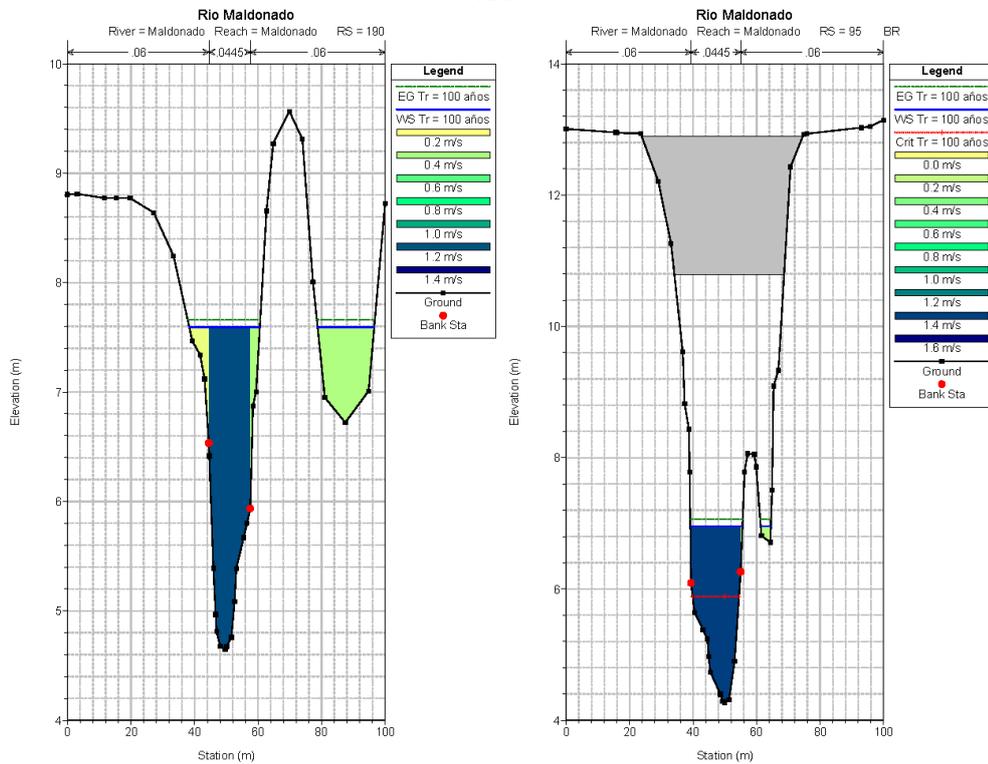
**A - 19 Vista en Planta del modelación del Río Maldonado en HEC – RAS. Ubicación del puente en color gris**



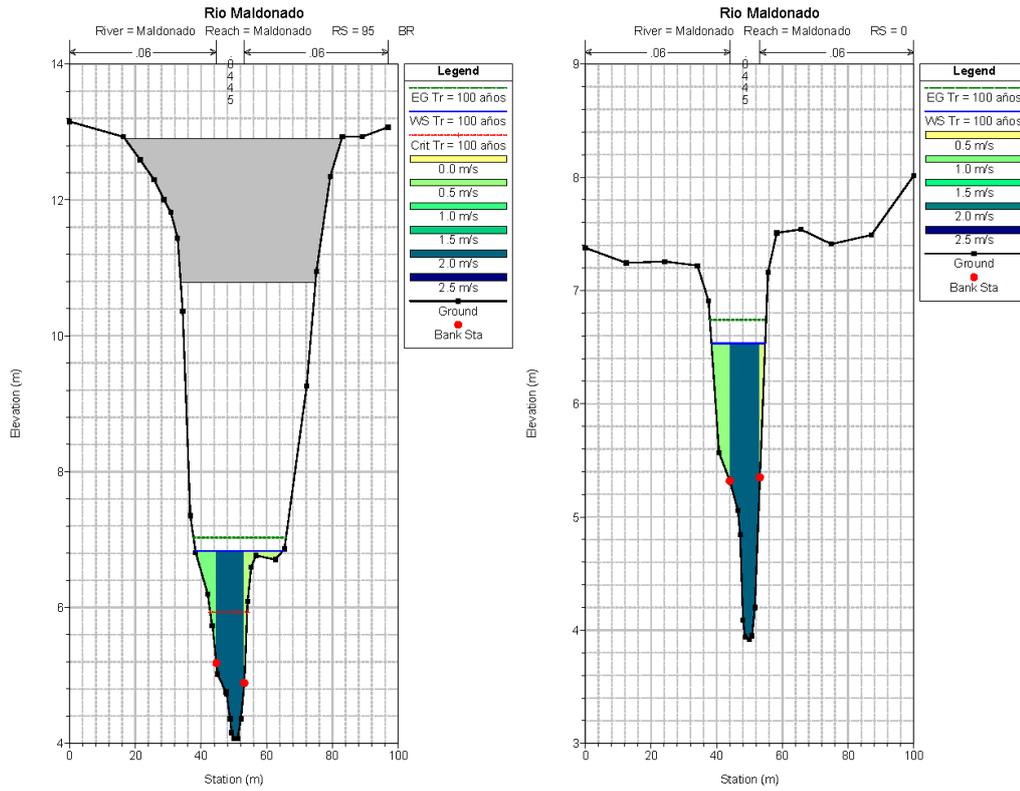
**A - 20 Perfil Longitudinal del Río Maldonado, en HEC – RAS**



