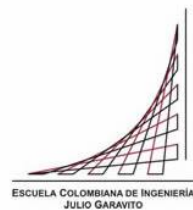


Maestría en Ingeniería Civil
Énfasis en recursos hidráulicos y medio ambiente

Herramientas para caracterización y diseño de cauces aluviales

Rodolfo Exneyder Velasco Burgos

Bogotá, D.C., Marzo de 2019



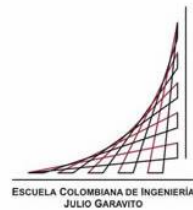
Herramientas para caracterización y diseño de cauces aluviales

**Tesis para optar al título de Magíster en Ingeniería Civil, con
énfasis en recursos hidráulicos y medio ambiente**

Héctor Alfonso Rodríguez Díaz

Director

Bogotá, D.C., Marzo de 2019



La tesis de maestría titulada “Herramientas para caracterización y diseño de cauces aluviales”, presentada por Rodolfo Exneyder Velasco Burgos, cumple con los requisitos establecidos para optar al título de Magíster en Ingeniería Civil con énfasis en recursos hidráulicos y medio ambiente.

Director de la tesis

Héctor Alfonso Rodríguez Díaz

Jurado

Germán Ricardo Santos Granados

Bogotá, D.C., Marzo de 2019

Dedicatoria

A Dios y a la virgen de Chiquinquirá por darme la vida y la oportunidad de culminar esta meta, que con gran esfuerzo, dedicación y disciplina pude cumplir a pesar de los obstáculos presentados durante el transcurso del postgrado.

A mi madre, quien con constancia, apoyo incondicional y amor, siempre me ha acompañado en todas mis metas y triunfos.

A mi padre, que aunque ya no se encuentra, siempre me brindó su apoyo, comprensión y ganas de seguir, pues depositó en mí toda su confianza para que persiguiera incansablemente mis sueños.

A mis hermanos que han sido incondicionales y han depositado toda su confianza en mí, desde el inicio de mis estudios profesionales.

Exneyder V.

Agradecimientos

El autor expresa sus agradecimientos por su apoyo tiempo y colaboración a:

Ingeniero Héctor Alfonso Rodríguez, director de este trabajo de grado, por su colaboración, apoyo y dirección durante el desarrollo de este trabajo.

A cada uno de los ingenieros - docentes de la Maestría en Ingeniería Civil – Énfasis en Recursos Hidráulicos y Medio Ambiente, especialmente a los jurados y docentes, del presente proyecto, pues aportaron para éste, las respectivas correcciones y observaciones necesarias para un desarrollo exitoso.

Resumen

La idea de desarrollar este trabajo de grado, surgió de la falta de herramientas que permitan de forma ágil y práctica realizar la caracterización y diseño de cauces sinuosos. Con el fin de contribuir a la solución de esta necesidad, se construyeron herramientas que mediante curvas de caracterización elaboradas en función de diferentes parámetros hidráulicos y geométricos, permiten establecer sus dimensiones y diseño. Para esto, será necesario considerar la longitud y pendiente del valle, un periodo de retorno, caudales de modelación, tipo de canal, secciones transversales compuestas con diferentes profundidades y una condición de flujo.

Dentro de los antecedentes encontrados, se evidenció el desarrollo de diferentes investigaciones y trabajos relacionados con la elaboración de herramientas para el diseño y caracterización de cauces, dentro de los cuales se identificaron diferentes artículos desarrollados por Héctor Daniel Farias sobre fórmulas prácticas para el diseño de canales sin revestir en terrenos aluviales y geometría hidráulica de ríos de llanura. Así mismo, se hallaron dos trabajos realizados por Ceballos en el año 2011, sobre modelación hidráulica y morfodinámica de cauces sinuosos, y formulación racional de la relación ancho-profundidad para cauces aluviales estables.

A partir de metodología que se desarrolló durante la elaboración del trabajo de grado, correspondió a una investigación de carácter práctico, ya que con los modelos hidráulicos y las modelaciones realizadas, se obtuvieron unas curvas de caracterización y fichas técnicas de diseño de cauces aluviales. Dicha metodología contempló lo siguiente: consultar la bibliografía, antecedentes, bases y fundamentos teóricos, investigaciones y/o tesis relacionadas con el tema, documentos técnicos existentes y demás información disponible que permita conocer sobre la temática desarrollada en el presente trabajo de grado. Así mismo, se contempló establecer los parámetros geométricos e hidráulicos correspondientes a diferentes cauces aluviales a través de la metodología de la fuerza tractiva, diseño sinuoso y sección compuesta, para finalmente modelar en condiciones de flujo no permanente diferentes escenarios de las condiciones geométricas e hidráulicas de cauces aluviales y realizar los análisis de resultados, observaciones, recomendaciones y/o conclusiones, que permitan ser utilizados para el diseño de cauces aluviales.

Finalmente, por medio de las hojas de diseño que contienen las fichas técnicas y las curvas de caracterización que fueron construidas en función de la altura disponible de la sección compuesta, la sinuosidad del cauce, el tamaño del material característico del lecho, los datos del caudal a un periodo de retorno (TR) de 2.33 años y 100 años y la pendiente de diseño, se puede determinar el ancho inferior del canal dominante y el ancho superior del canal valle, con el fin de establecer las dimensiones geométricas para el diseño geométrico y sinuoso de cauces aluviales.

Palabras clave: diseño sinuoso, diseño geométrico, hidráulica de canales, flujo uniforme, método de la fuerza tractiva, cauces aluviales, herramientas de caracterización.

Abstract

The idea of developing this degree work, arose from the lack of tools that allow in an agile and practical way to carry out the characterization and design of sinuous channels. In order to contribute to the solution of this need, tools were constructed that, by means of characterization curves elaborated in function of different hydraulic and geometric parameters, allow to establish their dimensions and design. For this, it will be necessary to consider the length and slope of the valley, a return period, modeling flows, channel type, composite cross sections with different depths and a flow condition.

Within the background, it was evidenced the development of different investigations and works related to the development of tools for the design and characterization of channels, within which different articles developed by Héctor Daniel Farias on practical formulas for the design of channels were identified. uncoated in alluvial lands and hydraulic geometry of rivers of plain. Likewise, two works carried out by Ceballos in 2011 were found, on hydraulic and morphodynamic modeling of sinuous channels, and rational formulation of the width-depth relationship for stable alluvial channels.

From the methodology developed during the elaboration of the degree work, it corresponded to a practical investigation, since with the hydraulic models and the modeling carried out, some characterization curves and alluvial river design technical sheets were obtained. Said methodology contemplated the following: consult the bibliography, background, foundations and theoretical foundations, investigations and / or theses related to the subject, existing technical documents and other available information that allows to know about the theme developed in the present work of degree. Likewise, it was envisaged to establish the geometric and hydraulic parameters corresponding to different alluvial channels through the methodology of the tractive force, sinuous design and composite section, to finally model in different non-permanent flow conditions different scenarios of the geometric and hydraulic conditions of alluvial channels and perform the analysis of results, observations, recommendations and / or conclusions, which can be used for the design of alluvial channels.

Finally, by means of the design sheets containing the technical sheets and the characterization curves that were built according to the available height of the composite

section, the sinuosity of the channel, the size of the material characteristic of the bed, the flow data At a return period (TR) of 2.33 years and 100 years and the design slope, the upper width of the dominant channel and the lower width of the valley channel can be determined, in order to establish the geometrical dimensions for the geometric design and winding alluvial channels.

Keywords: sinuous design, geometric design, hydraulic channels, uniform flow, tractive force method, alluvial channels, characterization tools.

Tabla de Contenido

Capítulo I.....	24
Marco teórico	24
1.1 Estado del Arte	24
1.1.1 Fórmulas prácticas para el diseño de canales sin revestir en terrenos aluviales. 24	
1.1.2 Geometría hidráulica de ríos de llanura. Enfoques analíticos considerando la influencia de las márgenes.	27
1.1.2.1 <i>Geometría hidráulica de ríos.</i>	27
1.1.3 Modelación hidráulica y morfodinámica de cauces sinuosos aplicación a la Quebrada La Marinilla (Ant).....	32
1.1.4 Formulación racional de la relación ancho-profundidad para cauces aluviales estables.	33
1.1.4.1 <i>Planteamiento general.</i>	33
1.1.4.2 <i>Razón de aspecto de un cauce aluvial.</i>	34
1.2 Marco Conceptual.....	36
1.2.1 Flujo uniforme.....	36
1.2.1.1 <i>Clasificación de los canales.</i>	36
1.2.1.1.1 <i>Canales naturales.</i>	37
1.2.1.1.2 <i>Canales artificiales.</i>	37
1.2.1.2 <i>Elementos geométricos de los canales.</i>	39
1.2.1.3 <i>Clasificación del flujo en canales abiertos.</i>	42
1.2.1.3.1 <i>Flujo permanente y flujo no permanente.</i>	43
1.2.1.3.2 <i>Flujo uniforme y flujo variado.</i>	44
1.2.2 Canales con sección compuesta y rugosidad.	46
1.2.2.1 <i>Rugosidad compuesta.</i>	49
1.2.3 Método de la Fuerza tractiva o esfuerzo tangencial propuesto por el U. S. B. R. 50	
1.2.3.1 <i>Relación de fuerza tractiva.</i>	53
1.2.4 Métodos para cálculo de borde libre.....	59
1.2.4.1 <i>U.S. BUREAU OF RECLAMATION.</i>	59
1.2.4.2 <i>Criterio Ing. Germán Acero – Escuela Colombiana de Ingeniería.</i>	60
1.2.4.3 <i>Hidráulica de tuberías y canales, Arturo Rocha.</i>	60
1.2.4.4 <i>Hidráulica de canales, Pedro Rodríguez Ruíz.</i>	61
1.2.4.5 <i>Manual de pequeñas presas.</i>	61
1.2.5 Diseño geométrico horizontal y sinuoso de cauces aluviales – parámetros y diseño.....	62
1.2.5.1 <i>Longitud sinuosa del río (Lr).</i>	64
1.2.5.2 <i>Prevención coalineación de taludes en zonas de curva.</i>	64
Capítulo II.....	66
VARIABLES Y PARÁMETROS PARA LAS CURVAS DE CARACTERIZACIÓN	66
2.1. Interacción de las Principales Variables de los Cauces Aluviales.....	66
2.2. Definición e Identificación de las Variables y Parámetros para las Curvas de Caracterización.	71

2.2.1	Periodo de retorno	71
2.2.2	Caudales de modelación.....	71
2.2.3	Sección transversal del canal	72
2.2.4	Tipo de flujo.....	72
2.2.5	Tipo de canal.....	72
2.2.6	Longitud y ancho máximo disponible del valle.....	72
2.2.7	Factor de sinuosidad y longitud del cauce.....	73
En las hojas de diseño, también se puede definir un factor de sinuosidad donde: canal ligeramente sinuoso $F_s=1$, canal moderadamente sinuoso $F_s=1.25$ y canal muy sinuoso $F_s=1.5$. Igualmente se definió una longitud del cauce sinuoso de máximo 1500 m con un $F_s=1.5$. Estos valores se pueden variar en las hojas de diseño, con el fin de obtener otras curvas de caracterización.....		
2.2.8	Coeficientes de rugosidad.....	73
2.2.9	Ángulo de reposo del material.....	73
2.2.10	Pendientes del cauce sinuoso y valle.....	73
Capítulo III.....		75
Elaboración de fichas técnicas de diseño de cauces aluviales y sinuosos		75
3.1.	Construcción Hoja de Diseño Cauces Aluviales.....	75
3.2.	Cálculo de Sección Hidráulica de Canal Trapezoidal Compuesta, por el Método de la Fuerza Tractiva.....	83
3.2.1.	Cálculo de la base del canal dominante.....	83
3.3.	Procedimiento de Operación Hoja de Diseño Cauces Aluviales.....	86
3.4.	Valores Permisibles de Velocidades Máximas y Fuerzas Tractivas Unitarias.....	94
Capítulo IV		98
Diseño geométrico horizontal y sinuoso de cauces aluviales		98
4.1.	Trazado de ejes y construcción de modelo Civil 3D	101
Capítulo V		108
Diseño hidráulico secciones canales diseñados		108
5.1.	Diseño Hidráulico Primer Canal.....	108
5.1.1.	Verificación sección primer canal - flujo uniforme.....	109
5.1.2.	Verificación sección primer canal – método fuerza tractiva.....	111
5.2.	Diseño Hidráulico Segundo Canal.....	113
5.2.1.	Verificación sección segundo canal - flujo uniforme.....	114
5.2.2.	Verificación sección segundo canal – método fuerza tractiva.....	116
5.3.	Diseño Hidráulico Tercer Canal.....	118
5.3.1.	Verificación sección tercer canal - flujo uniforme.....	119
5.3.2.	Verificación sección tercer canal – método fuerza tractiva.....	120
Capítulo VI		123
Modelación hidráulica.....		123
6.1.	Esquema de modelación.....	123
6.2.	Flujo permanente.....	124
6.3.	Esquema matemático del modelo hidráulico.....	124

6.4.	Desarrollo de modelos hidráulicos	127
6.4.1.	Modelo hidráulico primer canal.....	127
6.4.2.	Modelo hidráulico segundo canal	131
6.4.3.	Modelo hidráulico tercer canal	135
Capítulo VII	.....	139
Análisis de Resultados	.....	139
7.1.	Resultados modelación hidráulica primer canal.....	139
7.1.1.	Resultados RAS Mapper modelación hidráulica primer canal	145
	.....	148
7.2.	Resultados modelación hidráulica segundo canal.....	154
7.2.1.	Resultados RAS Mapper modelación hidráulica segundo canal	159
	.....	162
7.3.	Resultados modelación hidráulica tercer canal.....	167
7.3.1.	Resultados RAS Mapper modelación hidráulica tercer canal	171
	.....	174
Capítulo VIII	.....	178
Conclusiones	.....	178
Capítulo IX	.....	182
Bibliografía	.....	182

Índice de tablas

Tabla 1. Fórmulas obtenidas para el diseño de canales aluviales en régimen.	25
Tabla 2. Taludes apropiados para distinto tipos de materiales en el diseño de canales. ..	41
Tabla 3. Valores del coeficiente de rugosidad de Manning para ser aplicado en su	41
Tabla 4. Elementos geométricos de las secciones transversales más frecuentes de canales tipo.	41
Tabla 5. profundidades hidráulicas según el caudal y el revestimiento.	60
Tabla 6. Jerarquía de las variables que interactúan en un sistema aluvial para períodos de tiempo de distinta duración	70
Tabla 7. Caudales de modelación.....	71
Tabla 8. Pendientes del cauce sinuoso definidas.....	74
Tabla 9. Variación de la densidad y el peso específico del agua con la temperatura	75
Tabla 10. Relación desviación estándar para TR2.33 años.....	79
Tabla 11. Porcentaje de reducción en canales (Lane) y factor de sinuosidad	81
Tabla 12. Datos de entrada de la hoja de diseño	86
Tabla 13. Primera sección de la hoja de diseño para el cálculo de la sección del canal dominante	89
Tabla 14. Segunda sección de la hoja de diseño para el cálculo de la sección del canal dominante	89
Tabla 15. Primera sección de la hoja de diseño para el cálculo de la sección del canal valle	90
Tabla 16. Segunda sección de la hoja de diseño para el cálculo de la sección del canal valle	90
Tabla 17. Tercera sección de la hoja de diseño para el cálculo de la sección del canal valle	90
Tabla 18. Velocidades máximas permisibles y fuerzas tractivas unitarias – canales rectos	94
Tabla 19. Velocidades máximas permisibles y fuerzas tractivas unitarias – canales muy sinuosos.....	95
Tabla 20. Velocidades máximas permisibles y fuerzas tractivas unitarias – canales moderadamente sinuosos	96
Tabla 21. Fuerzas tractivas permisibles recomendadas	96
Tabla 22. Diseño geométrico horizontal y sinuoso del primer canal	98
Tabla 23. Diseño geométrico horizontal y sinuoso del segundo canal	99
Tabla 24. Diseño geométrico horizontal y sinuoso del tercer canal	100
Tabla 25. Datos de diseño primer canal	108
Tabla 26. Cálculo flujo uniforme para sección compuesta – primer canal.....	110
Tabla 27. Datos de diseño segundo canal.....	113
Tabla 28. Cálculo flujo uniforme para sección compuesta – segundo canal.....	116
Tabla 29. Datos de diseño tercer canal	118

Tabla 30. Cálculo flujo uniforme para sección compuesta – tercer canal.....	120
Tabla 31. Verificación de resultados modelación hidráulica TR 100 años – primer canal	150
Tabla 32. Verificación de resultados modelación hidráulica TR 2.33 años – primer canal	152
Tabla 33. Verificación de resultados modelación hidráulica TR 100 años – segundo canal	164
Tabla 34. Verificación de resultados modelación hidráulica TR 2.33 años – segundo canal	165
Tabla 35. Verificación de resultados modelación hidráulica TR 100 años – tercer canal	176
Tabla 36. Verificación de resultados modelación hidráulica TR 2.33 años – tercer canal	177

Índice de gráficas

Gráfica 1. Relación entre ancho de régimen y caudal dominante.	29
Gráfica 2. Diagrama de Shields generalizado (adaptado de García, 2000) en el que se indican las regiones características correspondientes a ríos de llanura, ríos con lecho de grava y canales aluviales en régimen.....	29
Gráfica 3. Gráfico del parámetro de Shields τ^* en función del caudal adimensional Q^* para ríos de llanura y de montaña.....	30
Gráfica 4. Relación adimensional ancho-caudal.	31
Gráfica 5. Relación Ancho-Caudal para un grupo de experimentos con microcanales de laboratorio ($r^2 = 0.98$).....	32
Gráfica 6. Borde libre – Caudal vs profundidad hidráulica	61
Gráfica 7. Peso específico del agua Vs temperatura	76
Gráfica 8. Relación de caudales TR100 años Vs TR2.33 años $S_x=Q$	77
Gráfica 9. Relación de caudales TR100 años Vs TR2.33 años $S_x=2Q$	77
Gráfica 10. Gráfica desviación estándar.....	78
Gráfica 11. Banda de confianza desviación estándar	79
Gráfica 12. Curvas ancho canal (dominante y valle) Vs Caudal TR 100 años $H=1m$	91
Gráfica 13. Curvas ancho canal (dominante y valle) Vs Caudal TR 100 años $H=1.5m$	92
Gráfica 14. Curvas ancho canal (dominante y valle) Vs Caudal TR 100 años $H=2m$	93
Gráfica 15. Esfuerzo tractivo permisible de canales de material grueso no cohesivo (tamaño 25% o mayor)	97
Gráfica 16. Perfil longitudinal de flujo TR 2.33 años - primer canal.....	139
Gráfica 17. Perfil longitudinal de flujo TR 100 años - primer canal.....	140
Gráfica 18. Bordos libres - primer canal	141
Gráfica 19. Profundidad hidráulica - primer canal	141
Gráfica 20. Cota de lámina de agua - primer canal.....	142
Gráfica 21. Velocidad - primer canal.....	143
Gráfica 22. Esfuerzo cortante - primer canal	143
Gráfica 23. Potencia de la corriente - primer canal	144
Gráfica 24. Perfil longitudinal de flujo TR 2.33 años - segundo canal	154
Gráfica 25. Perfil longitudinal de flujo TR 100 años – segundo canal.....	155
Gráfica 26. Bordos libres - segundo canal.....	155
Gráfica 27. Profundidad hidráulica - segundo canal.....	156
Gráfica 28. Cota de lámina de agua - segundo canal	157
Gráfica 29. Velocidad - segundo canal	157
Gráfica 30. Esfuerzo cortante - segundo canal	158
Gráfica 31. Potencia de la corriente - segundo canal.....	158
Gráfica 32. Perfil longitudinal de flujo TR 2.33 años - tercer canal.....	167
Gráfica 33. Perfil longitudinal de flujo TR 100 años - tercer canal	167
Gráfica 34. Bordos libres - tercer canal	168

Gráfica 35. Profundidad hidráulica - tercer canal	168
Gráfica 36. Cota de lámina de agua - tercer canal.....	169
Gráfica 37. Velocidad - tercer canal.....	169
Gráfica 38. Esfuerzo cortante - tercer canal.....	170
Gráfica 39. Potencia de la corriente - tercer canal	170

Índice de figuras

Figura 1. Esquema de definición para la geometría hidráulica de cauces aluviales	28
Figura 2. Sección transversal y perfil longitudinal de un cauce aluvial estable.	34
Figura 3. Flujo en conducto abierto (canales)	36
Figura 4. Sección transversal irregular	37
Figura 5. Secciones artificiales transversales tipos.	38
Figura 6. Elementos geométricos más importantes.	39
Figura 7. Flujo uniforme permanente.	44
Figura 8. Flujo Uniforme no permanente	44
Figura 9. Flujo Rápidamente Variado.	45
Figura 10. Flujo Gradualmente Variado.	46
Figura 11. Canal compuesto por una sección principal y dos secciones laterales.	46
Figura 12. Sección compuesta canal artificial	47
Figura 13. Sección compuesta canal natural.	47
Figura 14. Canal de sección compuesta.	48
Figura 15. Ejemplos característicos de rugosidad compuesta.	49
Figura 16. Distribución de la fuerza tractivas o tangencial sobre las paredes de un canal trapezoidal.	51
Figura 17. Esfuerzo tangencial que la corriente produce sobre los taludes del canal de tierra.	52
Figura 18. Esfuerzo tangencial que la corriente produce en el fondo del canal de tierra.	52
Figura 19. Análisis de las fuerzas que actúan en una partícula que reposa en la superficie del lecho de un canal.	53
Figura 20. Angulo de reposo de un suelo no cohesivo en función del diámetro de sus partículas	55
Figura 21. Esfuerzo tangencial crítico necesario para erosionar un suelo cohesivo.	57
Figura 22. Esfuerzo tangencial crítico necesario para mover las partículas de un suelo no cohesivo que se encuentran en un fondo plano.	58
Figura 23. Fuerzas tractivas unitarias permisibles recomendadas para canales en materiales no cohesivos.	59
Figura 24. Geometría de las ondas sinuosas	62
Figura 25. Coalineación de taludes en zonas de curvas.	65
Figura 26. Principales variables de los cauces aluviales	66
Figura 27. Sinuosidad de cauces aluviales	67
Figura 28. Representación esquemática de las formas del lecho menores en cauces aluviales	68
Figura 29. Interrelación de variables en un sistema aluvial	69
Figura 30. Esquema para la descripción general propuesto por Rosgen (1994).	74
Figura 31. Diagrama de flujo hoja de diseño	82
Figura 32 Botones de cálculo de la hoja de diseño	87

Figura 33 Definición de puntos “code” para la sección del valle	102
Figura 34 Trazado sinuoso primer canal – AutoCAD Civil 3D	104
Figura 35 Trazado sinuoso primer canal – ArcGIS	105
Figura 36 Trazado sinuoso segundo canal – AutoCAD Civil 3D.....	105
Figura 37 Trazado sinuoso segundo canal – ArcGIS.....	106
Figura 38 Trazado sinuoso tercer canal – AutoCAD Civil 3D	106
Figura 39 Trazado sinuoso tercer canal – ArcGIS.....	107
Figura 40. Sección transversal primer canal	109
Figura 41. Sección transversal primer canal aguas arriba – flujo uniforme	109
Figura 42. Sección transversal primer canal aguas abajo – flujo uniforme	110
Figura 43. Resultados primer canal – flujo uniforme	110
Figura 44. Sección transversal canal dominante primer canal – fuerza tractiva	111
Figura 45. Sección transversal canal dominante primer canal – fuerza tractiva (ajuste) .	112
Figura 46. Sección transversal canal valle primer canal – fuerza tractiva	113
Figura 47. Sección transversal segundo canal.....	114
Figura 48. Sección transversal segundo canal aguas arriba – flujo uniforme	115
Figura 49. Sección transversal segundo canal aguas abajo – flujo uniforme.....	115
Figura 50. Resultados segundo canal – flujo uniforme	115
Figura 51. Sección transversal canal dominante segundo canal – fuerza tractiva.....	117
Figura 52. Sección transversal canal valle segundo canal – fuerza tractiva	117
Figura 53. Sección transversal tercer canal	118
Figura 54. Sección transversal tercer canal aguas arriba – flujo uniforme	119
Figura 55. Sección transversal tercer canal aguas abajo – flujo uniforme	119
Figura 56. Resultados tercer canal – flujo uniforme	120
Figura 57. Sección transversal canal dominante tercer canal – fuerza tractiva	121
Figura 58. Sección transversal canal valle tercer canal – fuerza tractiva	121
Figura 59. Modelo de terreno exportado a HECRAS primer canal	128
Figura 60. Manchas de las secciones transversales del primer canal – TR 2.33 años....	128
Figura 61. Manchas de las secciones transversales del primer canal – TR 100 años.....	129
Figura 62. Sección transversal dominante cargado al talud izquierdo - primer canal	129
Figura 63. Sección transversal dominante centrado - primer canal.....	130
Figura 64. Sección transversal dominante cargado al talud derecho - primer canal.....	130
Figura 65. Perspectiva modelación hidráulica - primer canal.....	131
Figura 66. Modelo de terreno exportado a HECRAS segundo canal	132
Figura 67. Manchas de las secciones transversales del segundo canal – TR 2.33 años	132
Figura 68. Manchas de las secciones transversales del segundo canal – TR 100 años.	133
Figura 69. Sección transversal dominante cargado al talud izquierdo - segundo canal ..	133
Figura 70. Sección transversal dominante centrado - segundo canal	134
Figura 71. Sección transversal dominante cargado al talud derecho - segundo canal	134
Figura 72. Perspectiva modelación hidráulica - segundo canal	135
Figura 73. Modelo de terreno exportado a HECRAS tercer canal	135
Figura 74. Manchas de las secciones transversales del tercer canal – TR 2.33 años.....	136