**A - 21 Distribución de velocidades en canal principal y márgenes del Río Maldonado, en HEC – RAS**

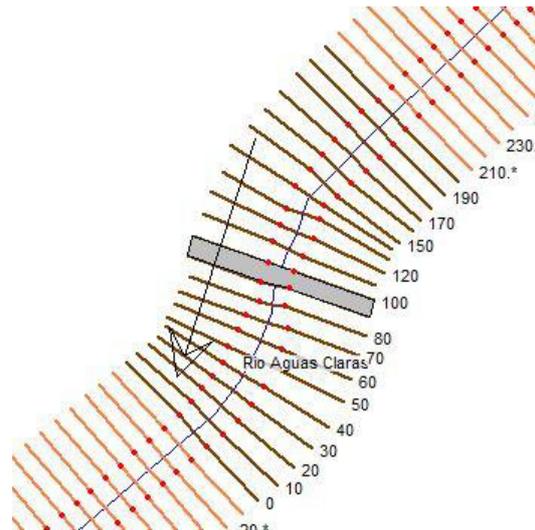


**A - 22 Secciones Transversales ABS 0+190 y ABS 0+100**

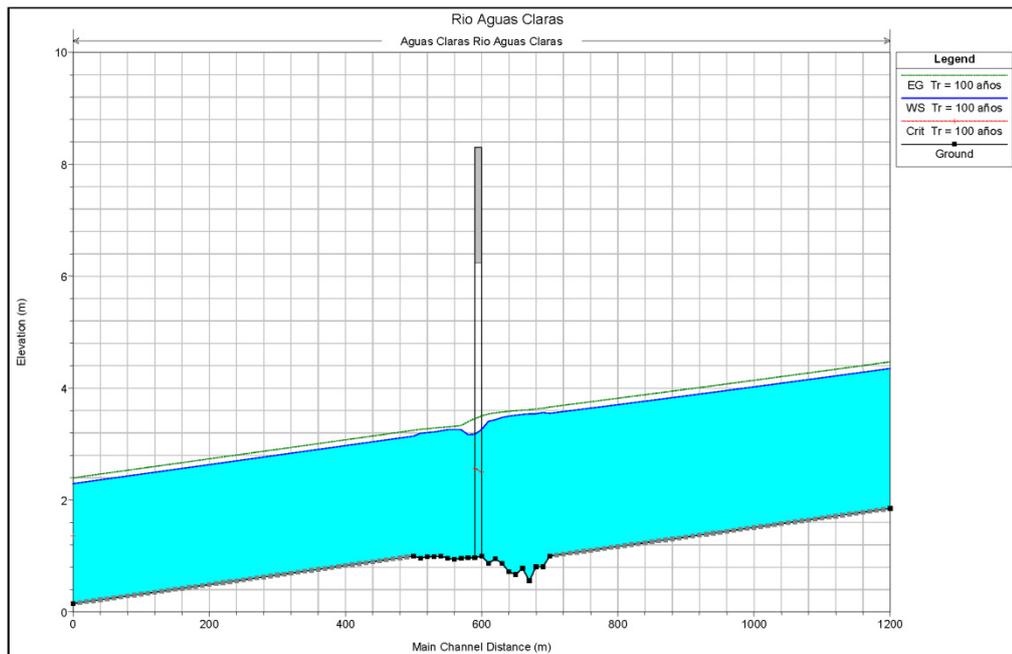