Figura 75. Manchas de las secciones transversales del tercer canal – TR 100 años.....	136
Figura 76. Sección transversal dominante cargado al talud izquierdo - tercer canal	137
Figura 77. Sección transversal dominante centrado - tercer canal.....	137
Figura 78. Sección transversal dominante cargado al talud derecho - tercer canal.....	138
Figura 79. Perspectiva modelación hidráulica - tercer canal.....	138
Figura 80. Profundidades hidráulicas RAS Mapper TR 2.33 años - primer canal	145
Figura 81. Profundidades hidráulicas RAS Mapper TR 100 años - primer canal	146
Figura 82. Fuerza tractiva RAS Mapper TR 2.33 años - primer canal.....	146
Figura 83. Fuerza tractiva RAS Mapper TR 100 años - primer canal.....	147
Figura 84. Velocidad RAS Mapper TR 2.33 años - primer canal	147
Figura 85. Velocidad RAS Mapper TR 100 años - primer canal	148
Figura 86. Potencia de la corriente RAS Mapper TR 2.33 años - primer canal.....	148
Figura 87. Potencia de la corriente RAS Mapper TR 100 años - primer canal.....	149
Figura 88. Profundidades hidráulicas RAS Mapper TR 2.33 años - segundo canal	159
Figura 89. Profundidades hidráulicas RAS Mapper TR 100 años - segundo canal	160
Figura 90. Fuerza tractiva RAS Mapper TR 2.33 años - segundo canal	160
Figura 91. Fuerza tractiva RAS Mapper TR 100 años - segundo canal	161
Figura 92. Velocidad RAS Mapper TR 2.33 años - segundo canal	161
Figura 93. Velocidad RAS Mapper TR 100 años - segundo canal	162
Figura 94. Potencia de la corriente RAS Mapper TR 2.33 años - segundo canal	162
Figura 95. Potencia de la corriente RAS Mapper TR 100 años - segundo canal	163
Figura 96. Profundidades hidráulicas RAS Mapper TR 2.33 años - tercer canal.....	171
Figura 97. Profundidades hidráulicas RAS Mapper TR 100 años - tercer canal.....	172
Figura 98. Fuerza tractiva RAS Mapper TR 2.33 años - tercer canal.....	172
Figura 99. Fuerza tractiva RAS Mapper TR 100 años - tercer canal.....	173
Figura 100. Velocidad RAS Mapper TR 2.33 años - tercer canal	173
Figura 101. Velocidad RAS Mapper TR 100 años - tercer canal	174
Figura 102. Potencia de la corriente RAS Mapper TR 2.33 años - tercer canal.....	174
Figura 103. Potencia de la corriente RAS Mapper TR 100 años - tercer canal.....	175

Anexos

Anexo 1. Cálculo de caudal TR 2.33 años por la distribución de Gumbel ($S_x = Q$)	184
Anexo 2. Cálculo de caudal TR 2.33 años por la distribución Normal ($S_x = Q$)	185
Anexo 3. Cálculo de caudal TR 2.33 años por la distribución Log Normal ($S_x = Q$)	186
Anexo 4. Cálculo de caudal TR 2.33 años por la distribución Gumbel (GEV Tipo I) ($S_x = Q$)	187
Anexo 5. Cálculo de caudal TR 2.33 años por la distribución de Gumbel ($S_x = 2Q$)	188
Anexo 6. Cálculo de caudal TR 2.33 años por la distribución Normal ($S_x = 2Q$)	189
Anexo 7. Cálculo de caudal TR 2.33 años por la distribución Log Normal ($S_x = 2Q$)	190
Anexo 8. Cálculo de caudal TR 2.33 años por la distribución Gumbel (GEV Tipo I) ($S_x = 2Q$)	191
Anexo 9. Cálculo de caudal TR 2.33 años por la distribución Pearson tipo III ($S_x = 2Q$)	192
Anexo 10. Análisis de caudales máximos – Estación Puente Adobe (Río Bogotá)	193
Anexo 11. Prueba de Chi Cuadrado – Estación Puente Adobe (Río Bogotá)	194
Anexo 12. Frecuencia de caudales máximos – Estación Puente Adobe (Río Bogotá)	195
Anexo 13. Análisis de caudales máximos – Estación Puente Virginia (Río Frío)	196
Anexo 14. Prueba de Chi Cuadrado – Estación Puente Virginia (Río Frío)	197
Anexo 15. Frecuencia de caudales máximos – Estación Puente Virginia (Río Frío)	198

Anexos digitales

1. Documento final: Se presenta todo el desarrollo del presente proyecto de grado, partiendo de lo aprobado en el protocolo inicial.
2. Hojas de diseño
 - 2.1. Hoja de diseño tesis: En esta hoja de diseño se encuentra el diagrama de flujo de cálculo, el cálculo de las curvas de caracterización para cada uno de los canales, el diseño geométrico y la verificación del cálculo del flujo uniforme de cada canal.
3. Hojas de cálculo
 - 3.1. Hojas de cálculo de ajustes de caudales máximos: Se encuentran anexos dos archivos de los cálculos hidrológicos para la determinación y análisis de caudales máximos en una estación limnimétrica del río Bogotá y del río frío, esto con el fin de tomar datos de referencia para determinar la proporción del caudal a un periodo de retorno de 2.33 años, teniendo en cuenta un caudal a un periodo de retorno de 100 años.
 - 3.2. Hoja de cálculo TR 2.33 años_V4: En esta hoja se desarrollan los cálculos de análisis de frecuencias para caudales máximos a un periodo de retorno de 100 años, con el fin de determinar con diferentes distribuciones el caudal a un periodo de retorno de 2.33 años.
4. Diseño de canales sinuosos: Se anexan los diseños de los tres canales sinuosos que se desarrollan en el presente proyecto de grado. La siguiente estructura de archivos se presenta para cada canal:
 - 4.1. ACAD: Se encuentran todos los archivos del diseño geométrico generados en Autocad Civil 3D.
 - 4.2. GIS: Se encuentran todos los archivos del modelo del terreno TIN en ArcGIS.
 - 4.3. RAS: Se anexan todos los archivos de la modelación hidráulica y mapificación en HEC-RAS y RASMapper.
 - 4.4. Resultados y verificación: Se encuentran las tablas de resultados de la modelación hidráulica y verificación de acuerdo a los valores de referencia definidos.

Introducción

Para la caracterización y diseño de cauces aluviales, es importante contar con elementos teóricos y prácticos que permitan conocer las principales variables de los cauces aluviales y su interacción, tanto morfológicas, hidráulicas, geométricas y topográficas, a utilizar en una perspectiva aplicada a quienes en el futuro se desenvuelvan profesionalmente en los campos de la hidráulica e ingeniería fluvial.

Es por lo anterior, que con el presente trabajo de grado se elaboran herramientas para caracterización y diseño de cauces aluviales, por medio de la construcción de fichas técnicas de diseño que permitan establecer su geometría característica en planta y perfil, que cumplan con ciertas restricciones de diseño.

Así por ejemplo será necesario considerar la longitud y pendiente del valle, la altura máxima disponible para la construcción del canal, material característico del lecho, un periodo de retorno, caudales de modelación, tipo de canal, secciones transversales compuestas con diferentes profundidades y una condición de flujo.

Por otro lado, en el presente trabajo se desarrollan diferentes contenidos en cada capítulo. El primer capítulo contempla el marco teórico que establece el estado del arte y el marco conceptual. De igual forma, en el segundo capítulo se relacionan las variables y parámetros que intervienen en el diseño de cauces aluviales y de las curvas de caracterización. Así mismo, en el tercer capítulo se describe el procedimiento de elaboración de las hojas de diseño y de las fichas técnicas. En el cuarto capítulo se incluye el diseño geométrico y sinuoso de los canales diseñados. Igualmente en el quinto capítulo se desarrollan las modelaciones hidráulicas de verificación de las secciones de los canales diseñados.

Finalmente, el desarrollo del presente trabajo de grado, permitirá entregarle a los diseñadores de canales aluviales y sinuosos, herramientas de caracterización y diseño, con el fin de aumentar la eficiencia y practicidad en los proyectos de diseño que se desarrollen en los campos de la hidráulica e ingeniería fluvial, y de otras áreas afines donde los sistemas fluviales sean los escenarios bajo estudio.

Capítulo I

Marco teórico

1.1 Estado del Arte

Para la realización del trabajo de grado, es indispensable conocer las bases teóricas y fundamentos sobre cauces aluviales y herramientas desarrolladas para su caracterización y diseño.

A continuación, se presenta una síntesis de cada una de las investigaciones o trabajos encontrados en donde se relaciona el desarrollo de herramientas para el diseño y caracterización de cauces aluviales:

1.1.1 Fórmulas prácticas para el diseño de canales sin revestir en terrenos aluviales.

En este artículo desarrollado por Héctor Daniel Farias del Instituto de Recursos Hídricos. Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías, Universidad Nacional de Santiago del Estero (Argentina), se presentan tres conjuntos de fórmulas prácticas, con una base racional, para el diseño de canales sin revestir excavados en terrenos aluviales finos.

Las ecuaciones, del tipo "régimen", permiten estimar la geometría hidráulica de canales arenosos en equilibrio dinámico. Los grupos de fórmulas se obtienen mediante la combinación de funciones de resistencia al flujo, transporte de sedimentos y estabilidad de márgenes. La capacidad predictiva de las mismas se evalúa empleando una importante base de datos que cubre los rangos típicos de variación de las variables involucradas en el diseño. Se demuestra que los errores que se obtienen aplicando estas fórmulas como herramientas de diseño se encuentran dentro de las márgenes de tolerancia típicas de la dinámica fluvial. Asimismo, se presenta una serie de ejemplos prácticos que ilustran la aplicabilidad de la metodología propuesta en el diseño de canales arenosos de envergadura diversa. (Artículo Héctor Daniel Parias, septiembre de 1995, p. 58)

1.1.4.1 Fórmulas de diseño.

Uno de los objetivos principales del estudio de Farias (1995) es el de presentar ecuaciones de diseño para canales arenosos en régimen que sirvan como herramientas prácticas, pero con una base conceptual sólida. Por ello, se adoptaron relaciones de fricción y transporte que a la fecha parecen tener un nivel razonable de aceptación, debido a su calibración con gran cantidad de datos y a su comportamiento aceptable cuando se comparan sus predicciones con valores observados en canales existentes (Chítale, 1966; Smith, 1971; Brownlie, 1981; Bakker y Vermaas, 1986). En la Tabla 1 se presentan, codificadas de acuerdo a los autores de las funciones fundamentales respectivas, las relaciones de fricción, transporte y estabilidad lateral, así como también las ecuaciones racionales de régimen obtenidas en un formato generalizado, tal como el siguiente (Artículo Héctor Daniel Parias, septiembre de 1995, p. 58):

$$P = x_0 d^{x_1} C_s^{x_2} Q^{x_3} \quad (1)$$

$$R = y_0 d^{y_1} C_s^{y_2} Q^{y_3} \quad (2)$$

$$S = z_0 d^{z_1} C_s^{z_2} Q^{z_3} \quad (3)$$

Tabla 1. Fórmulas obtenidas para el diseño de canales aluviales en régimen.

CÓDIGO	PROCESO	AUTOR	ECUACIONES USADAS	ECUACIONES DE RÉGIMEN
BBC	Fricción Transporte Estabilidad Lat.	Brownlie Brownlie Chitale	$V = 13.29d^{-0.029}R^{0.529}S^{0.389}$ $q_s = 1.535x10^{00}d^{-3.774}R^{0.632}S^{0.758}$ $P = 6.592d^{0.115}Q^{0.414}R^{0.209}S^{-0.097}$	$P = 2.70d^{0.033}C_s^{-0.080}Q^{0.514}$ $R = 0.049d^{-0.140}C_s^{-0.102}Q^{0.375}$ $S = 14.645d^{0.541}C_s^{0.605}Q^{-0.224}$
KKM	Fricción Transporte Estabilidad Lat.	Karim- Kennedy Karim- Kennedy Mao-Flook (Farias)	$V = 18.19d^{-0.103}R^{0.603}S^{0.515}$ $q_s = 9.74x10^{-5}d^{-0.682}V^{3.334}R^{0.623}S^{0.625}$ $P = 7.42Q^{0.229}R$	$P = 0.664d^{-0.066}C_s^{-0.120}Q^{0.562}$ $R = 0.089d^{-0.065}C_s^{-0.120}Q^{0.333}$ $S = 16.04d^{0.555}C_s^{0.630}Q^{-0.192}$
PLG	Fricción Transporte Estabilidad Lat.	Pavlovsky- Lacey Levi (Modif.) Glushkov (Modif.)	$V = 17.81d^{-0.133}R^{0.736}S^{0.389}$ $q_s = 4.88x10^{-7}d^{-0.774}V^{5.495}R^{-0.499}$ $P = 16.12R^{1.428}$	$P = 0.710d^{-0.089}C_s^{-0.115}Q^{0.519}$ $R = 0.112d^{-0.063}C_s^{0.081}Q^{-0.363}$ $S = 11.498d^{0.643}C_s^{0.497}Q^{-0.292}$

Tomado de: Artículo Héctor Daniel Parias, septiembre de 1995, p. 58.

Donde las constantes x_j , y_j , z_j ($j = 0,1,2,3$) resultan de la combinación algebraica de las constantes que aparecen en las funciones fundamentales, luego de aplicar las ecuaciones de continuidad en el flujo líquido y transporte sólido.

Para el proyecto completo de un canal estas ecuaciones deben complementarse con las siguientes, obtenidas de relaciones geométricas elementales para canales de sección transversal trapecial:

$$A = PR \quad (4)$$

$$k_z = 2\sqrt{1 + z^2} \quad (5)$$

$$H = \frac{P - \sqrt{P^2 - 4(k_z - z)A}}{2(k_z - z)} \quad (6)$$

$$B = \frac{A - zH^2}{H} \quad (7)$$

En relación con la pendiente transversal de los taludes (z), la misma puede estimarse teniendo en cuenta las características físicas y mecánicas del suelo en el que se excava el canal (Chow, 1959). Sin embargo, en un estudio sobre la forma de la sección transversal en canales arenosos en régimen (Parias, 1993, a,b,c), se ha encontrado una ecuación que permite estimar z en función de parámetros adimensionales característicos del flujo y del sedimento, a saber (Artículo Héctor Daniel Parias, septiembre de 1995, p. 58):

$$Z = 0.022d^{0.368}Q^{0.161} \quad (8)$$

$$Q_* = Q/(g^{1/2}D^{1/2}d^{5/2}) \text{ y } d_* = [(gD/n^2)^{1/3}d] \quad (9)$$

1.1.2 Geometría hidráulica de ríos de llanura. Enfoques analíticos considerando la influencia de las márgenes.

En este artículo desarrollado por Héctor Daniel Farias del Instituto de Recursos Hídricos. Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías, Universidad Nacional de Santiago del Estero (Argentina), se presenta una revisión del concepto de geometría hidráulica para cauces aluviales y se discuten los métodos analíticos para su predicción. En particular, luego de observar el comportamiento de datos de campo y laboratorio, se analiza el criterio basado en la minimización de la potencia del flujo o maximización de la capacidad de transporte de sedimentos. Posteriormente, se estudia la incidencia del material constitutivo de las márgenes y su resistencia sobre la geometría hidráulica. Finalmente, se presentan ecuaciones de régimen basadas en criterios de optimización (principio MCTS) y se evalúa su desempeño frente a datos de campo, identificándose algunos puntos que merecen ser investigados en el futuro. (Artículo Héctor Daniel Farias, noviembre de 2005, p. 1).

1.1.2.1 Geometría hidráulica de ríos.

La geometría hidráulica de un tramo de río (Figura 1) habitualmente se expresa a través de un conjunto de ecuaciones que describen de manera global la forma y tamaño del cauce representados a través del ancho B y profundidad H de la sección transversal y la pendiente longitudinal S , asumidas como variables dependientes) en función del caudal dominante Q . Es decir: $B, H, S = f_{B, H, S}(Q)$. Estas tres funciones habitualmente se presentan en forma potencial:

$$B = a_0 * Q^{a_1} \quad (10)$$

$$H = b_0 * Q^{b_1} \quad (11)$$

$$S = c_0 * Q^{c_1} \quad (12)$$

Donde a_i , b_i , c_i son coeficientes y exponentes ($i=1,2$) inicialmente obtenidos de forma empírica pero luego validados a través de criterios analíticos. A pesar de la gran complejidad implícita en los procesos morfológicos que determinan las dimensiones de régimen, los exponentes de las relaciones anteriores varían entre rangos relativamente estrechos para el caso de cauces de llanura ($0.46 < a_1 < 0.53$; $0.3 < b_1 < 0.4$; $-0.25 < c_1 < -0.15$, aprox.).

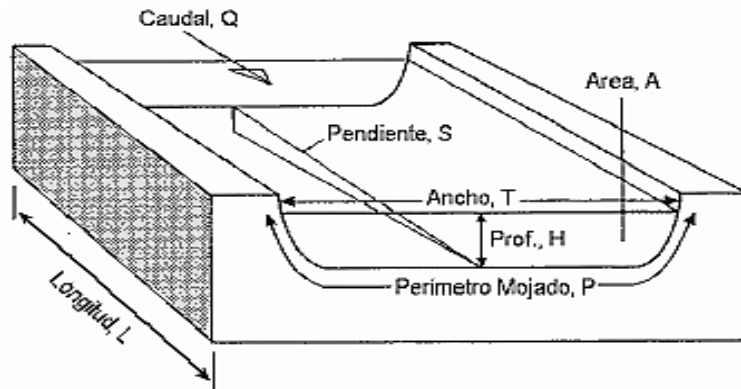
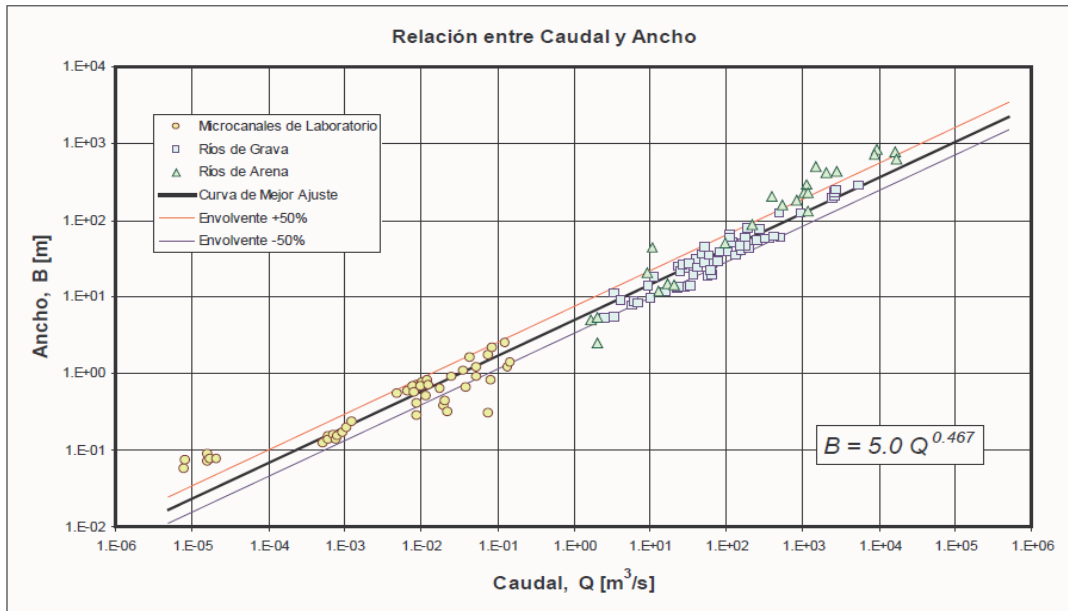


Figura 1. Esquema de definición para la geometría hidráulica de cauces aluviales

Tomado de: RIOS 2005: Principios y Aplicaciones en Hidráulica de Ríos.

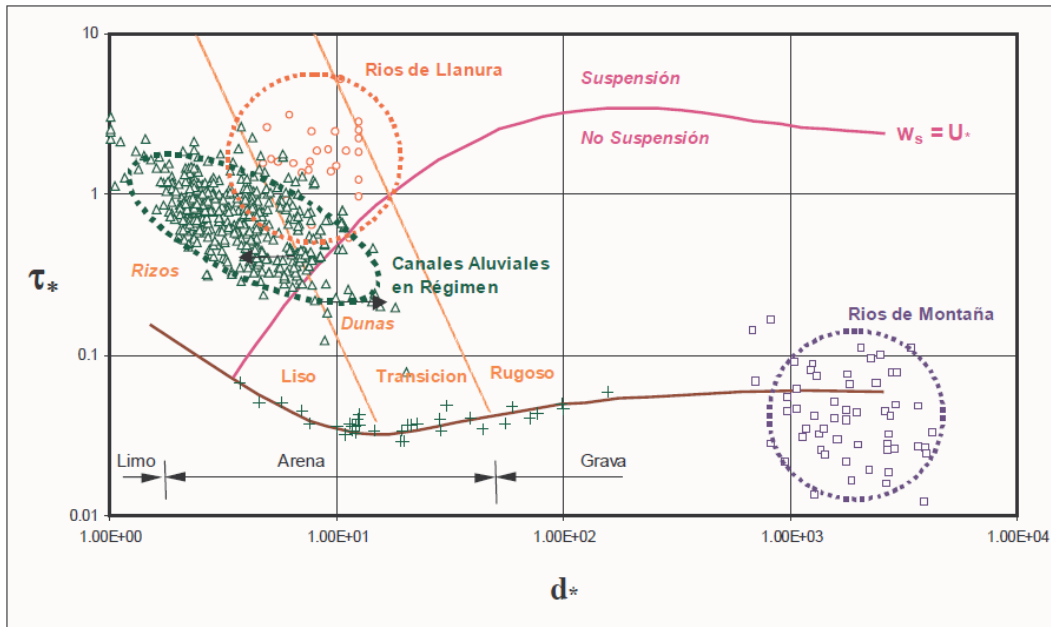
Para ilustrar este comportamiento, en la Gráfica 1 se presenta la relación observada entre el caudal dominante y el ancho de régimen, cubriendo 10 órdenes de magnitud para el caudal y 5 para el ancho. Los datos incluyen desde microcanales de laboratorio (Armstrong y Metivier, 2003) hasta grandes ríos de llanura (Parker, 2004). Un aspecto interesante que puede observarse en la Gráfica 1 es que no obstante la aceptable correlación global, una ecuación en función solamente del caudal no es suficiente para explicar el comportamiento de los datos en todo el rango (se pueden observar subestimaciones para los micro-canales y para los grandes ríos, lo cual estaría indicando que a_0 no necesariamente es constante (suponiendo que a_1 si lo es), sino que depende de otras magnitudes.

Además, si se tiene en cuenta el valor del parámetro de Shields característico asociado a las condiciones impuestas por el caudal dominante, se observa que tanto los ríos de llanura (generalmente de lechos arenosos y márgenes arenosas-limosas o cohesivas) como los ríos con lecho de grava ocupan regiones bien diferenciadas del Diagrama de Shields generalizado, el cual ha sido adaptado a partir del propuesto por García (2000) y se presenta en la Gráfica 2. En la misma puede observarse además, que los canales aluviales en régimen (se han planteado datos correspondientes a un total de 496 de ellos) ocupan una zona de transición más cercana a los ríos de llanura y en algunas sub-zonas (e.g., transición rizados-dunas) superpuestos con aquellos. (Farias, et al., 2005).



Gráfica 1. Relación entre ancho de régimen y caudal dominante.

Tomado de: RIOS 2005: Principios y Aplicaciones en Hidráulica de Ríos.

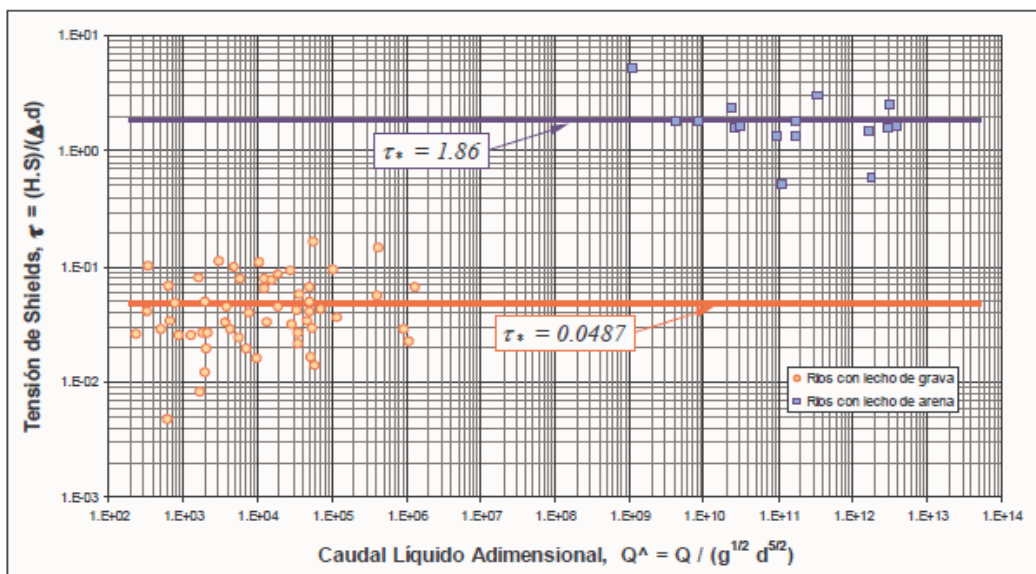


Gráfica 2. Diagrama de Shields generalizado (adaptado de García, 2000) en el que se indican las regiones características correspondientes a ríos de llanura, ríos con lecho de grava y canales aluviales en régimen.

Tomado de: RIOS 2005: Principios y Aplicaciones en Hidráulica de Ríos.

Ante la dispersión observada, algunos autores (e.g., Parker, 2004) han sugerido la idea de formular relaciones aproximadas para la geometría hidráulica de cauces usando como condición de cierre para la tercera ecuación necesaria la de constancia del parámetro de Shields (τ^*).

En la Gráfica 3 se presenta un gráfico (propuesto por Parker) que expresa la tensión de Shields en función de un caudal adimensional ($Q^A = Q/\Delta^{0.5}$) y los valores aproximadamente constantes de τ^* para los dos agrupamientos de datos observados.



Gráfica 3. Gráfico del parámetro de Shields τ^* en función del caudal adimensional Q^A para ríos de llanura y de montaña

Tomado de: RIOS 2005: Principios y Aplicaciones en Hidráulica de Ríos.

Un criterio similar al indicado previamente (es decir, $\tau^* = \tau_0 = \text{constante}$) ha sido usado por Julien (2002) para desarrollar sus ecuaciones de geometría hidráulica, las que se presentan en la forma:

$$X = k_0 * d^{k_1} * \tau_*^{k_2} * Q^{k_3} \quad (13)$$

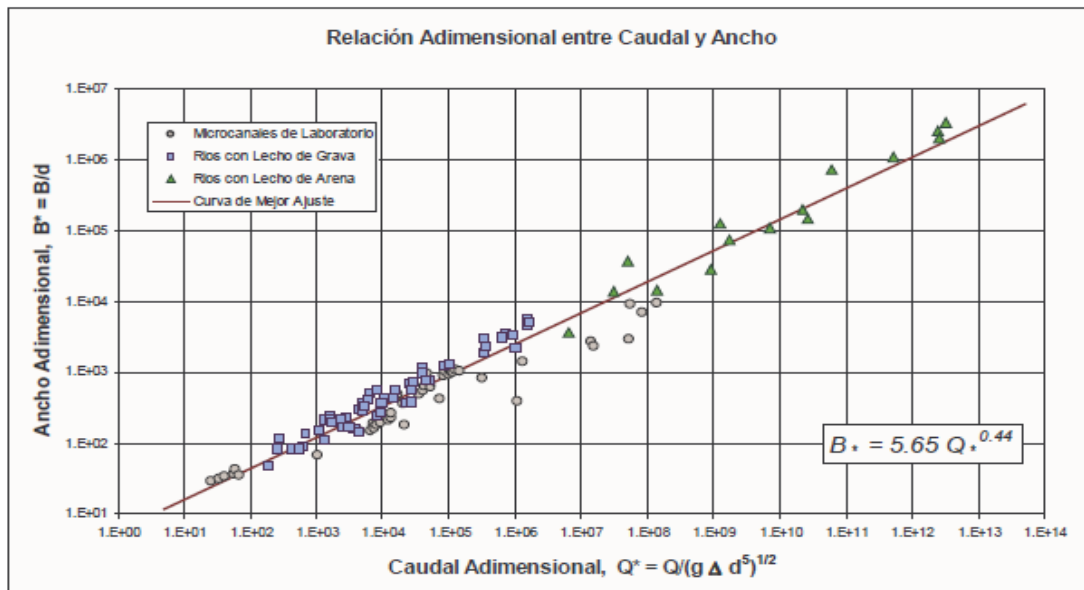
Donde X es una variable genérica representativa de la geometría hidráulica, es decir: $X = \{B, H, S\}$, y los exponentes k_i ($i = 1, 2, 3$) son funciones algebraicas de m_r , designándose como tal al exponente de una función de resistencia del tipo Einstein & Chien,

$$V = a * g^{0.5} * (H/d)^{m_r} * H^{0.5} * S^{0.5} \quad (14)$$

Los coeficientes k_0 fueron calibrados por Julien usando una extensa base de datos de ríos tanto arenosos como con lecho de grava.

Si se analizan en detalle las metodologías tanto de Parker (2004) como de Julien (2002) se encuentra que la condición $[\tau_* = \tau_*0 = \text{constante}]$ conduce irremediablemente a una igualdad en los valores absolutos de los exponentes del caudal en las ecuaciones de geometría hidráulica para la profundidad y la pendiente, pero con signo opuesto. Es decir, teniendo en cuenta las ecuaciones 1, se tendría: $b_1 = -c_1$. Esta condición se verifica experimentalmente en forma aproximada en los ríos con lecho de grava, pero así en los cauces arenosos en los como regla general el valor absoluto de b_1 es del orden del doble en relación al de b_2 (Farias, 1993, a).

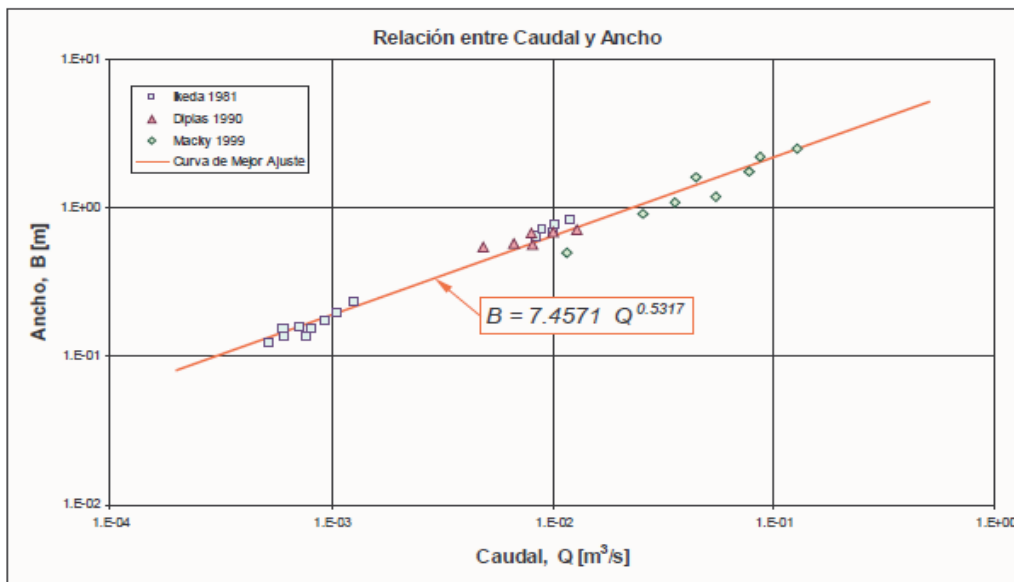
En la Gráfica 4 se presenta la relación adimensional entre ancho y caudal, con lo que la correlación mejora indicando la importancia de considerar el tamaño del sedimento en este caso.



Gráfica 4. Relación adimensional ancho-caudal.

Tomado de: RIOS 2005: Principios y Aplicaciones en Hidráulica de Ríos.

En la Gráfica 4 se presenta la relación del ancho en función del caudal dominante para tres conjuntos de datos de canales de laboratorio (Ikeda, Diplas y Macky), en el que puede observarse con claridad que estos cauces tienden a ser más anchos que la generalidad de cauces cubriendo todo el rango y, aunque el exponente del caudal se sigue situando alrededor del valor 0.5 (como en la gran mayoría de los casos), el coeficiente en este caso resulta mayor que el valor medio. (Artículo Héctor Daniel Parías, noviembre de 2005, p. 5)



Gráfica 5. Relación Ancho-Caudal para un grupo de experimentos con microcanales de laboratorio ($r^2 = 0.98$)

Tomado de: RIOS 2005: Principios y Aplicaciones en Hidráulica de Ríos.

1.1.3 Modelación hidráulica y morfodinámica de cauces sinuosos aplicación a la Quebrada La Marinilla (Ant).

En este trabajo se analizan los procesos de erosión y sedimentación en cauces aluviales tomando como caso de estudio tres tramos del cauce de la quebrada La Marinilla para conocer su movilidad, condicionada por la intervención antrópica y las fluctuaciones del nivel base (río Negro). Esta movilidad es evaluada en diferentes escenarios en un periodo de 17 años y a través del modelo numérico CCHE2D el cual permite simular los procesos de agradación y degradación del canal y los cambios morfológicos del mismo. Además, se

utilizó el modelo RVR Meander desarrollado por Abad y García (2006) para caracterizar y analizar la migración de meandros, lo que permite conocer la tasa de desplazamiento longitudinal del canal, entre otros parámetros. Como complemento se utilizaron fotografías aéreas de varias épocas para conocer la evolución (desplazamiento lateral) del canal en el tiempo. De acuerdo a los resultados, las estructuras de puentes implementadas sobre el cauce de la quebrada La Marinilla y las fluctuaciones del nivel en el río negro pueden modificar y limitar la movilidad del canal en el tiempo. (Trabajo de grado Julian David Ceballos, Octubre 2011, p. 4)

1.1.4 Formulación racional de la relación ancho-profundidad para cauces aluviales estables.

Existen varias ecuaciones morfológicas para establecer la relación entre el ancho y la profundidad en un cauce aluvial estable. La mayoría de las mismas tienen una base empírica, y a la fecha no se ha conseguido poder encontrar fundamentos teóricos sólidos que justifiquen tanto su forma matemática como los valores de los parámetros involucrados. En este trabajo se presentan varias alternativas para encontrar un fundamento racional a la formulación de la razón de aspecto de un cauce aluvial en una condición de equilibrio dinámico. Los enfoques explorados para esa finalidad son: (a) La clásica Teoría del Régimen de Lindley y Lacey; (b) A partir del principio de semejanza geométrica y cinemática para un cauce aluvial; (c) Aplicación de conceptos de potencia del flujo e igualdad de probabilidades de ocurrencia de los procesos fluviales en un cauce estable. Asimismo, se presenta una evidencia empírica basada en el análisis de datos de campo y laboratorio que sustenta la validez y aplicabilidad práctica de esta interesante formulación para la estabilidad lateral de un cauce aluvial en régimen. (Artículo Hector Daniel Parias, 2000, p. 1)

1.1.4.1 Planteamiento general.

En el contexto del presente estudio, se analizan las condiciones de estabilidad de cauces aluviales en equilibrio dinámico o régimen. Los cauces a tratar se supone que conducen el caudal dominante (o formativo) y presentan una geometría cuasi-prismática, un trazado longitudinal aproximadamente rectilíneo, pendientes suaves, contornos constituidos por

material granular uniforme no-cohesivo, transporte activo de material sólido tanto como carga de fondo y suspensión, y secciones transversales "anchas", es decir, con razones de aspecto grandes. En este último punto conviene efectuar algunas aclaraciones. Considerando el esquema de la Fig. 1, el área transversal de la sección puede calcularse como: $A=P.R$, donde P es el perímetro mojado y R el radio hidráulico. Sin embargo, si se define la razón de aspecto como $G=T/H$ (donde T es el ancho superficial y H la profundidad central), cuando esta cantidad alcanza valores grandes (que por otro lado es el caso general en cauces naturales) se tiene que: $R \gg H$ y $P \gg T \gg B$, siendo B el ancho de fondo (Figura 2). Los cauces considerados en este estudio son aquellos de sección transversal ancha, es decir, las variables geométricas transversales a considerar son B y H . No obstante, siempre se pueden introducir factores de forma (que son funciones de G y otros parámetros geométricos de la sección) para analizar los casos en que las hipótesis $R \gg H$ y $P \gg B$ carezcan de validez. (Artículo Hector Daniel Parias, 2000, p. 2)

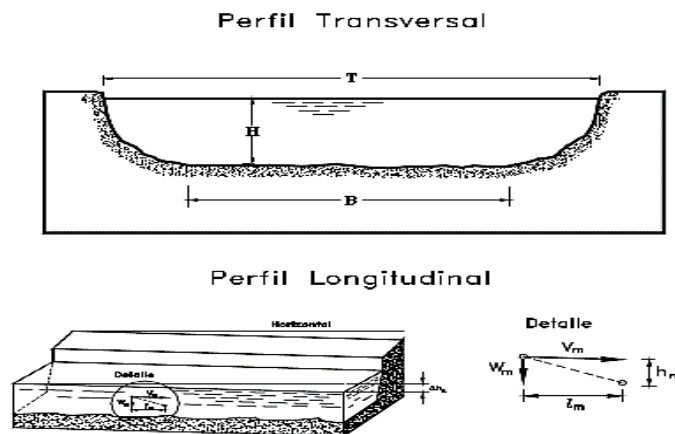


Figura 2. Sección transversal y perfil longitudinal de un cauce aluvial estable.

Tomado de: Formulación racional de la relación ancho-profundidad para cauces aluviales estables

1.1.4.2 Razón de aspecto de un cauce aluvial.

Luego de un estudio de antecedentes sobre el tópico, se llegó a establecer que la Fórmula de V. G. Glushkov fue publicada por primera vez en Leningrado (actualmente San Petersburgo), Rusia, en el año 1925 (Debolsky y Shishova, 1991), en un artículo denominado "Morfología de un Cauce Fluvial". La versión inicial de esta fórmula se escribía como:

$$B^{1/2}/H = K_{G_0} \quad (15)$$

Donde el coeficiente K_{G_0} cubre un rango de valores de 1 a 18 (para el caso de unidades SI, es decir, B y H en metros), y posee un valor promedio de 2.75, con valores típicos de 1.4 para lechos rocosos y 6.5 para cauces arenosos altamente erosionables (Debolsky y Shishova et al., 1991).

Posteriormente, en 1958, Altunin presentó una versión modificada de la Ec. 1 (Debolsky y Shishova et al., 1991; Maza y García, 1996), introduciendo el formato más general:

$$B^m = K_G H \quad (16)$$

Donde el exponente m varía entre 0.5 y 1.0 (los valores más bajos corresponden a cauces de llanura, mientras que los altos se recomiendan para ríos de montaña). Los rangos de valores propuestos por Altunin para el coeficiente K_G son: de 8 a 12 para cauces aluviales estables, de 16 a 20 para ríos inestables y de 3 a 4 para cauces con márgenes altamente resistentes a la erosión. Un aspecto interesante que puede comentarse del trabajo de Altunin (a partir de una contribución de Orlov) es que, además, presentó una fórmula empírica para estimar el exponente m en función de una serie de parámetros que reordenados a la luz de los nuevos conceptos de la Hidráulica Fluvial, resultan estar concentrados en la tensión adimensional de Shields, es decir:

$$m = 0.72 \tau_*^{-0.1} \quad (17)$$

Donde $\tau_* = (H S)/(d \Delta)$, y $\Delta = [(\rho_s - \rho)/\rho]$ es la densidad relativa del sedimento sumergido. (Artículo Hector Daniel Parías, 2000, p. 3)

1.2 Marco Conceptual

1.2.1 Flujo uniforme.

Después del aire que respiramos, el agua es el elemento más esencial para el hombre. Sin el agua, la vida animal o vegetal sería imposible. También es un medio eficiente de transferencia de calor y energía y es el solvente más universal que se conoce.

Desde hace por lo menos 5000 años el hombre ha inventado y construido obras para el aprovechamiento del agua; entre las más antiguas están los CANALES, usados para llevar el agua de un lugar a otro.

Los canales son conductos abiertos o cerrados en los cuales el agua circula debido a la acción de la gravedad y sin ninguna presión, pues la superficie libre del líquido está en contacto con la atmósfera; esto quiere decir que el agua fluye impulsada por la presión atmosférica y de su propio peso. (Figura 3). (Libro hidráulica de canales, Pedro Rodríguez, agosto de 2008, p. 1).



Figura 3. Flujo en conducto abierto (canales)

Tomado de: Hidráulica de canales, Pedro Rodríguez Ruíz

1.2.1.1 Clasificación de los canales.

De acuerdo con su origen los canales se clasifican en:

1.2.1.1.1 Canales naturales.

Incluyen todos los cursos de agua que existen de manera natural en la tierra, los cuales varían en tamaño desde pequeños arroyuelos en zonas montañosas, hasta quebradas, ríos pequeños y grandes, arroyos, lagos y lagunas. Las corrientes subterráneas que transportan agua con una superficie libre también son consideradas como canales abiertos naturales. La sección transversal de un canal natural es generalmente de forma muy irregular y variable durante su recorrido, lo mismo que su alineación y las características y aspereza de los lechos.

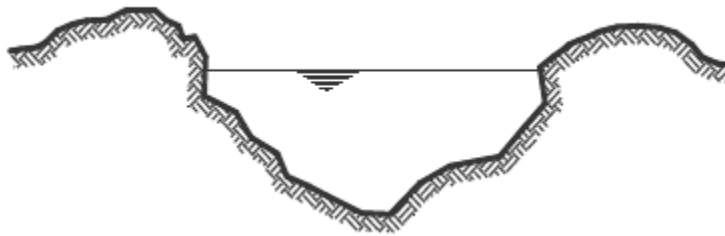


Figura 4. Sección transversal irregular

Tomado de: Hidráulica de canales, Pedro Rodríguez Ruíz

1.2.1.1.2 Canales artificiales.

Los canales artificiales son todos aquellos construidos o desarrollados mediante el esfuerzo de la mano del hombre, tales como: canales de riego, de navegación, control de inundaciones, canales de centrales hidroeléctricas, alcantarillado pluvial, sanitario, canales de desborde, canaletas de madera, cunetas a lo largo de carreteras, cunetas de drenaje agrícola y canales de modelos construidos en el laboratorio.

Los canales artificiales usualmente se diseñan con forma geométricas regulares (prismáticos), un canal construido con una sección transversal invariable y una pendiente de fondo constante se conoce como canal prismático. El término sección de canal se refiere a la sección transversal tomado en forma perpendicular a la dirección del flujo.

Las secciones transversales abiertas más comunes son las siguientes:

- Sección trapezoidal: Se usa en canales de tierra debido a que proveen las pendientes necesarias para estabilidad, y en canales revestidos.
- Sección rectangular: Debido a que el rectángulo tiene lados verticales, por lo general se utiliza para canales construidos con materiales estables, acueductos de madera, para canales excavados en roca y para canales revestidos.
- Sección triangular: Se usa para cunetas revestidas en las carreteras, también en canales de tierra pequeños, fundamentalmente por facilidad de trazo. También se emplean revestidas, como alcantarillas de las carreteras.
- Sección parabólica: Se emplea en algunas ocasiones para canales revestidos y es la forma que toman aproximadamente muchos canales naturales y canales viejos de tierra.

Las secciones transversales cerradas más comunes son las siguientes:

- Sección circular: El círculo es la sección más común para alcantarillados y alcantarillas de tamaños pequeño y mediano.
- Sección parabólica: Se usan comúnmente para alcantarillas y estructuras hidráulicas importantes.

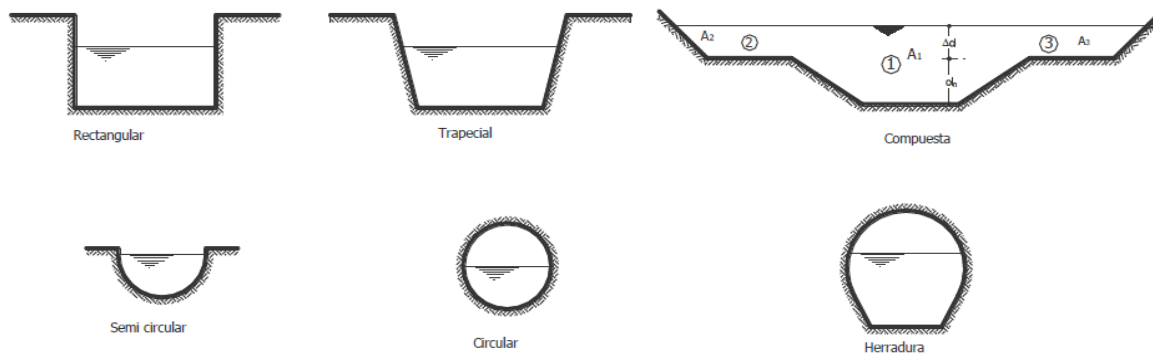


Figura 5. Secciones artificiales transversales tipos.

Tomado de: Hidráulica de canales, Pedro Rodríguez Ruíz

La selección de la forma determinada de la sección transversal, depende del tipo de canal por construir; así, la trapecial es muy común en canales revestidos, la rectangular en canales revestidos con material estable como concreto, mampostería, tabique, madera, etc., la triangular en canales pequeños como las cunetas y contracunetas en las carreteras, y la circular en alcantarillas, colectores y túneles. Existen secciones compuestas como las anteriores que encuentran utilidad en la rectificación de un río que atraviesa una ciudad.

1.2.1.2 Elementos geométricos de los canales.

Los elementos geométricos son propiedades de una sección de canal que pueden ser definidos por completo por la geometría de la sección y la profundidad del flujo. Estos elementos son muy importantes y se utilizan con amplitud en el cálculo de flujo. Para secciones de canal regulares y simples, los elementos geométricos pueden expresarse matemáticamente en términos de la profundidad de flujo y de otras dimensiones de la sección. La forma más conocida de la sección transversal de un canal es la trapecial, como se muestra en la Figura 6.

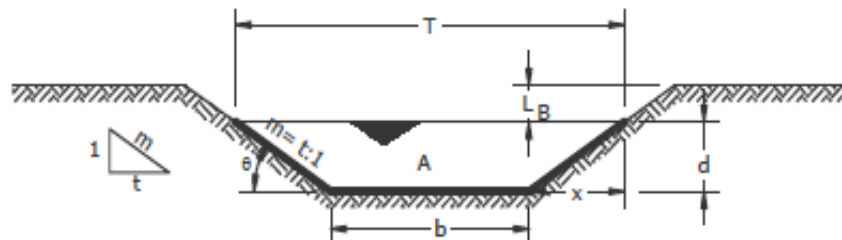


Figura 6. Elementos geométricos más importantes.

Tomado de: Hidráulica de canales, Pedro Rodríguez Ruíz

- Profundidad de flujo “d”: Es la distancia vertical desde el punto más bajo de una sección del canal hasta la superficie libre, es decir la profundidad máxima del agua en el canal.
- Ancho superficial o espejo de agua “T”: Es el ancho de la superficie libre del agua, en m.
- Talud “m”: Es la relación de la proyección horizontal a la vertical de la pared lateral (se llama también talud de las paredes laterales del canal). Es decir “m” es el valor de la proyección horizontal cuando la vertical es 1, aplicando relaciones trigonométricas. Es la cotangente del ángulo de reposo del material (θ), es decir $m = \frac{x}{d}$ depende del tipo de

material en que se construya el canal, a fin de evitar derrumbes (ver Tabla 2). Por ejemplo, cuando se dice que un canal tiene talud 1.5:1, quiere decir que la proyección horizontal de la pared lateral es 1.5 veces mayor que la proyección vertical que es 1, por lo tanto el talud $m = 1.5$, esto resulta de dividir la proyección horizontal que vale 1.5 entre la vertical que vale 1.

- Coeficiente de rugosidad: depende del tipo de material en que se aloje el canal (ver Tabla 3).
- Pendiente (S): Es la pendiente longitudinal de la rasante del canal.
- Área hidráulica (A): Es la superficie ocupada por el agua en una sección transversal normal cualquiera, se expresada en m^2 .
- Perímetro mojado (P): es la longitud de la línea de contorno del área mojada entre el agua y las paredes del canal, (línea resaltada en la Figura 6), expresado en m.
- Radio hidráulico (R): es el cociente del área hidráulica y el perímetro mojado. $R = \frac{A}{P}$, en m.
- Ancho de la superficial o espejo del agua (T): es el ancho de la superficie libre del agua, expresado en m.
- Profundidad media (dm): es el área hidráulica dividida por el ancho de la superficie libre del agua (T). $dm = \frac{A}{T}$, se expresa m.
- Borde libre (BL): es la distancia que hay desde la superficie libre del agua hasta la corona del bordo, se expresa en m.
- Caudal (Q): es el volumen de agua que pasa en la sección transversal del canal en la unidad de tiempo, y se expresa en m^3/s .
- Velocidad media (V): es con la que el agua fluye en el canal, expresado en m/s.
- Factor de sección para el cálculo de flujo crítico: Es el producto del área mojada y la raíz cuadrada de la profundidad hidráulica. (Libro hidráulica de canales, Pedro Rodríguez, agosto de 2008, p. 1-6).

$$\text{Factor de sección } Z = A\sqrt{D} = A\sqrt{\frac{A}{T}} \quad (18)$$

Tabla 2. Taludes apropiados para distinto tipos de materiales en el diseño de canales.