A - 23 Secciones Transversales ABS 0+090 y ABS 0+000

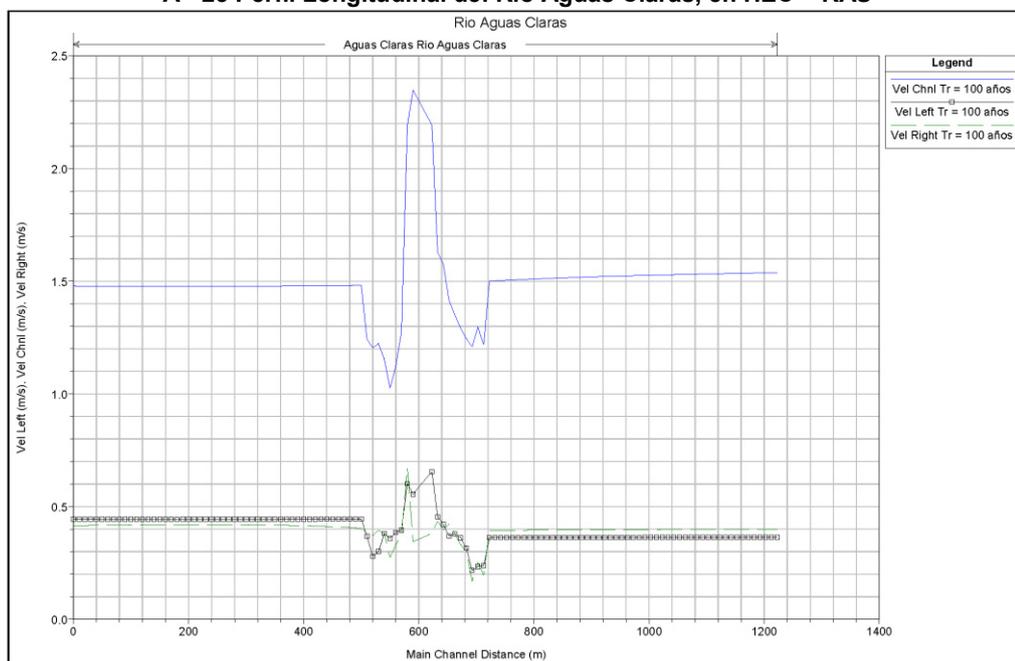
## 6 Aguas Claras



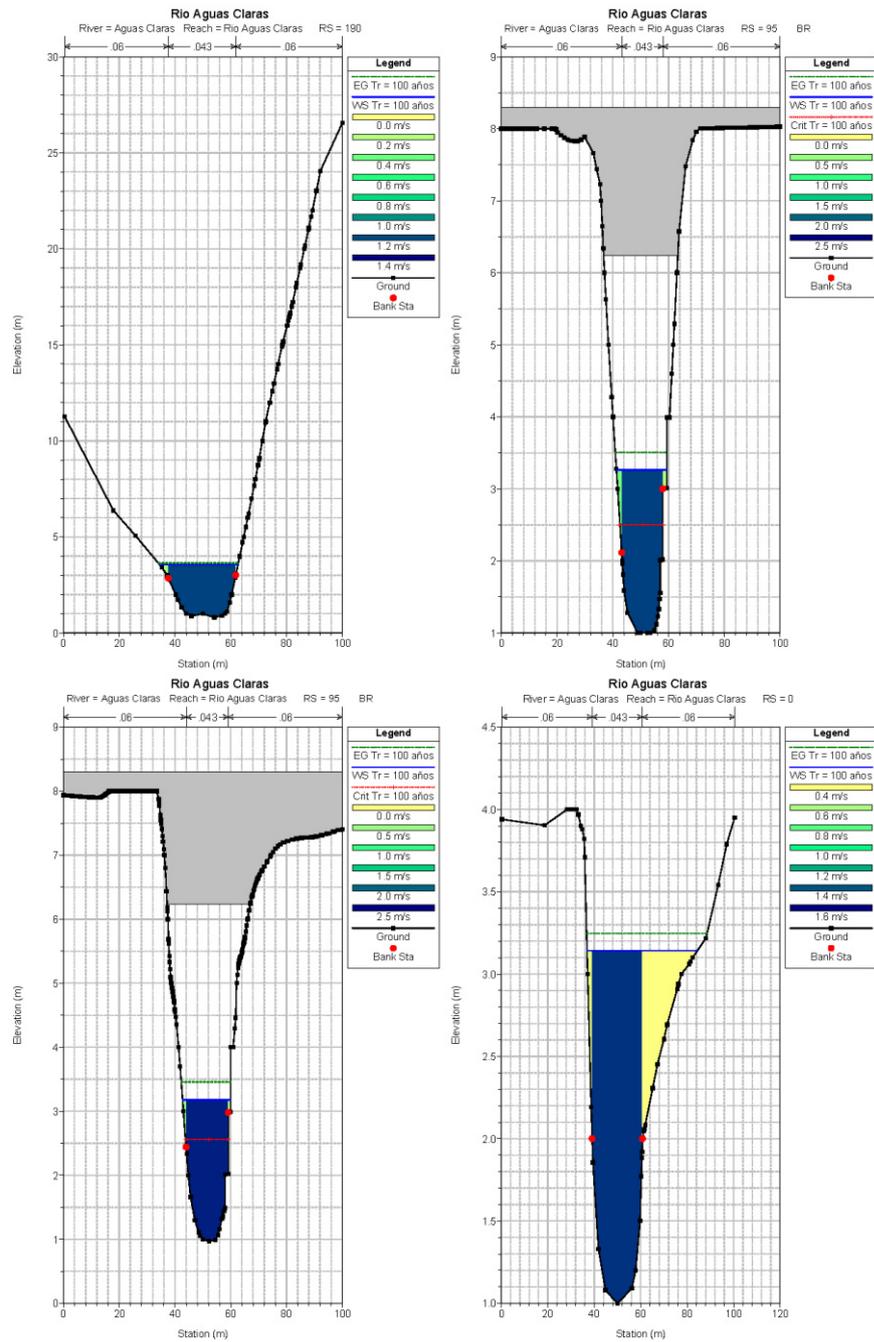
A - 24 Vista en Planta del modelación del Río Aguas Claras en HEC – RAS. Ubicación del puente en color gris