Material	Talud	Valor de θ
Roca ligeramente alterada	0.25:1	75° 58'
Mampostería	0.4:1 y 0.75:1	68° 12'
Roca sana y tepetate duro	1:1	45°
Concreto	1:1 ó 1.25:1	45° y 38° 40'
Tierra arcillosa, arenisca, tepetate blando	1.5:1	33°
Material poco estable, arena, tierra arenisca.	2:1	26°

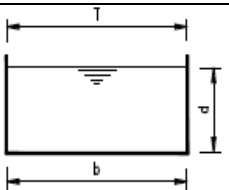
Tomado de: Hidráulica de canales, Pedro Rodríguez Ruíz

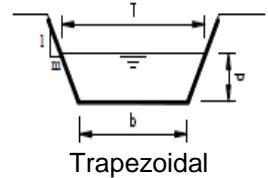
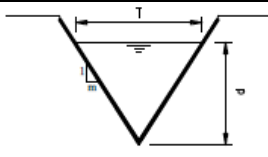
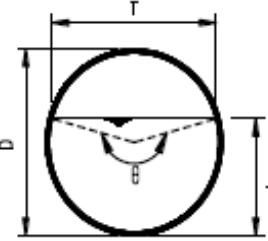
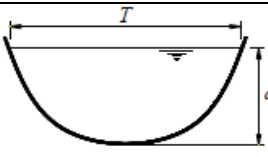
Tabla 3. Valores del coeficiente de rugosidad de Manning para ser aplicado en su ecuación.

Tipo de Material	Valores		
	Mínimo	Normal	Máximo
Roca (con saliente y sinuosa)	0.035	0.040	0.050
Tepetate (liso y uniforme)	0.025	0.035	0.040
Tierra	0.017	0.020	0.025
Mampostería seca	0.025	0.030	0.033
concreto	0.013	0.017	0.020
Polietileno (PVC)	0.007	0.008	0.009

Tomado de: Hidráulica de canales, Pedro Rodríguez Ruíz

Tabla 4. Elementos geométricos de las secciones transversales más frecuentes de canales tipo.

Sección	Área	Perímetro mojado	Radio hidráulico	Ancho superficial	Profundidad hidráulica
 <p>Rectangular</p>	$b * d$	$b + 2d$	$\frac{bd}{b + 2d}$	T	d

 <p>Trapezoidal</p>	$b * d + md^2$	$b + 2d\sqrt{1 + m^2}$ O también $b + 2d\sqrt{1 + ctg\theta^2}$	$\frac{bd + md^2}{b + 2d\sqrt{1 + m^2}}$	$b + 2md$	$\frac{bd + md^2}{b + 2dm}$
 <p>Triangular</p>	md^2	$2d\sqrt{1 + m^2}$ O también $2d\sqrt{1 + ctg\theta^2}$	$\frac{md}{2\sqrt{1 + m^2}}$	$2md$	$\frac{d}{2}$
 <p>Circular</p>	$\frac{(\theta - \text{sen}\theta)D^2}{8}$	$\frac{D\theta}{2}$	$\left(1 - \frac{\text{sen}\theta}{\theta}\right)\frac{D}{4}$	$\left(\frac{\text{sen}\theta}{2}\right)D$ $2\sqrt{d(D - d)}$	$\frac{1}{8}\left(\frac{\theta - \text{sen}\theta}{\text{sen}\frac{1}{2}\theta}\right)D$
 <p>Parabólica</p>	$\frac{2}{3}Td$	$T + \frac{8d^2}{3T}$	$\frac{2T^2d}{3T^2 + 8d^2}$	$\frac{3A}{2d}$	$\frac{2}{3}d$

Tomado de: Hidráulica de canales, Pedro Rodríguez Ruíz

1.2.1.3 Clasificación del flujo en canales abiertos.

El flujo en canales abiertos puede clasificarse en muchos tipos y describirse de varias maneras. La siguiente clasificación se hace de acuerdo con el cambio de los parámetros profundidad, velocidad, área etc. del flujo con respecto al tiempo y al espacio.

La clasificación del flujo en canales abiertos se resume de la siguiente manera:

- a. Flujo permanente
 1. Flujo uniforme
 2. Flujo variado
 - a. Flujo gradualmente variado
 - b. Flujo rápidamente variado
- b. Flujo no permanente

1. Flujo uniforme no permanente (raro)
2. Flujo variado no permanente
 - a. Flujo gradualmente variado no permanente
 - b. Flujo rápidamente variado no permanente

1.2.1.3.1 Flujo permanente y flujo no permanente.

El flujo es permanente si los parámetros (profundidad hidráulica, velocidad, área, etc.), no cambian con respecto al tiempo, es decir, en una sección del canal en todos los tiempos los elementos del flujo permanecen constantes. Matemáticamente se pueden representar:

$$\frac{dA}{dt} = 0; \quad \frac{dV}{dt} = 0; \quad \frac{dd}{dt} = 0;$$

Si los parámetros cambian con respecto al tiempo el flujo se llama no permanente, es decir:

$$\frac{dA}{dt} \neq 0; \quad \frac{dV}{dt} \neq 0; \quad \frac{dd}{dt} \neq 0;$$

En la mayor parte de los problemas de canales abiertos es necesario estudiar el comportamiento del flujo solo bajo condiciones permanentes. Sin embargo, si el cambio en la condición del flujo con respecto al tiempo es importante, el flujo debe tratarse como no permanente.

- *Flujo uniforme permanente*: La profundidad del flujo no cambia durante el intervalo de tiempo bajo consideración, es el tipo de flujo fundamental que se considera en la hidráulica de canales abiertos.

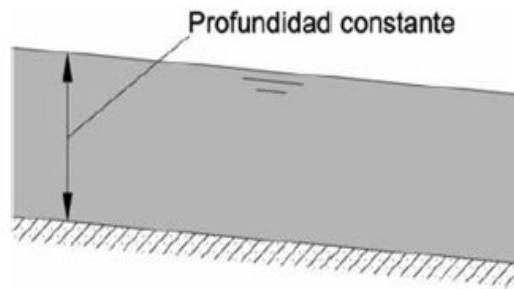


Figura 7. Flujo uniforme permanente.

Tomado de: Hidráulica de canales, Pedro Rodríguez Ruíz

- Flujo uniforme no permanente: El establecimiento de un flujo uniforme no permanente requeriría que la superficie del agua fluctuara de un tiempo a otro pero permaneciendo paralela al fondo del canal, como esta es una condición prácticamente imposible, Flujo uniforme no permanente es poco frecuente (raro).

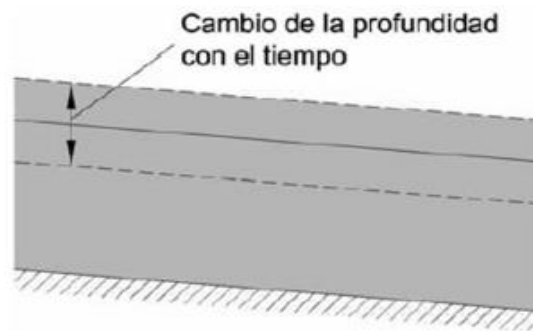


Figura 8. Flujo Uniforme no permanente

Tomado de: Hidráulica de canales, Pedro Rodríguez Ruíz

Un flujo uniforme puede ser permanente o no permanente, según cambie o no la profundidad con respecto al tiempo.

1.2.1.3.2 Flujo uniforme y flujo variado.

Esta clasificación obedece a la utilización del espacio como variable. El flujo es uniforme si los parámetros (profundidad hidráulica, velocidad, área, etc.), no cambian con respecto al

espacio, es decir, en cualquier sección del canal los elementos del flujo permanecen constantes. Matemáticamente se pueden representar:

$$\frac{dA}{dl} = 0; \quad \frac{dV}{dl} = 0; \quad \frac{dd}{dl} = 0;$$

Si los parámetros varían de una sección a otra, el flujo se llama no uniforme o variado, es decir:

$$\frac{dA}{dl} \neq 0; \quad \frac{dV}{dl} \neq 0; \quad \frac{dd}{dl} \neq 0;$$

El flujo variado puede clasificarse como rápidamente variado o gradualmente variado.

- *Flujo rápidamente variado*: El flujo es rápidamente variado si la profundidad del agua cambia de manera abrupta en distancias comparativamente cortas, como es el caso del resalto hidráulico.

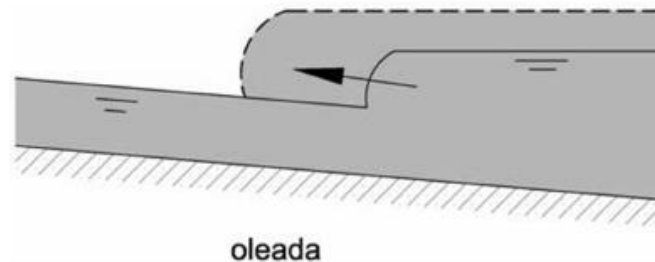


Figura 9. Flujo Rápidamente Variado.

Tomado de: Hidráulica de canales, Pedro Rodríguez Ruíz

- *Flujo gradualmente variado*: El flujo gradualmente variado es aquel en el cual los parámetros cambian en forma gradual a lo largo del canal, como es el caso de una curva de remanso. (Libro hidráulica de canales, Pedro Rodríguez, agosto de 2008, p. 8-10).

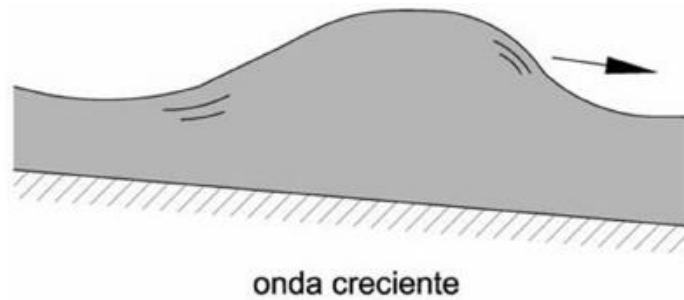


Figura 10. Flujo Gradualmente Variado.

Tomado de: Hidráulica de canales, Pedro Rodríguez Ruíz

1.2.2 Canales con sección compuesta y rugosidad.

La sección transversal de un canal puede componerse de distintas subsecciones, cada una de ellas con distinta rugosidad que las demás.

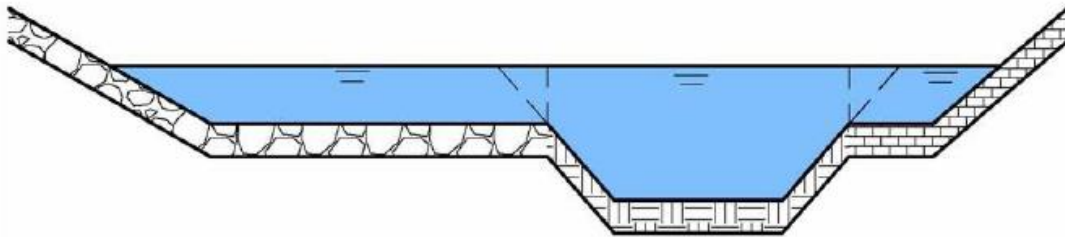


Figura 11. Canal compuesto por una sección principal y dos secciones laterales.

Tomado de: Hidráulica de canales, Pedro Rodríguez Ruíz

A menudo se encuentra que los canales laterales son más rugosos que el canal principal, luego la velocidad media en el canal principal es mayor que las velocidades medias en los canales laterales. En este caso, la ecuación de Manning puede aplicarse por separado a cada subsección para determinar la velocidad media de la subsección. Luego, pueden calcularse los caudales en las subsecciones. Por consiguiente, el caudal total es igual a la suma de estos canales parciales. La velocidad media para la sección transversal completa del canal es igual al caudal total dividido por el área mojada total.

La sección transversal de un canal puede componerse de distintas subsecciones, cada una de ellas con diferente rugosidad que las demás. Puede haber canales que tengan una

sección transversal como se indica en la Figura 12. Se dice entonces que es una sección compuesta. Está formada por las dos figuras geométricas. También puede ocurrir algo similar en un cauce natural (Figura 13). Un río tiene en época de estiaje un caudal pequeño, pero en época de abundancia tiene un caudal grande que ocupa las áreas adyacentes.



Figura 12. Sección compuesta canal artificial

Tomado de: Hidráulica de canales, Pedro Rodríguez Ruíz

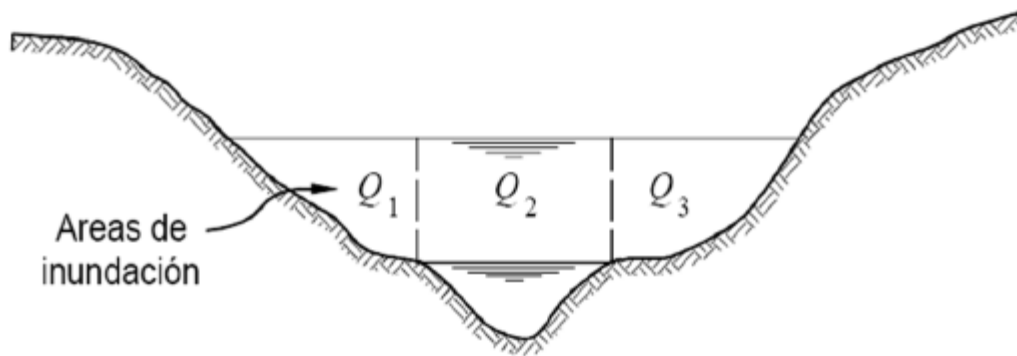


Figura 13. Sección compuesta canal natural

Tomado de: Hidráulica de canales, Pedro Rodríguez Ruíz

Una sección compuesta se puede dividir en N secciones parciales de modo que el gasto total Q es igual a la suma de los gastos parciales.

$$Q_t = Q_1 + Q_2 + Q_3 + \dots + Q_n$$

Cada parte de la sección tiene su propia rugosidad:

$$n_1 + n_2 + n_3 + \dots + n_N$$

Para cada parte de la sección se tendrá que:

$$V_1 = \frac{R_1^{2/3} S^{1/2}}{n_1}$$

$$Q_1 = \frac{A_1}{n_1} R_1^{2/3} S^{1/2}$$

$$Q_2 = \frac{A_2}{n_2} R_2^{2/3} S^{1/2}$$

$$Q_3 = \frac{A_3}{n_3} R_3^{2/3} S^{1/2}$$

Y el gasto total será:

$$Q = VA = \frac{A_1}{n_1} R_1^{2/3} S^{1/2} + \frac{A_2}{n_2} R_2^{2/3} S^{1/2} \dots \dots \dots + \frac{A_n}{n_n} R_n^{2/3} S^{1/2} \quad (19)$$

La velocidad media para la sección transversal completa del canal es igual al gasto total dividida entre el área mojada total.

$$V_m = \frac{Q}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad (20)$$

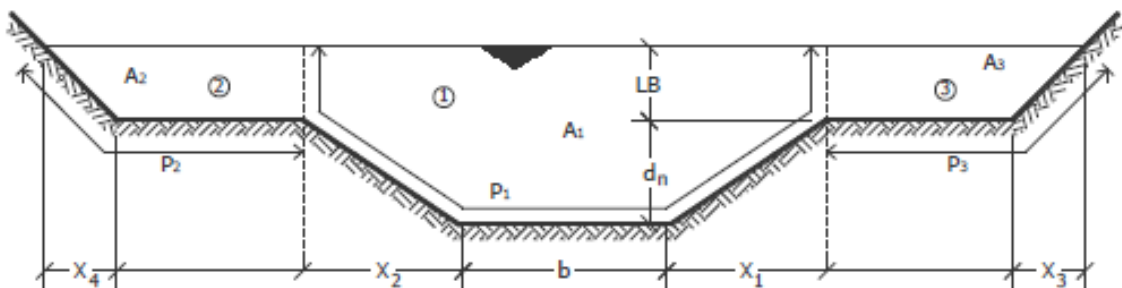


Figura 14. Canal de sección compuesta.

Tomado de: Hidráulica de canales, Pedro Rodríguez Ruíz

1.2.2.1 Rugosidad compuesta.

Un canal puede ser construido de modo que el fondo y las paredes tengan rugosidades diferentes. En este caso habrá dos valores para el coeficiente de rugosidad. Uno para el fondo y otra para las paredes. Se dice entonces que el canal es de rugosidad compuesta.



Figura 15. Ejemplos característicos de rugosidad compuesta.

Tomado de: Hidráulica de canales, Pedro Rodríguez Ruíz

Si cada parte de la sección tiene un coeficiente n_i de Kutter, entonces el problema consiste en hallar un valor de n que sea representativo de todo el perímetro.

Consideremos que hubiera N rugosidades diferentes. A cada una le corresponde una parte del perímetro mojado.

Rugosidades: $n_1, n_2, n_3 \dots n_N$

Perímetros: $P_1, P_2, P_3 \dots P_N$

Supongamos, por facilidad operativa, que sólo hubiera dos rugosidades diferentes. Para cada de ellas habrá un radio hidráulico correspondiente y se puede calcular cada velocidad parcial.

$$V_1 = \frac{R_1^{2/3} S^{1/2}}{n_1} \qquad V_2 = \frac{R_2^{2/3} S^{1/2}}{n_2}$$

O bien,

$$R_1 = \left[\frac{V_1 n_1}{S^{1/2}} \right]^{3/2} \qquad R_2 = \left[\frac{V_2 n_2}{S^{1/2}} \right]^{3/2}$$

En consecuencia, y aplicando la ecuación $A = R.P$ se tiene que:

$$A_1 = \left[\frac{V_{1n_1}}{S^{1/2}} \right]^{3/2} P_1 \qquad A_2 = \left[\frac{V_{2n_2}}{S^{1/2}} \right]^{3/2} P_2$$

El área total es igual a la suma de las áreas parciales:

$$A_t = A_1 + A_2$$

$$\left[\frac{Vn}{S^{1/2}} \right]^{3/2} P = \left[\frac{V_{1n_1}}{S^{1/2}} \right]^{3/2} P_1 = \left[\frac{V_{2n_2}}{S^{1/2}} \right]^{3/2} P_2$$

La pendiente es la misma. Horton y Einstein hicieron la suposición de que la velocidad de que la velocidad es una sola.

$$V_1 = V_2 = \dots \dots \dots V_n$$

Luego,

$$n = \left[\frac{p_{1n_1}^{3/2} + p_{2n_2}^{3/2}}{P} \right]^{2/3} \quad (21)$$

Que es coeficiente de rugosidad de Kutter para toda la sección transversal. (Libro hidráulica de canales, Pedro Rodríguez, agosto de 2008, p. 62-66).

1.2.3 Método de la Fuerza tractiva o esfuerzo tangencial propuesto por el U. S. B. R.

Cuando el agua fluye en un canal, se desarrolla una fuerza que actúa sobre el lecho de éste en la dirección del flujo. Esta fuerza, la cual es simplemente el empuje del agua sobre el área mojada, se conoce con el nombre de fuerza tractiva o esfuerzo tangencial. En un flujo uniforme la fuerza tractiva en apariencia es igual a la componente efectiva de la fuerza gravitacional que actúa sobre el cuerpo de agua, paralela al fondo del canal e igual a $\gamma \cdot A \cdot L \cdot S$, donde γ es el peso unitario del agua, A es el área mojada, L es la longitud del tramo del canal y S es la pendiente. Luego, el valor promedio de la fuerza tractiva por unidad de área mojada, conocido como fuerza tractiva unitaria T_0 , es igual a:

$$\frac{\gamma * A * L * S}{P * L} = \gamma * R * S \quad (22)$$

Donde:

τ_0 = Esfuerzo tangencial medio en kg/m².

γ = Peso sumergido de la partícula en kg.

R = Radio hidráulico.

S = Pendiente longitudinal del canal.

Cuando el canal es muy ancho, el radio hidráulico se considera igual a la profundidad hidráulica "d" del canal, entonces, la ecuación anterior puede escribirse.

$$\tau_0 = \gamma * d * S \quad (23)$$

Con excepción de los canales muy anchos, se ha comprobado que el esfuerzo tangencial no se distribuye uniformemente sobre las paredes, sino como se indica en la figura siguiente, para una sección trapezoidal donde $b = 4$.

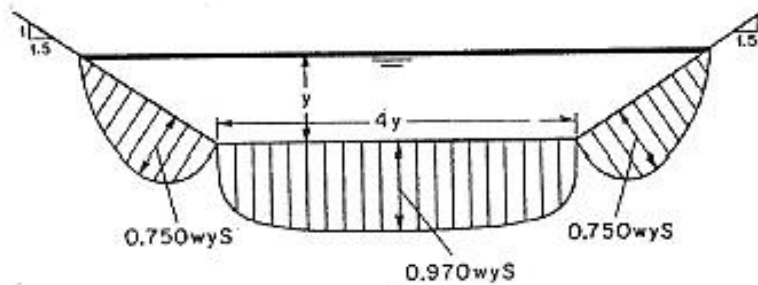


Figura 16. Distribución de la fuerza tractivas o tangencial sobre las paredes de un canal trapezoidal.

Tomado de: Hidráulica de canales, Pedro Rodríguez Ruíz

Como resultados de estos estudios, en la Figura 17 y Figura 18 se muestran los valores máximos del esfuerzo tangencial de arrastre, tanto en los taludes como en la plantilla del canal trapezoidal en función del valor medio de: $\tau_0 = \gamma d S$.

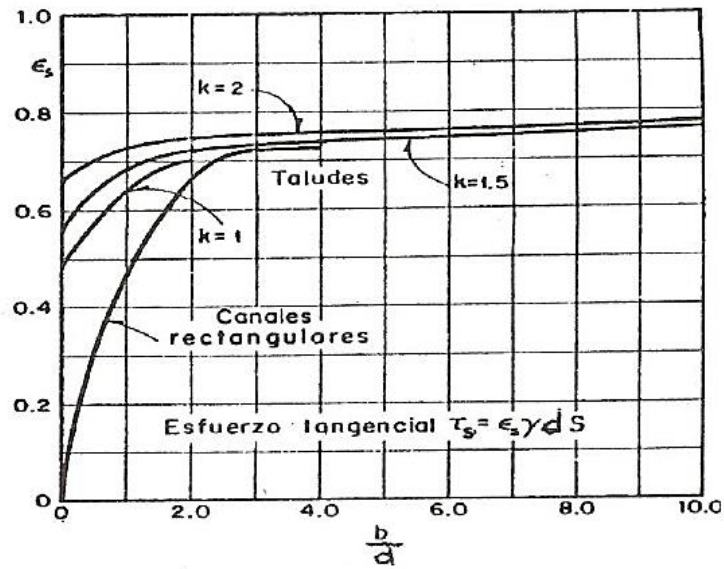


Figura 17. Esfuerzo tangencial que la corriente produce sobre los taludes del canal de tierra.

Tomado de: Hidráulica de canales, Pedro Rodríguez Ruíz

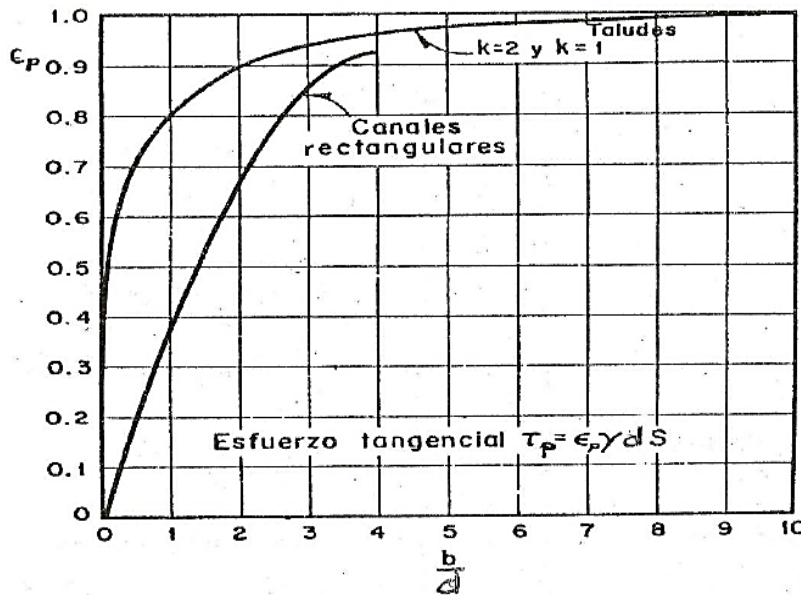


Figura 18. Esfuerzo tangencial que la corriente produce en el fondo del canal de tierra.