**A - 25 Perfil Longitudinal del Río Aguas Claras, en HEC – RAS**

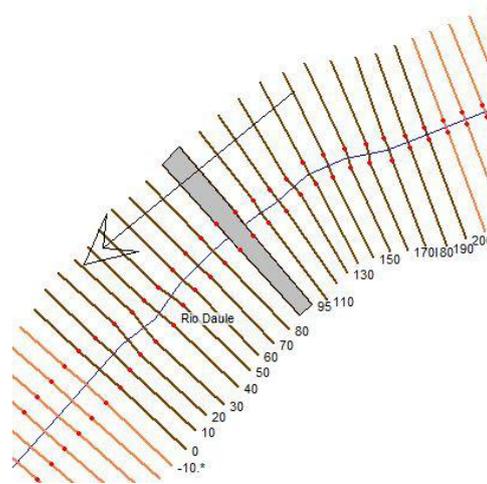


**A - 26 Distribución de velocidades en canal principal y márgenes del Río Aguas Claras, en HEC – RAS**

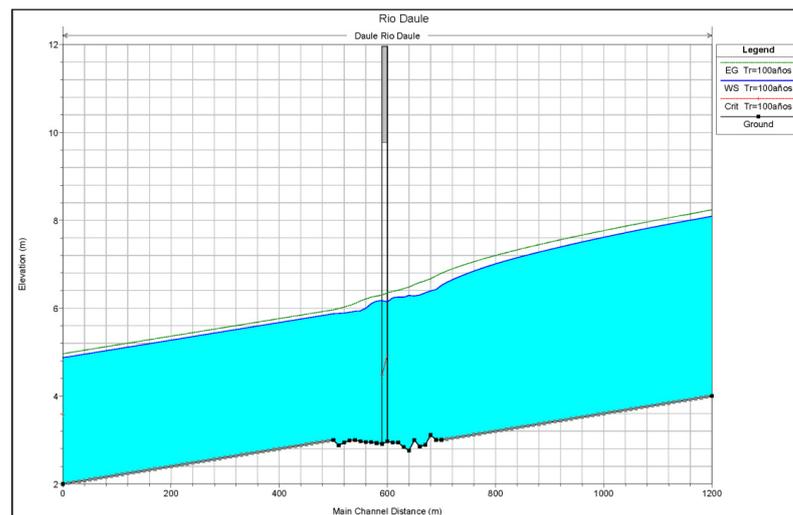