Tomado de: Hidráulica de canales, Pedro Rodríguez Ruíz

1.2.3.1 Relación de fuerza tractiva.

Sobre una partícula de suelo que descansa en la pendiente lateral de una sección de canal (Figura 19.) en la cual se encuentra fluyendo agua, actúan dos fuerzas: la fuerza tractiva $A \cdot \tau_s$ y la componente de la fuerza gravitacional $W_s \cdot \text{sen} \theta$, la cual hace que la partícula ruede a lo largo de la pendiente lateral.

Los símbolos utilizados son:

A = área efectiva de la partícula,

τ_s = fuerza tractiva unitaria en la pendiente del canal,

W_s = peso sumergido de la partícula

θ = ángulo de la pendiente lateral. La resultante de estas dos fuerzas, las cuales forman un ángulo recto, es:

$$\sqrt{W_s^2 \text{Sen}^2 \theta + a^2 \tau_s^2} \quad (24)$$

Cuando esta fuerza es lo suficientemente grande, la partícula se moverá., la resistencia al movimiento de la partícula es igual a la fuerza normal $W_s \cdot \text{cos} \theta$ multiplicada por el coeficiente de fricción, o $\tan \theta$, donde θ es el ángulo de reposo. Luego:

$$W_s \text{cos} \theta \tan \theta = \sqrt{W_s^2 \text{Sen}^2 \theta + a^2 \tau_s^2} \quad (25)$$

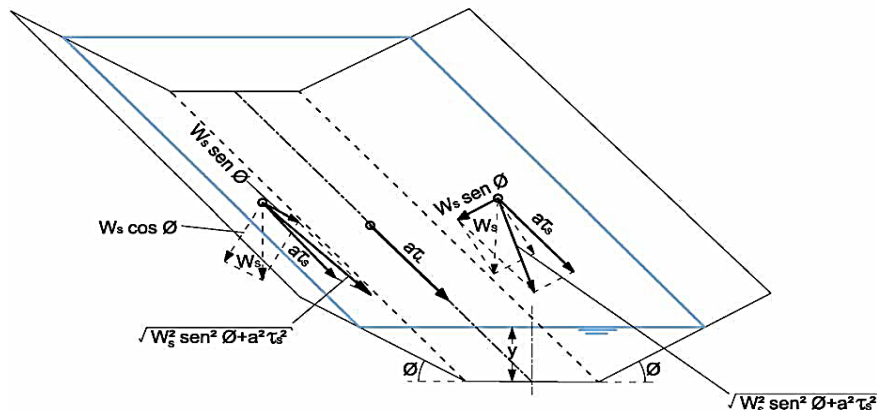


Figura 19. Análisis de las fuerzas que actúan en una partícula que reposa en la superficie del lecho de un canal.

Tomado de: Hidráulica de canales, Pedro Rodríguez Ruíz

La partícula en estas condiciones está equilibrada por las fuerzas de fricción ejercidas sobre ella, y que es igual al producto de la componente normal al talud correspondiente al peso de la partícula ($W_s \cos\theta$) multiplicada por el coeficiente de fricción interna $\tan\phi$ (ϕ = ángulo de reposo del material). En el caso límite, cuando la partícula está a punto de rodar, se establece el siguiente equilibrio:

Despejando τ_s tenemos:

$$\tau_s = \frac{W}{a} \cos\theta \tan\phi \sqrt{1 - \frac{\tan^2\theta}{\tan^2\phi}} \quad (26)$$

En el caso de partículas descansando en la plantilla de canal $\theta = 0$, la ecuación anterior es:

$$\tau_p = \frac{W}{a} \tan\phi \quad (27)$$

Llamando K a la relación entre el esfuerzo tangencial crítico en los taludes τ_s y el esfuerzo tangencial de arrastre en la plantilla τ_p y simplificando tenemos:

$$K = \frac{\tau_s}{\tau_p} \sqrt{1 - \frac{\tan^2\theta}{\tan^2\phi}} \quad (28)$$

Esta relación es función solo de la inclinación ϕ del lado inclinado y del ángulo de reposo θ del material. El ángulo de reposo necesita ser considerado solo para materiales gruesos no cohesivos. De acuerdo con la investigación del U.S. Bureau of Reclamation se encontró que en general el ángulo de reposo se incrementa tanto con el tamaño como con la angularidad del material. Para propósitos de diseño, el Boureau preparó curvas (Figura 20) que muestran los valores del ángulo de reposo para materiales no cohesivos con diámetros superiores a 0.2 pulg. Para varios grados de rugosidad. El diámetro referido es el diámetro de partícula para el cual el 25 % (en peso) del material es mayor.

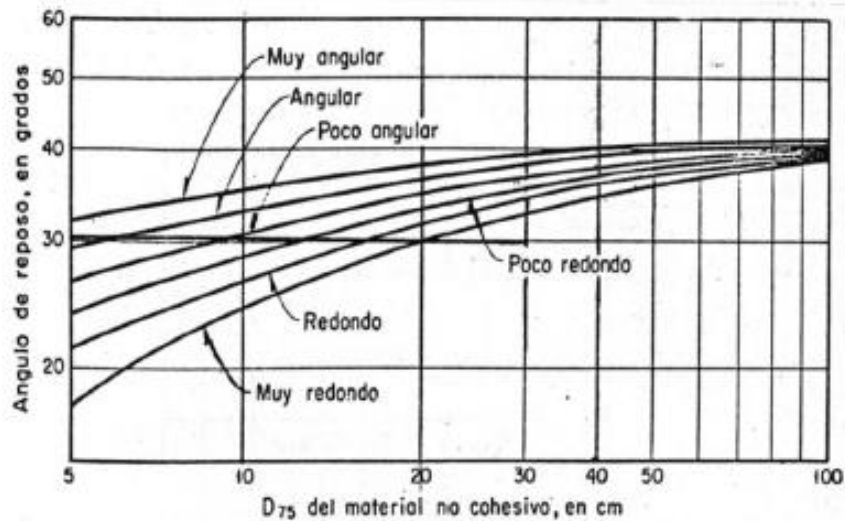


Figura 20. Ángulo de reposo de un suelo no cohesionado en función del diámetro de sus partículas

Tomado de: Hidráulica de canales, Pedro Rodríguez Ruíz

El diámetro considerado d_{75} es el de una partícula para la cual el 25 % en peso del material tiene un diámetro mayor a éste.

El U.S.B.R. ha estudiado los esfuerzos permisibles en las plantillas de los canales, basándose en el tamaño de las partículas para materiales no cohesionados y en la compacidad y la relación de vacíos para algunos materiales cohesionados. Dichos resultados se resumen en las recomendaciones siguientes:

1. Para suelos cohesionados los esfuerzos tangenciales críticos recomendados se presentan en la Figura 21.
2. Para materiales gruesos no cohesionados, recomienda un valor del esfuerzo permisible en kg/cm^2 igual al diámetro d_{75} en mm dividido entre 13. Se puede entonces seguir un procedimiento de tanteos resumidos en los siguientes pasos:

$$\tau = \frac{d_{75}}{13} \quad (29)$$

Procedimiento:

1. Con base a las características del material en donde se va a alojar el canal y con apoyo de la Figura 20 se determina el ángulo de reposo del mismo ϕ y se elige el talud de manera que $\theta \leq \phi$.
2. Calcular el valor de K con la fórmula:

$$K = \frac{\sigma_s}{\sigma_p} \sqrt{1 - \frac{\text{Sen}^2 \theta}{\text{Sen}^2 \phi}} \quad (30)$$

3. De la Figura 21 y Figura 22 se determina el esfuerzo tangencial σ_p permisible sobre la plantilla del canal, de acuerdo con las características del material.
4. Se calcula el valor del esfuerzo tangencial máximo permisible en los taludes a partir de la ecuación: $\sigma_s = K\sigma_p$
5. Como se conoce el peso específico del fluido " γ " (gama) y la pendiente longitudinal del canal "S" podemos determinar el esfuerzo tangencial producido por el flujo tanto en los taludes como en la plantilla a partir del esfuerzo tangencial medio que produce el flujo en la sección " $\sigma = \gamma Sd$ " afectado por un coeficiente ε que es función del talud "m" y la relación de la plantilla "b" con la profundidad hidráulica "d" ; $\frac{b}{d}$, con valor diferente para la plantilla y para el talud.
6. Se supone una relación $\frac{b}{d}$, y de las figuras 4 y 5 se obtiene ε quedando las ecuaciones del paso 5 en función únicamente de "d".
7. Se igualan $\sigma_s = \sigma_p$ del paso 6 con los permisibles de los pasos 3 y 4, donde se despejan los valores de "d"; se escoge el menor.

$$\sigma_s = \gamma Sd\varepsilon_s \quad \sigma_p = \gamma Sd\varepsilon_p \quad (31)$$

8. De la relación $\frac{b}{d}$ supuesta en el paso 6 se despeja la profundidad hidráulica d.

9. De los dos valores obtenidos de la profundidad hidráulica en el paso anterior, escogemos el de menor valor y con $\frac{b}{d}$, propuesto en el paso 6 obtenemos la plantilla b .

10. Con los valores de d , b , n y el talud, determinamos el gasto que puede conducir esta sección, si este gasto es casi igual al gasto requerido, los valores de d y b son los valores buscados, sino repetir el proceso desde el paso 6.

11. Se proporciona el borde libre necesario y se ajustan las dimensiones de la sección a valores prácticos.

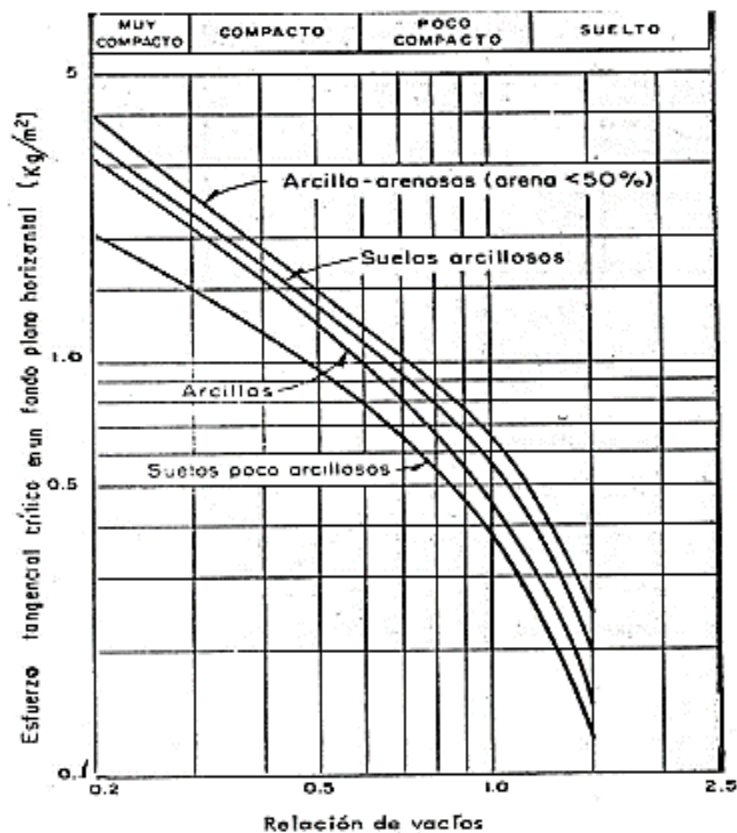


Figura 21. Esfuerzo tangencial crítico necesario para erosionar un suelo cohesivo.

Tomado de: Hidráulica de canales, Pedro Rodríguez Ruíz

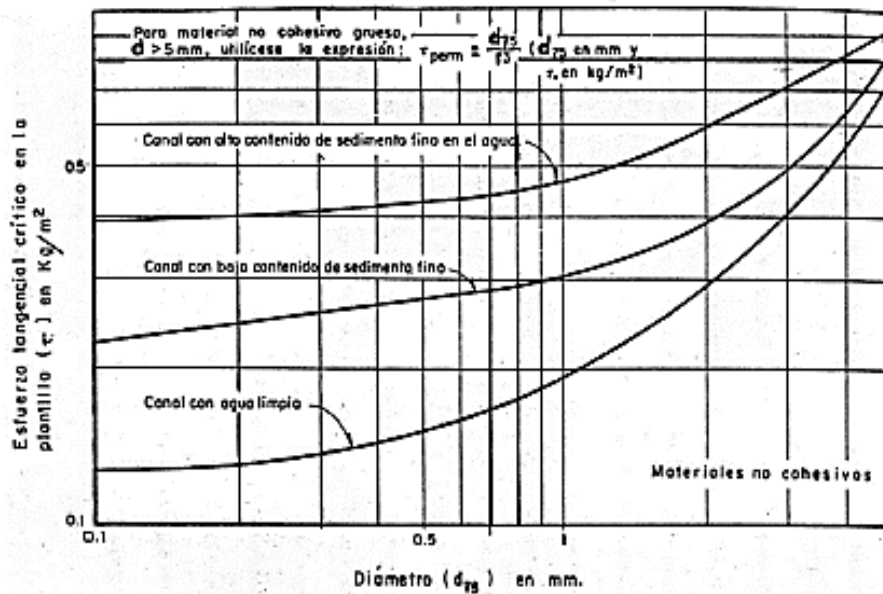


Figura 22. Esfuerzo tangencial crítico necesario para mover las partículas de un suelo no cohesivo que se encuentran en un fondo plano.

Tomado de: Hidráulica de canales, Pedro Rodríguez Ruíz

Para materiales gruesos no cohesivos, con un factor de seguridad suficiente, el Bureau recomienda un valor tentativo para la fuerza tractiva permisible, en libras / pie², igual a 0.4 veces el diámetro en pulgadas de una partícula para la cual el 25 % (en peso) del material mayor. Esta recomendación se muestra por medio de una línea recta en la tabla de diseño (Figura 23). Para material fino no cohesivo, el tamaño especificado es el tamaño medio o el tamaño menor que el 50 % en peso. Se recomiendan tres curvas de diseño (Figura 23). (Libro hidráulica de canales, Pedro Rodríguez, agosto de 2008, p. 94-102).

- Para canales con alto contenido de material fino en el agua,
- Para canales con alto contenido de sedimento en el agua, y
- Para canales con agua limpia.

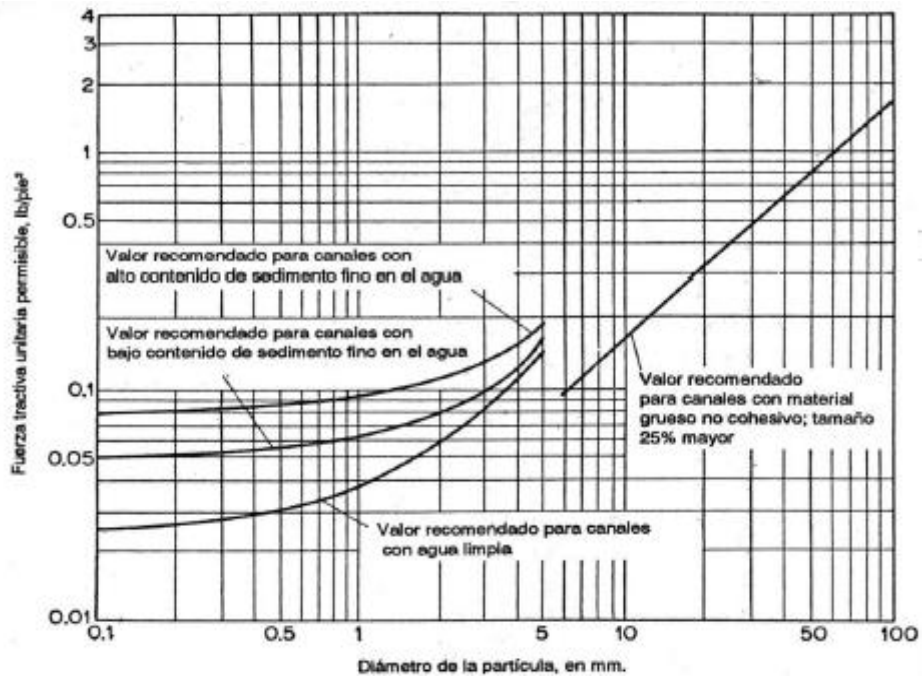


Figura 23. Fuerzas tractivas unitarias permisibles recomendadas para canales en materiales no cohesivos.

Tomado de: U.S. Bureau of Reclamation

1.2.4 Métodos para cálculo de borde libre.

Borde libre es el espacio entre la cota de la corona y la superficie del agua, no existe ninguna regla fija que se pueda aceptar universalmente para el cálculo del borde libre, debido a que las fluctuaciones de la superficie del agua en un canal, se puede originar por causas incontrolables.

Para el cálculo de borde libre de un canal de sección compuesta o trapezoidal, se recomiendan los siguientes métodos:

1.2.4.1 U.S. BUREAU OF RECLAMATION.

La U.S. BUREAU OF RECLAMATION recomienda estimar el borde libre con la siguiente fórmula:

$$\text{Bordelibre} = \sqrt{CY} \quad (32)$$

Donde:

- Borde libre: en pies
- $C = 1.5$ para caudales menores a 20 pies³ / seg., y hasta 2.5 para caudales del orden de los 3000 pies³/seg.
- $Y =$ Profundidad hidráulica del canal en pies.

(Manual: criterios de diseños de obras hidráulicas, diciembre de 2010, p. 16).

1.2.4.2 Criterio Ing. Germán Acero – Escuela Colombiana de Ingeniería

“Según criterio práctico, se tiene:

$$B.L. > 0.20 \text{ a } 0.30m (Y_n < 1.0m) \quad (33)$$

$$B.L. = \frac{1}{3} Y_n (1.0 \leq Y_n \leq 3.0m) \quad (34)$$

$$B.L. = 0.6\sqrt{Y_n} (Y_n > 3.0m) \quad (35)”$$

(Apuntes Ing. Germán Acero, p. 34).

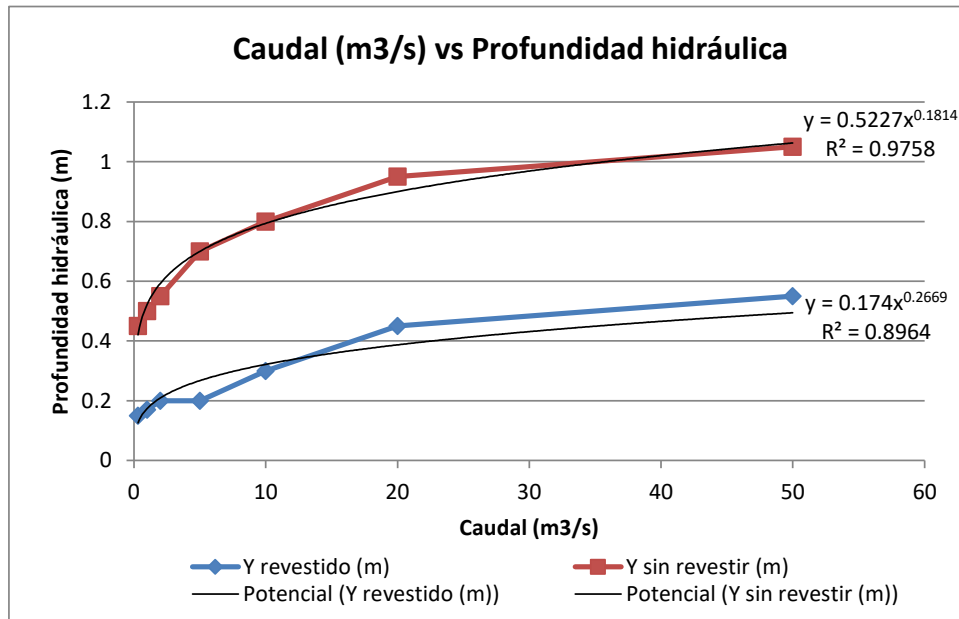
1.2.4.3 Hidráulica de tuberías y canales, Arturo Rocha.

De acuerdo con el libro de hidráulica de tuberías y canales de Arturo Rocha, se recomienda:

Tabla 5. profundidades hidráulicas según el caudal y el revestimiento.

Caudal (m³/s)	Y revestido (m)	Y sin revestir (m)
0.3	0.15	0.45
1	0.17	0.5
2	0.2	0.55
5	0.2	0.7
10	0.3	0.8
20	0.45	0.95
50	0.55	1.05

Tomado de: libro de hidráulica de tuberías y canales de Arturo Rocha



Gráfica 6. Borde libre – Caudal vs profundidad hidráulica

Tomado de: Propio

1.2.4.4 Hidráulica de canales, Pedro Rodríguez Ruiz.

“Una práctica corriente para canales en tierra, es dejar un borde libre o resguardo igual a un tercio de la profundidad hidráulica, es decir: B.L. = $d/3$. Mientras que para canales revestidos, el borde libre puede ser la quinta parte de la profundidad hidráulica: B.L. = $d/5$.” (Manual: criterios de diseños de obras hidráulicas, diciembre de 2010, p. 16).

1.2.4.5 Manual de pequeñas presas.

De acuerdo con el manual de pequeñas presas, en aliviaderos de presas de la USBR, en flujo subcrítico, propone un borde libre:

$$Q > 100: 0.6m, 10 \leq Q \leq 100: 0.3 + 0.0033 * (Q - 10) \quad (3)$$

El valor mínimo de BL es de 0.30 y el valor máximo es de 0.60m.

Para caudales mayores:

$$Q > 100: 0.6m$$

Si es régimen de torrente o supercrítico:

$$BL = 0.61 + 0.00037 * V * \sqrt[3]{y} \quad (37)$$

(Manual: pequeñas presas, 1987, No. 3, p. 385).

1.2.5 Diseño geométrico horizontal y sinuoso de cauces aluviales – parámetros y diseño.

A partir de la estimación de los radios de curvatura característicos de los meandros existentes en el cauce natural a reemplazar el índice de sinuosidad y los anchos de sección diseñados hidráulicamente para el transporte del caudal dominante y creciente; determinar los siguientes atributos geométricos requeridos para el trazado del cauce sinuoso.

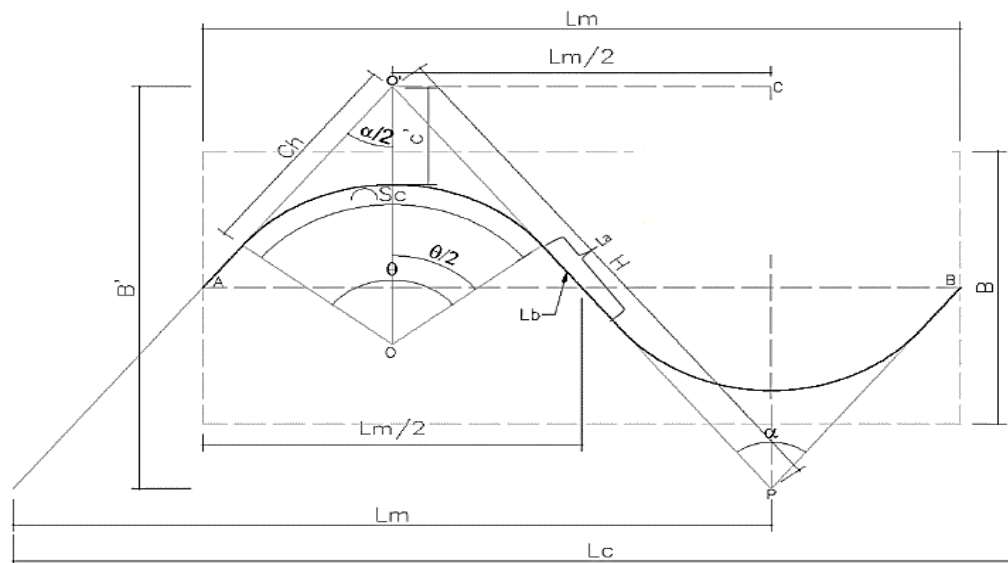


Figura 24. Geometría de las ondas sinuosas

Tomado de: Apuntes herramientas computaciones para el diseño y modelación de cauces - Escuela Colombiana de Ingeniería.