A - 27 Secciones Transversales ABS 0+190 y ABS 0+100, ABS 0+090, ABS 0+000

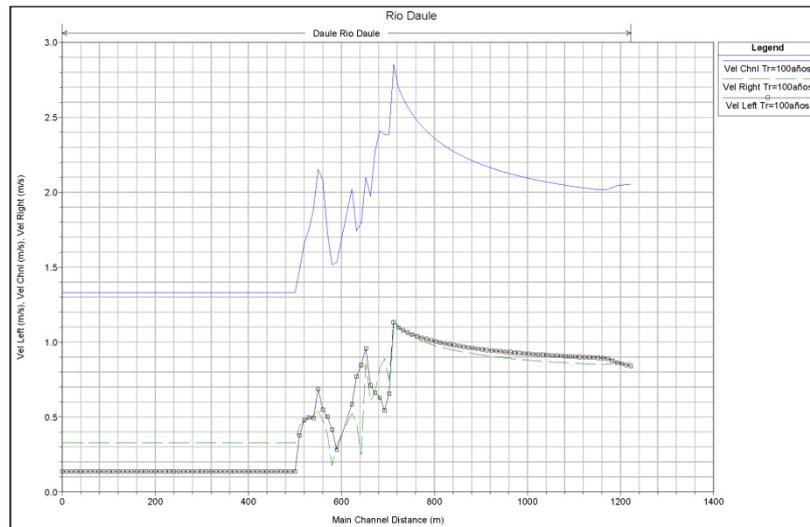
## 7 Daule



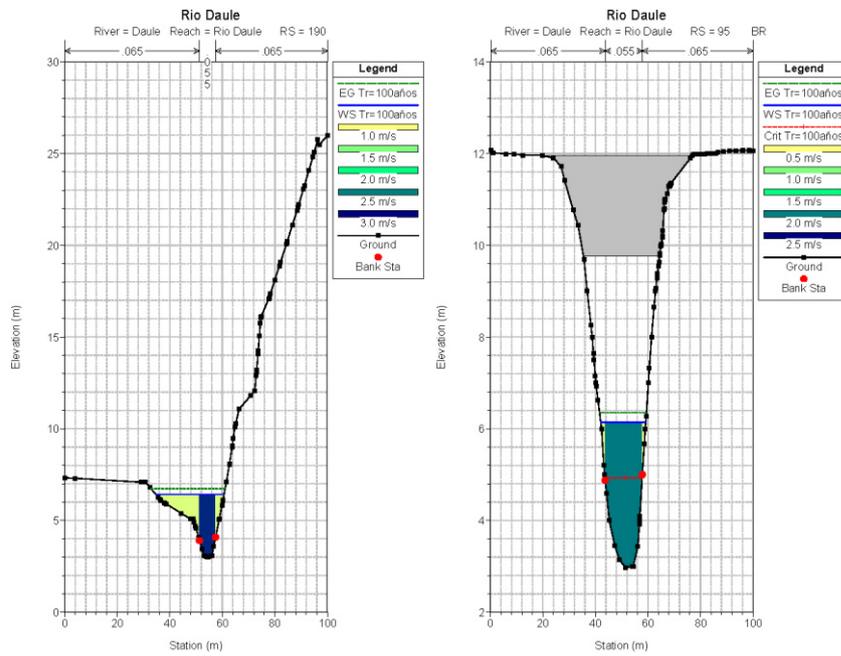
**A - 28 Vista en Planta del modelación del Río Daule en HEC – RAS. Ubicación del puente en color gris**