Del triángulo O'PC:

$$\frac{L_m}{2} = \frac{\tan\left(\frac{\alpha}{2}\right)}{B'} \quad \alpha = 2\text{arccotan}\left(\frac{L_m}{2B'}\right) \quad (38)$$

$$L_c = nL_m \quad L_m = \frac{L_c}{n} \quad (39)$$

$$\alpha = 2\text{arccotan}\left(\frac{L_c}{2nB'}\right) \quad \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) = \frac{B'}{H} \quad H = \frac{B'}{\cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \quad (40)$$

$$L_r = n \left[2 \left(H - 2C_h + \left(\frac{\theta R_c}{2} \right) \right) + \theta R_c \right] \quad H = \frac{\left[\frac{L_r}{n} + 4C_h - 2\theta R_c \right]}{2} \quad (41)$$

Reemplazando 40 en 39:

$$n = \frac{L_r}{\frac{2B'}{\cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)} - 4C_h + 2\theta R_c} \quad (42)$$

$$\alpha = 2\text{arccotan}\left(\frac{L_c}{2nB'}\right)$$

$$\alpha = 2\text{arccotan}\left(\frac{L_c}{\left(\frac{2B'L_r}{\frac{2B'}{\cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)} - 4C_h + 2\theta R_c} \right)} \right) \quad (43)$$

$$180 = 90 + \frac{\alpha}{2} + \frac{\theta}{2} \quad \theta = 180 - \alpha \quad C_h = R_c \text{Tan}\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (44)$$

$$C' = \frac{R_c}{\text{sen}\left(\frac{\alpha}{2}\right)} - R_c \quad \frac{B'}{2} = \frac{B}{2} + C'$$

$$B' = B + 2 \left(\frac{R_c}{\text{sen}\left(\frac{\alpha}{2}\right)} - R_c \right) \quad (45)$$

Donde:

- α = Ángulo de deflexión de la onda
- L_r = Longitud sinuosa del río (L_r)
- n = Número de ondas sinuosas
- L_b = Longitud hidráulica de cada onda
- L_a = Longitud de aproximación entre ondas
- L_m = Longitud de onda
- B = Amplitud de onda
- B' = Amplitud de onda para el trazado
- θ = Radio de apertura
- L_c = Longitud del valle suavizado
- R_c = Radio de curvatura
- H = Hipotenusa

1.2.5.1 Longitud sinuosa del río (L_r).

Se obtiene multiplicando la longitud del valle suavizado por el factor de sinuosidad. Generalmente se puede optar por aplicar cualquiera de las siguientes directrices:

- a. Conservar la longitud del río natural a reemplazar. Se obtiene calculando el factor de sinuosidad equivalente respecto a la longitud del valle suavizado trazado. (Se mantiene la pendiente del cauce natural a reemplazar).
- b. Determinar la longitud del río natural aplicando el factor de sinuosidad característico estimado para la cuenca a intervenir. (La pendiente puede ser mayor o menor a la del cauce natural a reemplazar).
- c. Aumentar la longitud del río sinuoso aplicando un factor de sinuosidad mayor que permita obtener una pendiente menor a la del cauce natural.

1.2.5.2 Prevención coalineación de taludes en zonas de curva.

Al ancho de la base del valle disponible se le debe descontar un ancho de separación entre la curva externa de cada onda al borde de talud de la base del valle para evitar que el talud del cauce dominante y del valle sea continuo y así prevenir la erosión del talud. Se recomiendan 5m a cada lado.

Ejemplo: Si el ancho disponible en la base del valle es de 160m, se debe realizar el diseño sinuoso para un ancho máximo de 150m. En el trazado de ejes usando CIVIL 3D se dibuja el corredor de 160m, un offset de 5m a cada lado y las curvas externas se trazan dentro del corredor efectivo libre para garantizar la separación y no coalineación de taludes. (Apuntes herramientas computaciones para el diseño y modelación de cauces - Escuela Colombiana de Ingeniería, septiembre de 2016, p. 6-9)

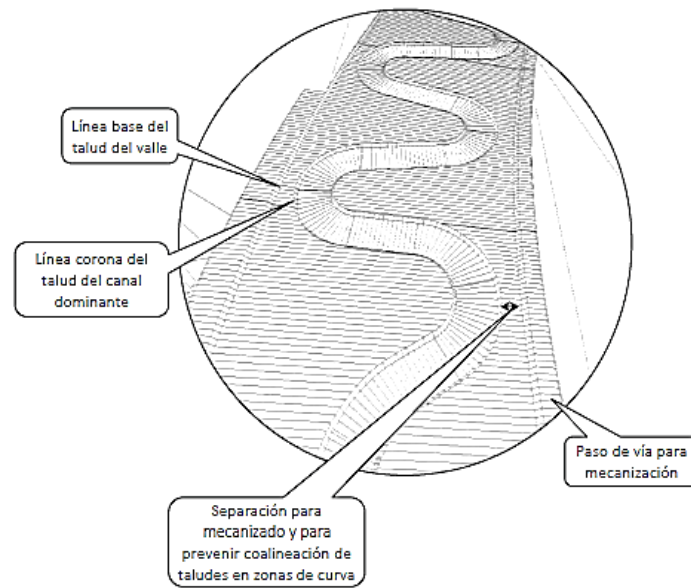


Figura 25. Coalineación de taludes en zonas de curvas

Tomado de: Apuntes herramientas computaciones para el diseño y modelación de cauces

Capítulo II

Variables y parámetros para las curvas de caracterización

2.1. Interacción de las Principales Variables de los Cauces Aluviales

En las siguientes figuras se presentan varios de los parámetros y rasgos morfológicos, hidrológicos, hidráulicos y sedimentológicos, utilizados en la descripción y caracterización de los ríos aluviales desde una perspectiva aplicada. Las propiedades y definiciones allí mostradas forman sólo una parte del análisis geomorfológico, que se completará con los contenidos de los ítems siguientes.

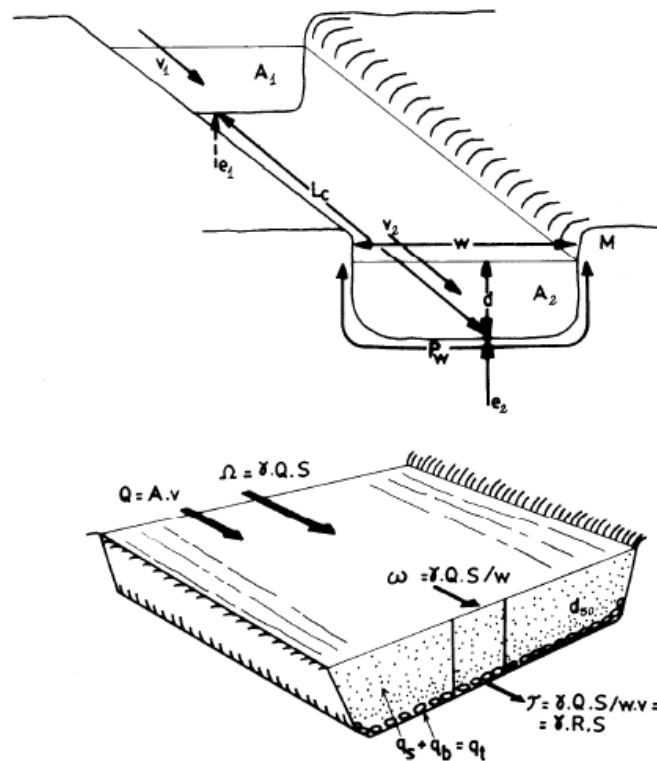


Figura 26. Principales variables de los cauces aluviales

Tomado de: Geomorfología de cauces aluviales

Explicación y definición de símbolos de la Figura 26:

d = profundidad.

w = ancho.

A = área de la sección transversal.

Q = caudal líquido = $A_1 \cdot v_1 = A_2 \cdot v_2$

S_0 = pendiente del cauce = $(e_1 - e_2) / L_c$

γ = peso específico del agua.

v = velocidad de la corriente.

e = cota altimétrica del lecho.

L_o = longitud del cauce.

P_w = perímetro mojado.

M = % de limo y arcilla en el perímetro del cauce.

D_{60} = diámetro medio del sedimento del lecho prolongada.

Ω = potencia total de la corriente = $\gamma \cdot Q \cdot S$

ω = potencia por unidad de ancho = $\gamma \cdot Q \cdot S / w$

R = radio hidráulico = A / P_w

T = esfuerzo tractivo o de corte = $\gamma \cdot R \cdot S$

q_t = caudal sólido total (carga de lavado + Carga de fondo).

q_s = caudal sólido en suspensión

q_b = caudal sólido del lecho.

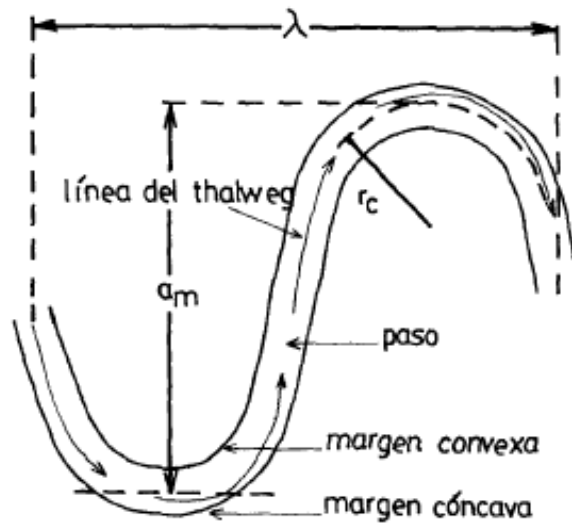


Figura 27. Sinuosidad de cauces aluviales

Tomado de: Geomorfología de cauces aluviales

a_m = amplitud de onda.

r_o = radio de curvatura.

λ = longitud de onda.

L_r = longitud del valle (o del cauce rectificadado).

S_v = pendiente regional (o de la llanura aluvial).

Q_f = caudal formativo del cauce: Q_m , Q_{bf} , Q_2

A_d = área de la cuenca de drenaje.

Q_m = caudal medio anual.

Q_{bf} = caudal de cauce lleno.

Q_2 = caudal de inundación para un intervalo de recurrencia de dos años.

P = sinuosidad del cauce = $L_o / L_r = S_v / S_c$

En la siguiente figura se muestra la representación esquemática de las formas del lecho menores en cauces aluviales, y relaciones con la potencia de la corriente y el tamaño de grano (D_{50}) a,b,c,d = vista en planta de las crestas de óndulas y dunas: con el incremento de la potencia, las crestas tienden a ser discontinuas.

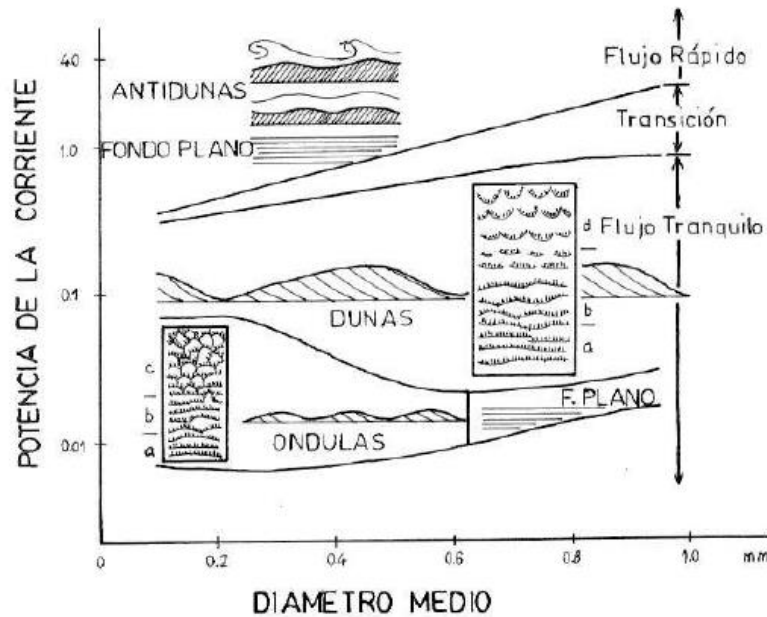


Figura 28. Representación esquemática de las formas del lecho menores en cauces aluviales

Tomado de: Depositional sedimentary environments

No todos los parámetros indicados en la Figura 26 y Figura 27 tienen la misma importancia en un sistema fluvial: por ejemplo, los ríos tienen poco control sobre el caudal líquido que deben evacuar, o sobre la cantidad y tipo de sedimento que les aportan sus interfluvios por lavaje pluvial y remoción en masa. En efecto, el caudal de una corriente está determinado por la precipitación y evaporación en la cuenca, la permeabilidad de su superficie, la cantidad y tipo de vegetación, y el área de la región que drena. De este modo, el caudal es una variable independiente del sistema fluvial, puesto que la corriente debe ajustarse a él.

Bajo el mismo enfoque, el ancho, la profundidad y la velocidad de un río aluvial son variables semi-independientes: aun cuando están determinadas parcialmente por factores como el caudal, también son capaces de influirse mutuamente (o de "autorregularse"). Existe una

y, en esta vía, que una comprensión más completa del sistema, tanto cualitativa como cuantitativa, es posible.

Otro problema está asociado a la dirección de la casualidad (es decir, qué son causas y qué son efectos). Como se muestra en la Tabla 6, diferentes variables pueden ser dependientes o independientes en función de la escala de tiempo en la cual un río está siendo analizado.

Tabla 6. Jerarquía de las variables que interactúan en un sistema aluvial para períodos de tiempo de distinta duración

VARIABLES	“TIEMPO GEOLÓGICO” (10 ⁶ AÑOS)	“TIEMPO HISTÓRICO” (10-10 ³ AÑOS)	“TIEMPO CALENDARIO” (1 AÑO O MENOS)
Estadío en la evolución del sistema	Independiente	No relevante	No relevante
Relieve inicial	Independiente	No relevante	No relevante
Geología (litología, estructura)	Independiente	Independiente	Independiente
Cambios del nivel de base ⁽¹⁾ (tectónica, etc)	Independiente	Independiente	Independiente
Paleoclima	Independiente	Independiente	Independiente
Paleohidrología	Independiente	Independiente	Independiente
Volúmen del sistema sobre el nivel de base	Dependiente	Independiente	Independiente
Dimensiones del valle (ancho, S _v , etc)	Dependiente	Independiente	Independiente
Clima (precipitación, temperatura, estacionalidad)	-	Independiente	Independiente
Vegetación (tipo y densidad)	-	Independiente	Independiente
Hidrología (Q _m , q _t , Q _{bf})	-	Independiente	Independiente
Morfología del cauce (w, d, A, P, R, λ, etc)	-	Dependiente	Independiente
Caudales Q y q _t instantáneos en una sección	-	-	Dependiente
Hidráulica del flujo	-	-	Dependiente
Influencia antrópica	No relevante	Independiente	Independiente

Tomado de: Time space and causality in geomorphology

Mientras que la Figura 29 permite una comprensión de los sistemas aluviales como sistemas puramente físicos (muy adecuada, desde una perspectiva ingenieril), la Tabla 6 nos recuerda que los ríos son sistemas físicos con historia. En otras palabras, un paisaje o escenario fluvial (y sus rasgos asociados) dependerán, en última instancia, de la evolución geológica y climática de la región, y de la acción del hombre en la cuenca. (Artículo Guía Didáctica Carlos G. Ramonell, 1997, p.2-5).

2.2. Definición e Identificación de las Variables y Parámetros para las Curvas de Caracterización.

Para la elaboración de las herramientas para la caracterización de cauces aluviales se definieron e identificaron las siguientes variables y parámetros para la obtención de las curvas de caracterización:

2.2.1 Periodo de retorno

Para el caso de estudio el periodo de retorno definido para el caudal que debe transportar la totalidad de la sección hidráulica del canal es de 100 años. Para el caudal del valle se ha establecido un periodo de retorno de 100 años y para el caudal dominante 2.33 años.

2.2.2 Caudales de modelación

Se definió un rango de caudales desde 1 m³/s hasta 1000 m³/s, ya que para canales con pendientes de valle, se pueden presentar estos volúmenes de agua. Se definieron 3 secciones dentro del rango de caudales seleccionado: Inicialmente 10 caudales desde 1 m³/s hasta 10 m³/s en intervalos cada 1 m³/s con el fin de analizar el comportamiento de los cauces sinuosos con caudales pequeños. La segunda sección de 9 caudales desde 20 m³/s hasta 100 m³/s en intervalos cada 10 m³/s, fue determinada con el fin de analizar un intervalo intermedio de caudales y por último, una sección de 9 caudales desde 200 m³/s hasta 1000 m³/s en intervalos cada 100 m³/s, para analizar un intervalo alto de caudales.

Tabla 7. Caudales de modelación

CAUDAL TR 100 AÑOS (m ³ /s)		
1	20	200
2	30	300
3	40	400
4	50	500
5	60	600
6	70	700
7	80	800
8	90	900
9	100	1000
10		

Tomado de: Propio

2.2.3 Sección transversal del canal

Se define una sección transversal compuesta, la inferior para el caudal dominante y la superior para el caudal del valle, por lo cual para simplificar el problema de la modelación y para construir las curvas de caracterización trabaja con canales cuyas profundidades oscilan entre 1 m, 1.5 m y 2 m desde la corona del canal valle hasta la base del canal dominante, debido a que estas profundidades son las presentadas aproximadamente en canales de valle.

Adicionalmente para el presente trabajo de grado, se definen tres (3) taludes (z) diferentes 1:1, 1:2 y 1:3, los cuales aplican tanto para el canal dominante como para el canal valle.

2.2.4 Tipo de flujo.

Los canales se calculan para condiciones de flujo permanente, ya que es de menor complejidad en su análisis para el diseño de cauces aluviales.

2.2.5 Tipo de canal.

El diseño de la sección del canal corresponde a condiciones estables, el cual es calculado por medio del método de la fuerza tractiva. Este método es muy aplicado para el diseño de canales no revestidos, estables en tierra, que el de la velocidad máxima permisible, es uno basado en el análisis de las fuerzas que provocan la erosión.

Se generan mínimo 10 curvas en función de las pendientes del valle y el caudal de diseño.

2.2.6 Longitud y ancho máximo disponible del valle.

Se toma como referencia valles de 1 km, ya que es una longitud considerable para analizar hidráulica y geoméricamente el comportamiento del flujo en cauce aluvial. Adicionalmente, para cada uno de los diseños se establecieron restricción del ancho máximo disponible del valle hasta 300 m.

2.2.7 Factor de sinuosidad y longitud del cauce.

En las hojas de diseño, también se puede definir un factor de sinuosidad donde: canal ligeramente sinuoso $F_s=1$, canal moderadamente sinuoso $F_s=1.25$ y canal muy sinuoso $F_s=1.5$. Igualmente se definió una longitud del cauce sinuoso de máximo 1500 m con un $F_s=1.5$. Estos valores se pueden variar en las hojas de diseño, con el fin de obtener otras curvas de caracterización.

2.2.8 Coeficientes de rugosidad.

Se asume para la elaboración de las fichas técnicas de diseño, un coeficiente de rugosidad para el canal dominante de 0.018 y para el canal valle 0.035. Estos valores se pueden variar en las hojas de diseño, con el fin de obtener otras curvas de caracterización.

2.2.9 Ángulo de reposo del material.

Para el presente proyecto, se asume un ángulo de reposo del material de 30° (θ). Este valor se puede variar en las hojas de diseño, con el fin de obtener otras curvas de caracterización.

2.2.10 Pendientes del cauce sinuoso y valle.

Para el diseño de las curvas de caracterización se toman como referencia las pendientes propuestas por Rosgen (1994) para ríos de llanura y sinuosos.

Es importante tener en cuenta que las curvas de caracterización utilizan la pendiente del cauce sinuoso y no del valle para lo relacionado al diseño y modelación, ya que el flujo es transportado inicialmente por el cauce dominante al cual se le asigna un factor de sinuosidad.

A continuación, se muestra la caracterización geomorfológica para cauces de valle: En este nivel se realiza una descripción general: perfil, planta y sección transversal.

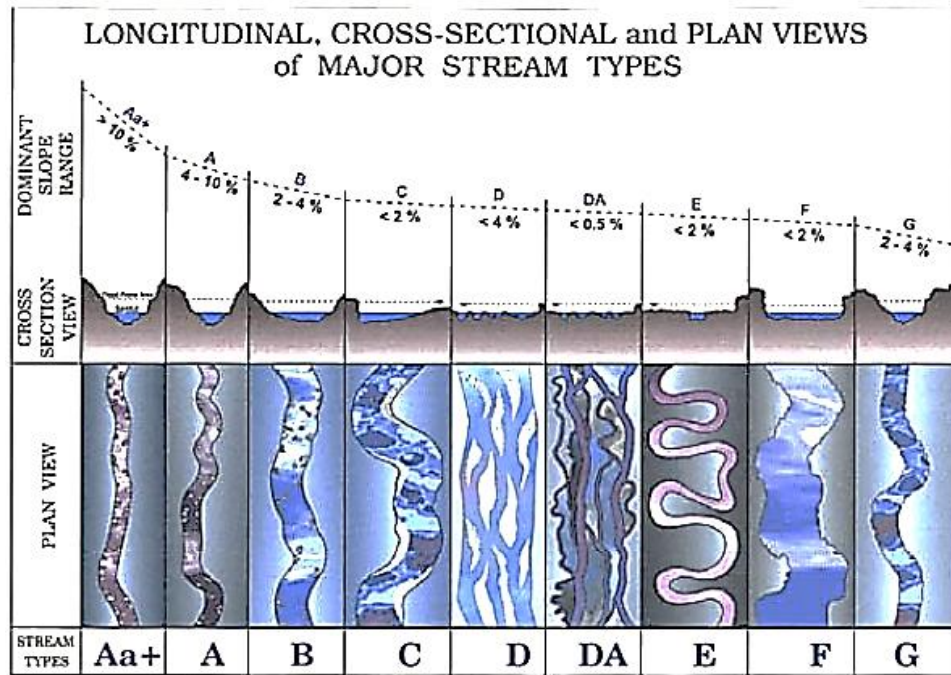


Figura 30. Esquema para la descripción general propuesto por Rosgen (1994).

Fuente: Geomorfología Fluvial, Universidad del Cauca (Colombia) Pág. 62.

Las pendientes del cauce sinuoso definidas para el modelo de caracterización según la bibliografía encontrada para ríos de llanura y sinuosos deberán estar entre 0% y 2%.

Tabla 8. Pendientes del cauce sinuoso definidas

Pendiente (S) (m/m)	
0.001	0.012
0.002	0.014
0.004	0.016
0.006	0.018
0.008	0.020
0.010	

Tomado de: Propio

Capítulo III

Elaboración de fichas técnicas de diseño de cauces aluviales y sinuosos

A continuación, se presenta el procedimiento desarrollado para la elaboración de las fichas técnicas de diseño de cauces aluviales, teniendo como referencia las curvas de caracterización de cauces, las cuales permiten obtener parámetros geométricos e hidráulicos de cauces aluviales.

3.1. Construcción Hoja de Diseño Cauces Aluviales.

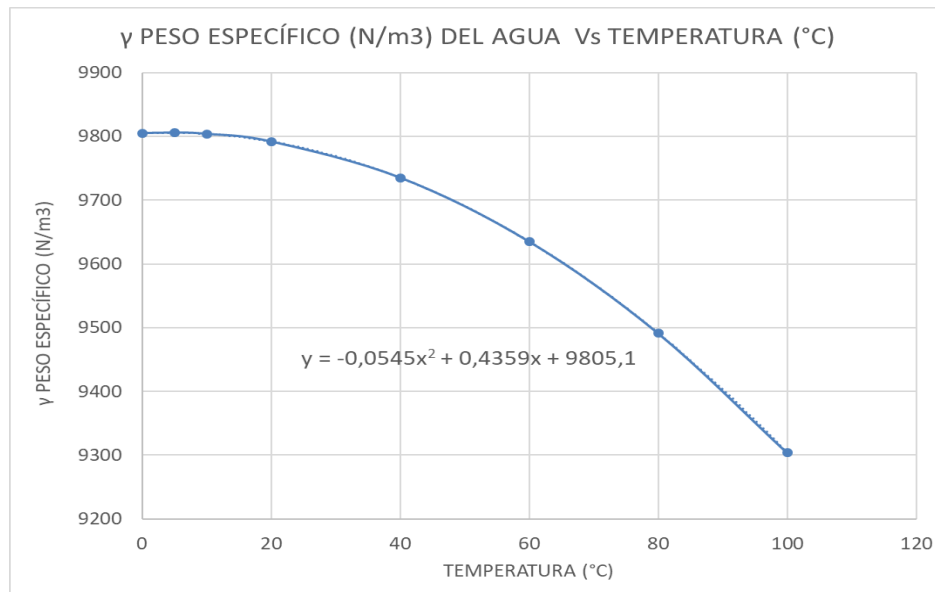
Para la construcción de la hoja de diseño de cauces aluviales se tuvo en cuenta el siguiente procedimiento:

1. Se estima el valor de la gravedad, a partir de la elevación con respecto a un nivel de referencia. Se recomienda tomar como referencia 9.806 m/s^2 .
2. Seleccionar el valor de la temperatura del agua ($^{\circ}\text{C}$) con el fin de definir el valor de la densidad del agua (ρ) y peso específico del agua (γ). Se pueden tomar como referencia los siguientes valores:

Tabla 9. Variación de la densidad y el peso específico del agua con la temperatura

Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	Sistema Internacional		Sistema Inglés	
	ρ Densidad del agua (kg/m^3)	γ Peso específico (N/m^3)	ρ Densidad del agua (lb/ft^3)	γ Peso específico (lb/ft^3)
0	999.9	9805.13	62.42	186.57
5	1000	9805.95	62.43	186.59
10	999.8	9804.04	62.42	186.55
20	998.6	9792.05	62.34	186.32
40	992.8	9735.4	61.98	185.25
60	982.6	9635.16	61.34	183.34
80	967.9	9491.34	60.42	180.6
100	948.8	9303.93	59.23	177.04

Tomado de: Apuntes Escuela Colombiana de Ingeniería



Gráfica 7. Peso específico del agua Vs temperatura

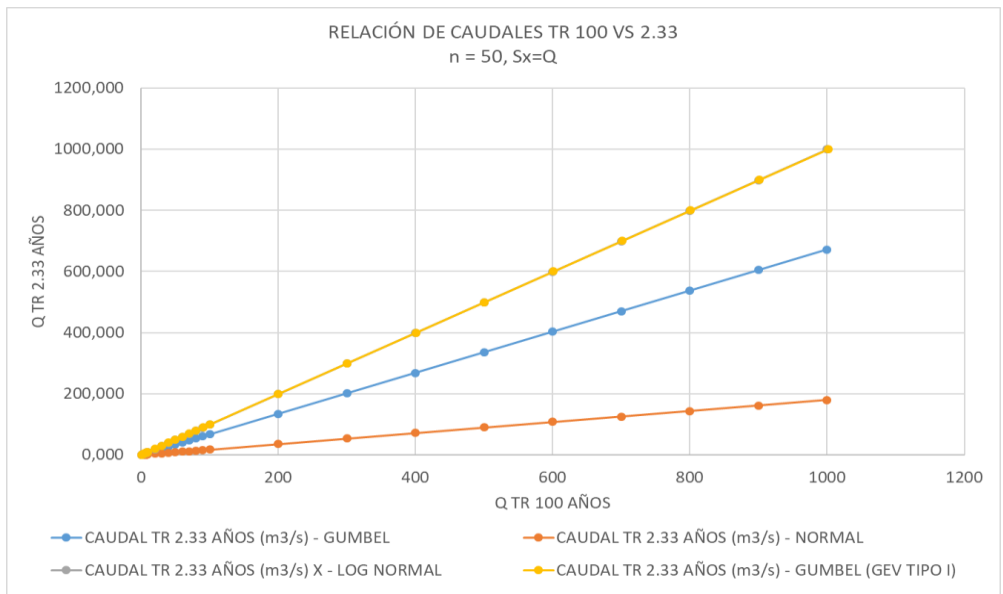
Tomado de: Apuntes Escuela Colombiana de Ingeniería

3. Definir la altura total del canal (H) desde la corona del canal valle hasta la base del canal dominante.
4. Precisar la relación del caudal entre el periodo de retorno (TR) de 100 años y (TR) 2.33 años. Para este punto, se recomienda tomar un valor de 0.36 que equivale a un porcentaje del 36% sobre un 100% del caudal total.

Para definir este valor de referencia, se realizó el cálculo del caudal a un periodo de retorno (TR) de 2.33 años teniendo en cuenta los valores de los caudales a un periodo de retorno de 100 años.

Se calcularon estos caudales con diferentes distribuciones de frecuencias: Gumbel, Normal, Log Normal, Gumbel (GEV tipo I) y Pearson tipo III. Como no se cuenta con datos de precipitaciones de estaciones pluviométricas, se toma como datos base los caudales a un periodo de retorno (TR) de 100 años.

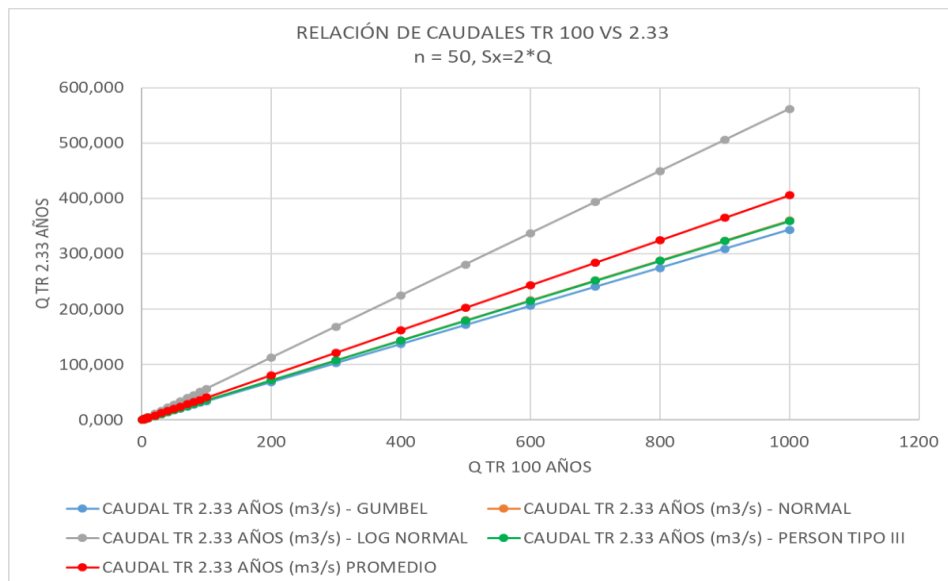
Para los primeros cálculos se asumió que la desviación estándar de los datos es igual a los valores de los caudales TR100 años (ver anexos 1 a 4), evidenciándose una equivalencia aproximada promedio del 67% del caudal a 2.33 años.



Gráfica 8. Relación de caudales TR100 años Vs TR2.33 años Sx=Q

Tomado de: Propio

Para los segundos cálculos se asumió que la desviación estándar de los datos es igual a dos veces el valor de los caudales TR100 años (ver anexos 5 a 9), pudiéndose observar una equivalencia aproximada promedio del 33% del caudal a 2.33 años.



Gráfica 9. Relación de caudales TR100 años Vs TR2.33 años Sx=2Q

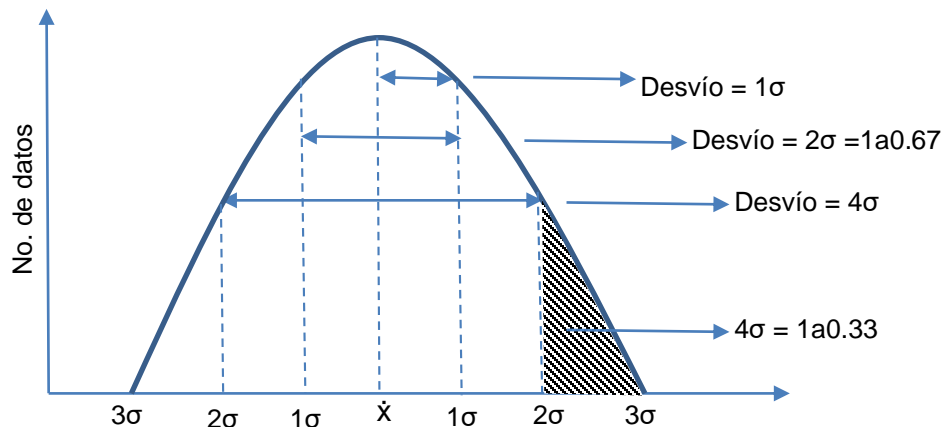
Tomado de: Propio

De acuerdo con lo anterior, a continuación, se realiza la justificación de utilizar una desviación estándar para calcular el caudal de periodo de retorno (TR) a 2.33 años, teniendo únicamente los caudales a un periodo de retorno de 100 años, para cada una de las distribuciones.

La dispersión de los datos a ambos lados de la media se evalúa mediante la desviación estándar (o típica). La desviación estándar (s ó σ) se calcula en función de la suma de las desviaciones de cada valor (x) de la media previamente calculada (\bar{x}), n es el número total de datos:

$$S_n = \sqrt{\frac{\sum(X - \bar{X})^2}{n}} \quad (46)$$

La desviación estándar gráficamente se puede representar de la siguiente manera:

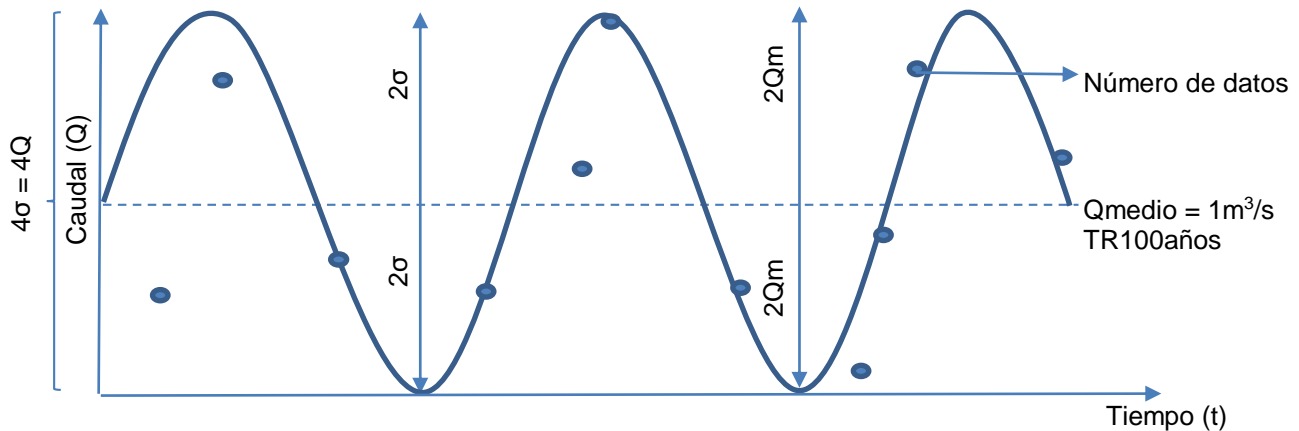


Gráfica 10. Gráfica desviación estándar

Tomado de: Propio

En este caso, se tomó como referencia un número de datos de 50 y la media de cada serie como el mismo caudal a 100 años. Como ejemplo ilustrativo para el primer QTR 100 años de $1 \text{ m}^3/\text{s}$, la media (\bar{x}) es igualmente de $1 \text{ m}^3/\text{s}$, para el cálculo de la desviación estándar se asume una banda de confianza de dispersión de 4σ , teniendo aproximadamente un número de datos de 50, ya que al tomar una banda más pequeña como 2σ los datos aumentan aproximándose a $1 \text{ m}^3/\text{s}$.

Se propone para el cálculo de la desviación estándar ampliar la banda de confianza a 4σ o 2 veces el caudal ($2Q$) como se presenta en la siguiente gráfica:



Gráfica 11. Banda de confianza desviación estándar

Tomado de: Propio

De acuerdo con lo anterior, se observa que al utilizar $2\sigma = 2Q$ los datos tienden a ser más pequeños lo cual se puede aproximar a un caudal de un periodo de retorno de 2.33 años, con una relación de 1 a 0.33. Entonces se tiene:

Tabla 10. Relación desviación estándar para TR2.33 años

Desviación estándar (σ)		Relación TR 2.33 años
2σ	4σ	1 a 0.33
1σ	2σ	1 a 0.67

Tomado de: Propio

De igual forma como datos de referencia para definir la relación del caudal entre el periodo de retorno (TR) de 100 años y (TR) de 2.33 años, se realizó el análisis de frecuencias de caudales máximos para los datos limnigráficos de caudales máximos registrados en la estación Puente Adobe ubicada en el río Bogotá, sector Cajicá-Chía y la estación Puente Virginia ubicada en río frío sector Cajicá (ver Anexos 10 al 15).

Según los cálculos realizados, se pudo determinar en cada uno de los análisis de frecuencias de caudales máximos para determinar los caudales máximos en un periodo de retorno de 2.33 años, que en la estación Puente Adobe se presenta una equivalencia aproximada promedio del 23% del caudal a 2.33 años y en la estación Puente Virginia se presenta una equivalencia aproximada promedio del 35% del caudal a 2.33 años.

De acuerdo a lo anterior, para el presente ejemplo práctico se puede recomendar un valor del 36% equivalente a 0.36 como relación entre el caudal TR100 años y el caudal TR2.33 años, teniendo en cuenta que dentro de las hojas de diseño, el diseñador puede modificar la relación de acuerdo a su criterio.

5. Definir los valores de los coeficientes de rugosidad (n) del canal dominante y valle. Para el presente ejemplo práctico se adopta un coeficiente de rugosidad de 0.018 para el canal dominante y de 0.035 para el canal valle. Para definir este valor, se puede tomar como referencia lo contemplado en la Tabla 3.
6. Fijar el valor de los taludes de los canales a diseñar, tanto del costado izquierdo como derecho. Para definir este valor, se puede tomar como referencia lo contemplado en la Tabla 2.
7. Seleccionar el ángulo de reposo del material para cada uno de los taludes y de los lechos del fondo.
8. Seleccionar el tipo y factor de sinuosidad de los canales a diseñar, con el fin de calcular el factor de reducción K_α . Dicho factor se aplica (ver Tabla 11) en el caso en que el ángulo del talud (ϕ) sea mayor que el ángulo de reposo del material (θ) y se multiplica con el factor de relación entre el esfuerzo tangencial crítico y el de arrastre (K).

$$K_\alpha = \cos\alpha \sqrt{1 - \frac{\tan^2\alpha}{\tan^2\phi}} \quad (47)$$

Tabla 11. Porcentaje de reducción en canales (Lane) y factor de sinuosidad

Tipo de canal	Porcentaje de reducción en canales (Lane) (%)	Factor de sinuosidad
Canal recto	0%	
Canal ligeramente sinuoso	10%	1
Canal moderadamente sinuoso	25%	1,25
Canal muy sinuoso	40%	1,5

Tomado de: Apuntes Escuela Colombiana de Ingeniería

9. Establecer el ancho máximo de restricción, con el fin de las fichas técnicas muestren únicamente las curvas de caracterización hasta el valor máximo definido.
10. Definir el porcentaje proporcional de la profundidad de la lámina de agua total del canal, con el fin de calcular el ancho base del canal dominante.

Para este punto, se recomienda una profundidad del 20% para el canal dominante y del 80% para el canal valle en todos los rangos de caudales. Lo anterior se definió de acuerdo con el comportamiento de las curvas de caracterización, pues si se tomaban porcentajes diferentes dependiendo el rango de caudales, éstas presentaban cambios bruscos en su trazado. A prueba y error estos porcentajes fueron los que mejor ajuste tuvieron en el trazado de forma exponencial de las curvas de caracterización.

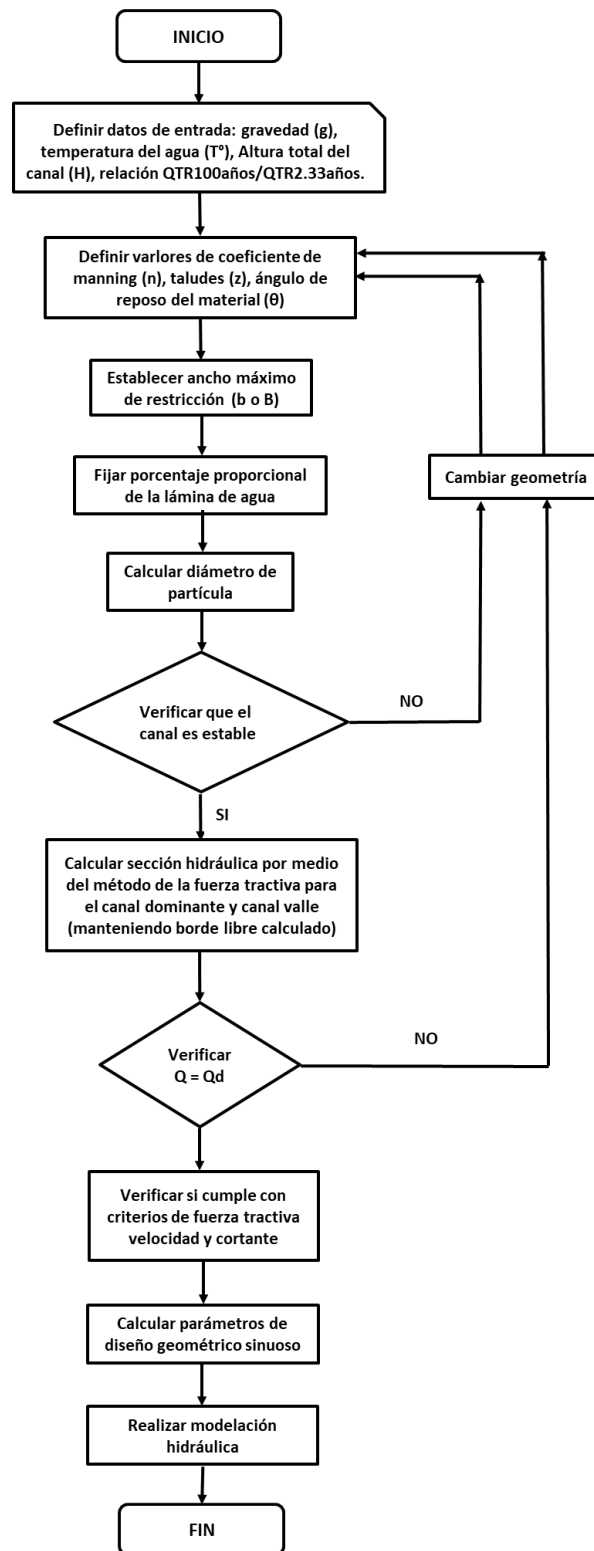


Figura 31. Diagrama de flujo hoja de diseño

Tomado de: Propio

3.2. Cálculo de Sección Hidráulica de Canal Trapezoidal Compuesta, por el Método de la Fuerza Tractiva.

3.2.1. Cálculo de la base del canal dominante.

Se obtiene al igualar el esfuerzo permisible en el material (τ_p) en el esfuerzo tangencial (τ_t), es decir:

$$\tau_p = \tau_t * R_h \quad (48)$$

De la ecuación de Manning:

$$Q = \frac{1}{n} * A * R_h^{2/3} * S^{1/2} \quad (49)$$

Donde:

- Q = Caudal volumétrico (m^3/s)
- n = Coeficiente de rugosidad
- A = Área hidráulica del canal (m^2)
- R_h = Radio hidráulico (m)
- S = Pendiente del canal (m/m)

Despejando el Radio hidráulico (R_h):

$$R_h = \left(\frac{Q * n}{S^{1/2} * A} \right)^{3/2} \quad (50)$$

Área para el canal trapezoidal:

$$b * y + zy^2 \quad (51)$$

Reemplazando la ecuación 50 en la ecuación 48:

$$\tau_p = \tau_t * \left(\frac{Q * n}{S^{1/2} * (b * y + zy^2)} \right)^{3/2} \quad (52)$$

Despejando el valor de la base del canal (b):

$$b = \frac{Q * n \sqrt{S} (\sqrt[3]{\tau_t})^2 - S z y^2 (\sqrt[3]{\tau_p})^2}{S y (\sqrt[3]{\tau_p})^2} \quad (53)$$

A continuación, se presenta un ejemplo, del cálculo de la base del canal dominante de sección compuesta por el método de la fuerza tractiva, con los datos del primer canal diseñado:

Datos:

- Temperatura del agua (T) = 10 °C
- Coeficiente de rugosidad de Manning del canal dominante (n) = 0.018
- Talud (Z) = 1:1
- Ángulo de reposo para el material (θ) = 30°
- Caudal canal dominante TR 2.33 años = 3.6 m³/s
- Pendiente del canal (S) = 0.001 m/m
- Altura total del canal (H) = 1 m
- Porcentaje proporcional de la profundidad (y), canal dominante = 20%H; canal valle = 80%H.
- Diámetro mínimo de la partícula que pasa el 75% (d_{75}) = 2.60 mm (Calculado para encontrar la estabilidad del canal).

El esfuerzo tangencial máximo que corriente produce en la base del canal:

$$\tau_t = R_h * \gamma * S \qquad R_h = y$$

Reemplazando valores:

$$\tau_t = (0.20 \text{ m}) * (999.8 \text{ kg/m}^3) * (0.001 \text{ m/m})$$

$$\tau_t = 0.20 \text{ kg/m}^2$$

Cálculo de la relación entre el esfuerzo tangencial crítico y de arrastre:

$$K = \sqrt{1 - \frac{\text{Sen}^2 \theta}{\text{Sen}^2 \phi}} \quad (54)$$

Ángulo del talud (ϕ):

$$\phi = \text{Arctan}\left(\frac{1}{z}\right)\left(\frac{180}{\pi}\right) \quad (55)$$

$$\phi = \text{Arctan}\left(\frac{1}{1}\right)\left(\frac{180}{\pi}\right)$$

$$\phi = 45^\circ$$

Reemplazando en la ecuación 54:

$$K = \sqrt{1 - \frac{\text{Sen}^2(30^\circ)}{\text{Sen}^2(45^\circ)}}$$

$$K = 0.7624$$

El esfuerzo máximo tangencial que resiste un grano de 51.99 mm colocado en el fondo es de:

$$\tau_p = \frac{d_{75}}{13} \quad (56)$$

$$\tau_p = \frac{2.60 \text{ mm}}{13}$$

$$\tau_p = 0.20 \text{ kg/m}^2$$

Cálculo de la base del canal dominante:

Reemplazando los valores en la ecuación 53:

$$b = \frac{3.6 \text{ m}^3/\text{s} * 0.018 \sqrt{0.001 \text{ m/m}} \left(\sqrt[3]{0.20 \text{ kg/m}^2}\right)^2 - 0.001 \text{ m/m} * 1 * (0.20 \text{ m}^2) \left(\sqrt[3]{0.20 \text{ kg/m}^2}\right)^2}{0.001 \text{ m/m} * (0.20 \text{ m}) \left(\sqrt[3]{0.20 \text{ kg/m}^2}\right)^2}$$

$$b = 10.04 \text{ m}$$

3.3. Procedimiento de Operación Hoja de Diseño Cauces Aluviales

A continuación, se detalla el procedimiento de operación de la hoja de diseño de cauces aluviales, con el fin de permitirle al usuario la utilización adecuada de esta herramienta.

Se recomienda tener en cuenta lo contemplado en el presente capítulo, con la finalidad de entender su adecuado funcionamiento.

1. Realizar el ingreso de los datos de entrada de acuerdo con las recomendaciones dadas con anterioridad.

Tabla 12. Datos de entrada de la hoja de diseño

VARIABLE	DESCRIPCIÓN	VALOR	UNIDAD	CONDICIÓN
g	Gravedad	9,806	m/s ²	Recomendado
c	Factor de conversión de unidades	1		Recomendado
t	Temperatura media del agua	10*	°C	Adoptado
ρ	Densidad del agua	999,8	Kg/m ³	Calculado
γ	Peso específico del agua	9804,04	N/m ³	Calculado
H	Altura total del canal	1*	m	Adoptado
TR 2.33 años	Relación de caudal TR 100 a TR 2.33 años	0,36*		Recomendado
n1	Coefficiente de rugosidad de Manning (Canal dominante)	0,018*		Adoptado
n2	Coefficiente de rugosidad de Manning (Canal valle)	0,035*		Adoptado
z	Talud izquierdo del canal (x:1)	1,0*	m/m	Adoptado
	Talud derecho del canal (x:1)	1,0*	m/m	Adoptado
Φ=α	Angulo del talud izquierdo	45,00	grados(°)	Calculado
	Angulo del talud derecho	45,00	grados(°)	Calculado
θ	Angulo de reposo para el material - talud izquierdo	30,00*	grados(°)	Adoptado
	Angulo de reposo para el material - lecho o fondo	30,00*	grados(°)	Adoptado
	Angulo de reposo para el material - talud derecho	30,00*	grados(°)	Adoptado
K	Relación entre el esfuerzo tangencial crítico y el de arrastre - talud izq	0,7624		Calculado
	Relación entre el esfuerzo tangencial crítico y el de arrastre - talud der	0,7624		Calculado
Kα	Factor de reducción del esfuerzo cortante crítico - talud izq	0,5082		Calculado
	Factor de reducción del esfuerzo cortante crítico - talud der	0,5082		Calculado

VARIABLE	DESCRIPCIÓN	VALOR	UNIDAD	CONDICIÓN
Ts	Tipo de sinuosidad	CANAL MUY SINUOSO*		Adoptado
Fs	Factor de sinuosidad	1,50		Calculado
b ó B	Ancho máximo definido como restricción	100*	m	Adoptado

*Las celdas en recuadro azul son los datos que se deben ingresar y/o seleccionar.

Tomado de: Propio

2. Dar clic en el primer botón de “cálculo de diámetro de partícula”, esperar hasta que se realice la respectiva iteración, a continuación, dar clic en el segundo botón “cálculo canal dominante” y esperar nuevamente hasta que se realice la respectiva iteración y finalmente dar clic en el tercer botón “cálculo canal valle” y esperar la última iteración.

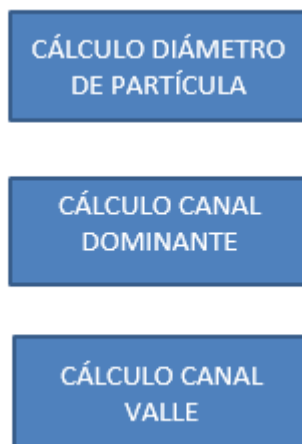


Figura 32 Botones de cálculo de la hoja de diseño

Tomado de: Propio

3. Automáticamente la hoja de diseño calculará todos los parámetros de que permitan finalmente obtener las fichas técnicas de las curvas de caracterización para el diseño de los cauces aluviales.