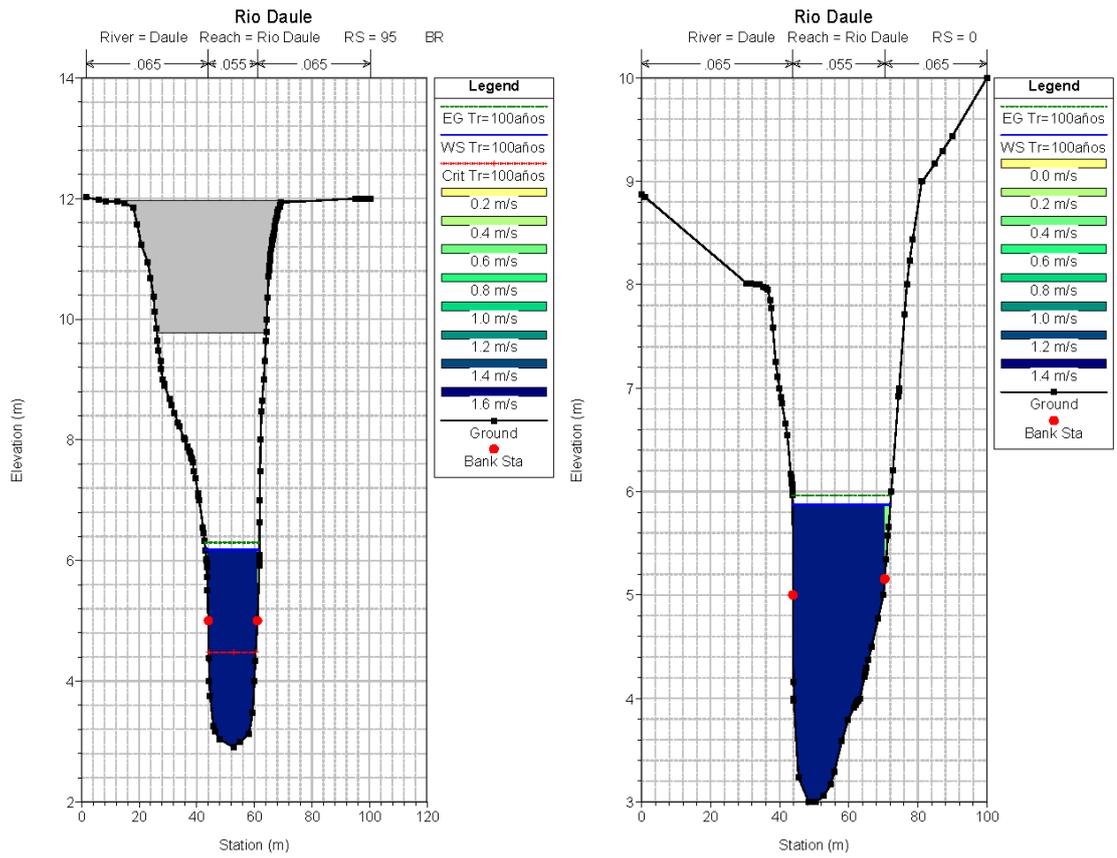
**A - 29 Perfil Longitudinal del Río Daule, en HEC – RAS**



A - 30 Distribución de velocidades en canal principal y márgenes del Río Daule, en HEC – RAS



A - 31 Secciones Transversales ABS 0+190 y ABS 0+100



**A - 32 Secciones Transversales ABS 0+090 y ABS 0+000**

## BIBLIOGRAFÍA

1. Akan, A. O. (2006). *Open Chanel Hydraulics*. Oxford: Elsevier.
2. Annadale, G. W. (2006). *Scour Technology Prediction and Management of Water Erosion of Earth Materials*. Denver, Colorado: Mc Graw Hill.
3. Chow, V. T. (1994). *Hidraulica de Canales Abiertos*. Santafé de Bogota, Colombia: Mc Graw Hill.
4. Farias, H., Pilán , M., & Olmos, L. (2003). *Erosion General en Rios con Lechos Arenosos*. Buenos Aires, Argentina.
5. Google. (2014). Google Earth. USA.
6. Juárez, E., & Rico, A. (2003). *Mecánica de Suelos Volumen 3*. Mexico DF: Limusa.
7. Melville, B. W., & Coleman, S. E. (2000). Bridge Scour. *Water Resources Publication*, 550.

8. Richardson, E., & Davis, S. (2001). *Evaluating scour at bridges*. Fort Collins (US): Federal Highway Administration.
9. U.S. ARMY, C. E. (2010, January Davis). HEC-RAS v4.1 Reference Manual. *Manual HEC-RAS*. California, Estados Unidos.
10. USACE. (2010, January). HEC-RAS. In U. Army, *HEC-RAS v4.1 Reference Manual*. California, Estados Unidos.
11. USACE. (Abril 2012). *HEC-18*. WASHINGTON D.C.: FHWA Resource Center Hydraulics.
12. USACE. (n.d.). *HEC-18*. WASHINGTON D.C.: FHWA Resource Center Hydraulics.