En las siguientes tablas, se muestran las secciones que hacen parte de la hoja de diseño tanto para el canal dominante como para el canal valle. En estas tablas se muestran los cálculos realizados para los tres canales; se recomienda explorar y revisar

las hojas de diseño anexas, en la cual se encuentran todos los cálculos realizados de las diferencias secciones hidráulicas calculadas.

Finalmente, en las gráficas 12,13 y 14 se pueden apreciar las fichas técnicas que contienen algunas curvas características que permiten con el caudal TR 100 años y la pendiente de diseño, determinar el ancho inferior del canal dominante y el ancho superior del canal valle.

Tabla 13. Primera sección de la hoja de diseño para el cálculo de la sección del canal dominante

VARIABLES DE ENTRADA			CHEQUEO ESTABILIDAD DEL CANAL POR EL MÉTODO DE LA FUERZA TRACTIVA (DATOS APLICAN PARA EL CÁLCULO DE GEOMETRÍA DEL CANAL VALLE)											
			ESFUERZO TANGENCIAL MÁXIMO QUE SE PRODUCE EN EL TALUD IZQUIERDO (Tt=To) (Kg/m2)	ESFUERZO TANGENCIAL MÁXIMO QUE SE PRODUCE EN EL FONDO (Tt=To) (Kg/m2)	ESFUERZO TANGENCIAL MÁXIMO QUE SE PRODUCE EN EL TALUD DERECHO (Tt=To) (Kg/m2)	PROFUNDIDAD HIDRÁULICA PROPORCIONAL (y1') (m)	DIAMETRO MÍNIMO DE LA PARTICULA, PASA 75% (d75) (mm)	FUERZA TRACTIVA PERMISIBLE REDUCIDA - TALUD IZQUIERDO (Tc = Tp) (Kg/m2)	FUERZA TRACTIVA PERMISIBLE REDUCIDA - LECHO O FONDO (Tc = Tp) (Kg/m2)	FUERZA TRACTIVA PERMISIBLE REDUCIDA - TALUD DERECHO (Tc = Tp) (Kg/m2)	VERIFICACIÓN	VERIFICACIÓN ESTABILIDAD TALUD IZQUIERDO DEL CANAL	VERIFICACIÓN ESTABILIDAD LECHO O FONDO DEL CANAL	VERIFICACIÓN ESTABILIDAD TALUD DERECHO DEL CANAL
CAUDAL TR 100 AÑOS (m3/s)	CAUDAL CANAL DOMINANTE TR 2.33 AÑOS (m3/s) PROMEDIO	PENDIENTE DEL CANAL (S) (m/m)	<i>V. sin error 308</i>											
10	3.600	0.0010	0.1520	0.2000	0.1520	0.20	2.60	0.1524	0.2000	0.1524	0.0000	ESTABLE	ESTABLE	ESTABLE
100	36.000	0.0100	2.2795	2.9994	2.2795	0.30	38.99	2.3233	2.9994	2.3233	0.0000	ESTABLE	ESTABLE	ESTABLE
800	288.000	0.0180	5.4709	7.1986	5.4709	0.40	93.58	5.5760	7.1986	5.5760	0.0000	ESTABLE	ESTABLE	ESTABLE

Tomado de: Propio

Tabla 14. Segunda sección de la hoja de diseño para el cálculo de la sección del canal dominante

CÁLCULOS DE GEOMETRÍA			CHEQUEO						
ANCHO INFERIOR DEL CANAL DOMINANTE (b) (m)	ANCHO INFERIOR DEL CANAL DOMINANTE (b) (m) GRÁFICO	PROFUNDIDAD HIDRÁULICA POR FLUJO UNIFORME (y1) (m)	ÁREA HIDRÁULICA (A) (m2)	PERÍMETRO MOJADO (P) (m)	RADIO HIDRÁULICO (Rh) (m)	ANCHO SUPERIOR DEL CANAL DOMINANTE (m)	VELOCIDAD MEDIA (V) (m/s)	CAUDAL PARA LA SECCIÓN OBTENIDA (Q) (m3/s)	VERIFICACIÓN
									<i>V. sin error 308</i>
10.0458	10.05	0.3866	4.0336	11.1394	0.3621	10.8191	0.8925	3.6001	-0.0001
21.0000	21.00	0.4910	10.7921	23.1956	0.4653	22.9638	3.3358	36.0000	0.0000
95.3981	95.40	0.5797	56.3098	99.0644	0.5684	98.8763	5.1146	288.0000	0.0000

Tomado de: Propio

Tabla 15. Primera sección de la hoja de diseño para el cálculo de la sección del canal valle

CAUDAL CANAL VALLE (m ³ /s) PROMEDIO	CÁLCULOS DE GEOMETRÍA			
	PROFUNDIDAD HIDRÁULICA PROPORCIONAL (y ^{2'}) (m)	PROFUNDIDAD HIDRÁULICA POR FLUJO UNIFORME (y ₂) (m)	ANCHO INFERIOR DEL CANAL VALLE (b) (m)	ANCHO INFERIOR DEL CANAL VALLE (b) (m) GRÁFICA
6.400	0.1221	0.28	57.9006	57.9006
64.000	0.2470	0.43	90.1779	90.1779
512.000	0.6583	0.78	200.9213	200.9213

Tomado de: Propio

Tabla 16. Segunda sección de la hoja de diseño para el cálculo de la sección del canal valle

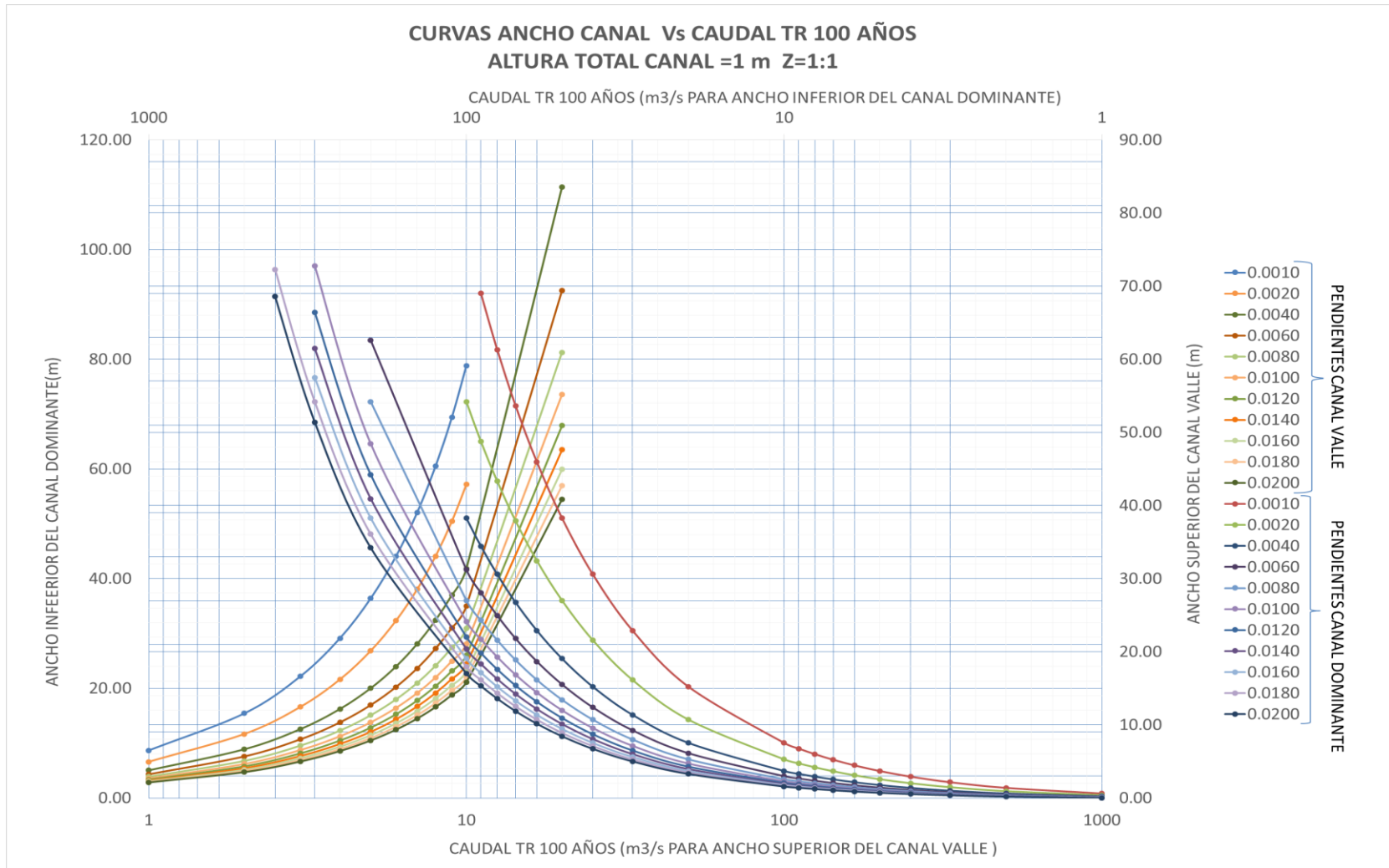
ÁREA HIDRÁULICA (A) (m ²)	PERÍMETRO MOJADO (P) (m)	RADIO HIDRÁULICO (Rh) (m)	ESPEJO DE AGUA (T) (m)	VELOCIDAD MEDIA (V) (m/s)	BORDE LIBRE (BL) (m)										ANCHO SUPERIOR DEL CANAL VALLE (B) (m)	ANCHO SUPERIOR DEL CANAL VALLE (B) (m) GRÁFICO	PROFUNDIDAD HIDRÁULICA TOTAL (y) (m)
					MÉTODO 1.		MÉTODO 2.	MÉTODO 3.	MÉTODO 4.	MÉTODO 5.			BORDE LIBRE MÍNIMO (m)	BORDE LIBRE TOTAL (m)			
					C calculado	BL (m)				No. Froude	Tipo de flujo	BL					
16.5049	58.7029	0.2812	58.4679	0.3878	1.612	0.491	0.20	0.794	0.161	0.178	SUBCRITICO	0.300	0.491	0.330	59.13	59.13	0.670
39.4351	92.1149	0.4281	91.9104	1.6229	2.500	0.762	0.30	1.205	0.244	0.605	SUBCRITICO	0.597	0.762	0.576	94.21	94.21	0.924
158.8005	205.8623	0.7714	205.6087	3.2242	2.500	0.762	0.39	1.757	0.394	0.947	SUBCRITICO	0.600	0.762	0.639	209.44	209.44	1.361

Tomado de: Propio

Tabla 17. Tercera sección de la hoja de diseño para el cálculo de la sección del canal valle

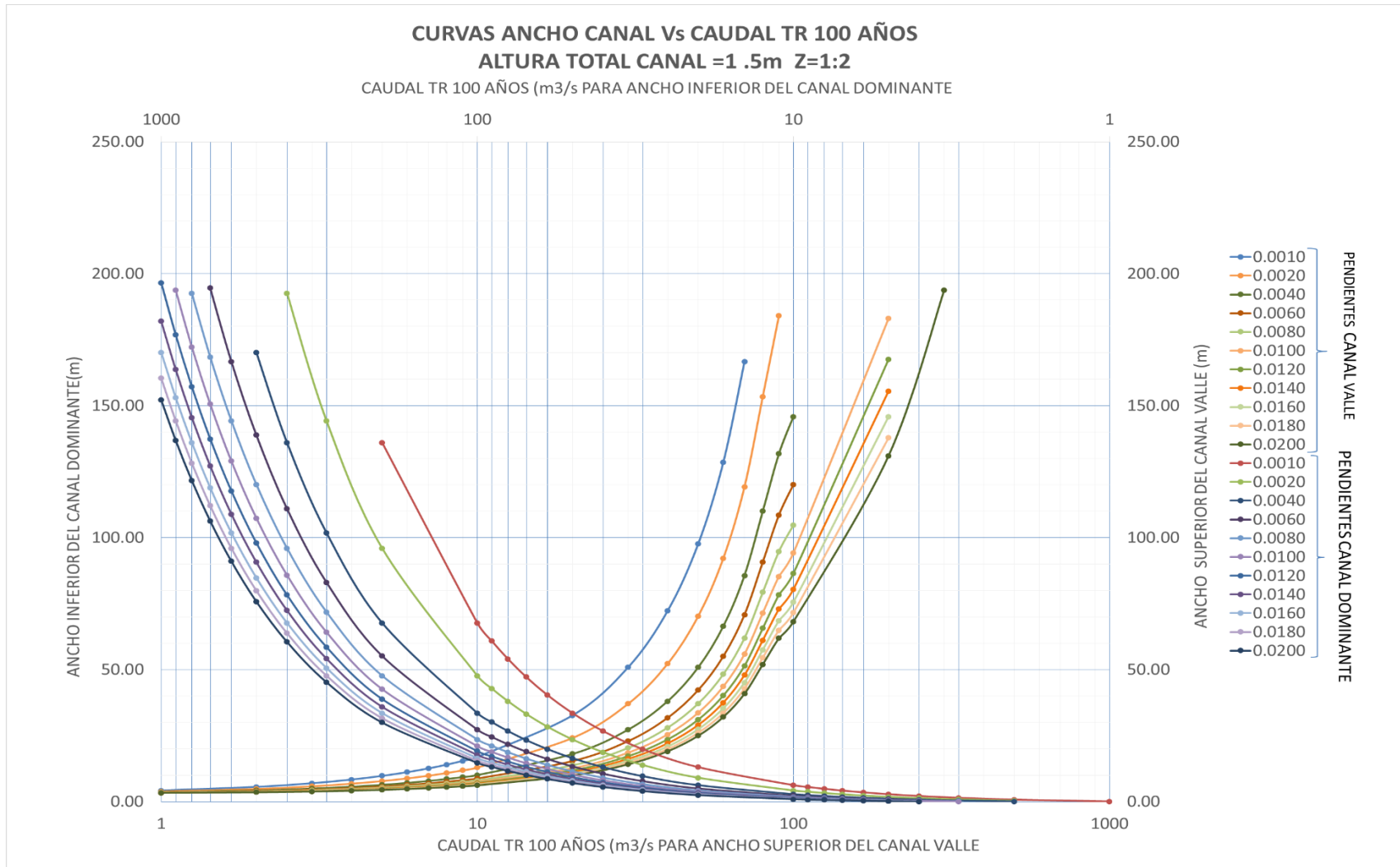
VERIFICACIÓN ALTURA TOTAL DEL CANAL (H) (m)	CAUDAL PARA LA SECCIÓN OBTENIDA (Q) (m ³ /s)	VERIFICACIÓN
		<i>V. sin error 228</i>
1.00	6.40	0.0000
1.50	64.00	-0.0005
2.00	512.00	0.0000

Tomado de: Propio



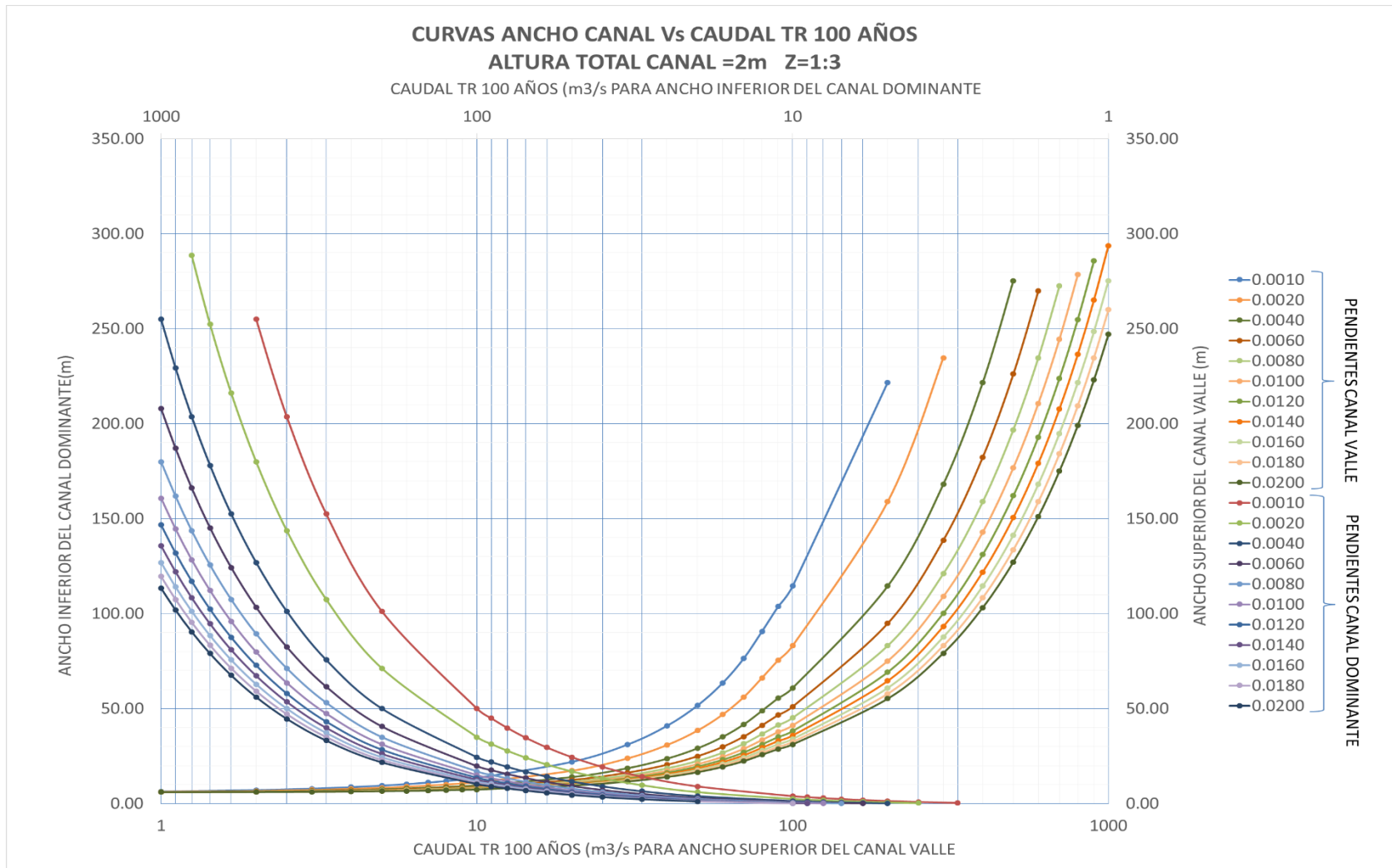
Gráfica 12. Curvas ancho canal (dominante y valle) Vs Caudal TR 100 años H=1m

Tomado de: Propio



Gráfica 13. Curvas ancho canal (dominante y valle) Vs Caudal TR 100 años H=1.5m

Tomado de: Propio



Gráfica 14. Curvas ancho canal (dominante y valle) Vs Caudal TR 100 años H=2m

Tomado de: Propio

3.4. Valores Permisibles de Velocidades Máximas y Fuerzas Tractivas Unitarias.

En 1925, Fortier y Scobey publicaron la muy conocida tabla de “Velocidades permisibles en canales”, que se muestra en la Tabla 18. Los valores mostrados en esta tabla corresponden a canales por los que han pasado muchos periodos hidrológicos, colocados en pequeñas pendientes y para profundidades de flujo menores que 3 pies. La tabla también muestra los valores de n apropiados para diferentes materiales y los valores convertidos para las fuerzas tractivas permisibles correspondientes.

Tabla 18. Velocidades máximas permisibles y fuerzas tractivas unitarias – canales rectos

Material	n	Agua limpia		Agua con limos coloidales	
		V (m/s)	τ (N/m ²)	V (m/s)	τ (N/m ²)
Arenas finas, no coloidales	0.02	0.457	1.29	0.762	3.59
Franco arenoso, no coloidal	0.02	0.533	1.77	0.762	3.59
Franco limoso, no coloidal	0.02	0.61	2.3	0.914	5.27
Limos Aluviales, no coloidal	0.02	0.61	2.3	1.07	7.18
Tierra negra firme común	0.02	0.762	3.59	1.07	7.18
Ceniza volcánica	0.02	0.762	3.59	1.07	7.18
Arcilla dura, muy coloidal	0.025	1.14	12.4	1.52	22
Limos aluviales, coloidales	0.025	1.14	12.4	1.52	22
Pizarra y tepetate	0.025	1.83	32.1	1.83	32.1
Grava fina	0.02	0.762	3.59	1.52	15.3
Tierra negra graduada a piedritas cuando no es coloidal	0.03	1.14	18.2	1.52	31.6
Limos graduados a piedritas cuando es coloidal	0.03	1.22	20.6	1.68	38.3
Grava gruesa no coloidal	0.025	1.22	14.4	1.83	32.1
Piedritas y ripio	0.035	1.52	43.6	1.68	52.7

Tomado de: Hidráulica de canales abiertos – Ven Te Chow

Las velocidades máximas permisibles mencionadas arriba se refieren a canales rectos. Para canales sinuosos, las velocidades deben ser más bajas para reducir la socavación. Algunos porcentajes de reducción sugeridos por Lane son 5% para canales ligeramente sinuosos, 13% para canales moderadamente sinuosos y 22% para canales muy sinuosos. Sin embargo, estos valores de porcentajes son muy aproximados debido a que no existen datos exactos en el presente. (Hidráulica de canales – Ven Te Chow, 1994, p. 163 - 164)

En la siguiente tabla se pueden apreciar los valores de velocidades máximas permisibles y fuerzas tractivas unitarias para canales muy sinuosos con un porcentaje de reducción del 22% de acuerdo a las sugerencias dadas por el Ven Te Chow. Estos valores se tomarán de referencia para la verificación del primer y segundo canal que son canales muy sinuosos. Teniendo en cuenta los coeficientes de rugosidad asumidos de los canales y el transporte de agua con limos coloidales, para el canal dominante se seleccionan los valores de referencia para canales en grava fina y para el canal valle se seleccionan los valores para canales en piedritas y ripio.

Tabla 19. Velocidades máximas permisibles y fuerzas tractivas unitarias – canales muy sinuosos

Material	n	Agua limpia		Agua con limos coloidales	
		V (m/s)	τ (N/m ²)	V (m/s)	τ (N/m ²)
Arenas finas, no coloidales	0.02	0.36	1.01	0.59	2.80
Franco arenoso, no coloidal	0.02	0.42	1.38	0.59	2.80
Franco limoso, no coloidal	0.02	0.48	1.79	0.71	4.11
Limos Aluviales, no coloidal	0.02	0.48	1.79	0.83	5.60
Tierra negra firme común	0.02	0.59	2.80	0.83	5.60
Ceniza volcánica	0.02	0.59	2.80	0.83	5.60
Arcilla dura, muy coloidal	0.025	0.89	9.67	1.19	17.16
Limos aluviales, coloidales	0.025	0.89	9.67	1.19	17.16
Pizarra y tepetate	0.025	1.43	25.04	1.43	25.04
Grava fina	0.02	0.59	2.80	1.19	11.93
Tierra negra graduada a piedritas cuando no es coloidal	0.03	0.89	14.20	1.19	24.65
Limos graduados a piedritas cuando es coloidal	0.03	0.95	16.07	1.31	29.87
Grava gruesa no coloidal	0.025	0.95	11.23	1.43	25.04
Piedritas y ripio	0.035	1.19	34.01	1.31	41.11

Tomado de: Propio

De igual forma, en la siguiente tabla se pueden apreciar los valores de velocidades máximas permisibles y fuerzas tractivas unitarias para canales moderadamente sinuosos con un porcentaje de reducción del 13% de acuerdo a las sugerencias dadas por el Ven Te Chow. Estos valores se tomarán de referencia para la verificación del tercer canal. Teniendo en cuenta los coeficientes de rugosidad asumidos de los canales y el transporte de agua con limos coloidales, para el canal dominante se seleccionan los valores de referencia para

canales en grava fina y para el canal valle se seleccionan los valores para canales en piedritas y ripio.

Tabla 20. Velocidades máximas permisibles y fuerzas tractivas unitarias – canales moderadamente sinuosos

Material	n	Agua limpia		Agua con limos coloidales	
		V (m/s)	τ (N/m ²)	V (m/s)	τ (N/m ²)
Arenas finas, no coloidales	0.02	0.40	1.12	0.66	3.12
Franco arenoso, no coloidal	0.02	0.46	1.54	0.66	3.12
Franco limoso, no coloidal	0.02	0.53	2.00	0.80	4.58
Limos Aluviales, no coloidal	0.02	0.53	2.00	0.93	6.25
Tierra negra firme común	0.02	0.66	3.12	0.93	6.25
Ceniza volcánica	0.02	0.66	3.12	0.93	6.25
Arcilla dura, muy coloidal	0.025	0.99	10.79	1.32	19.14
Limos aluviales, coloidales	0.025	0.99	10.79	1.32	19.14
Pizarra y tepetate	0.025	1.59	27.93	1.59	27.93
Grava fina	0.02	0.66	3.12	1.32	13.31
Tierra negra graduada a piedritas cuando no es coloidal	0.03	0.99	15.83	1.32	27.49
Limos graduados a piedritas cuando es coloidal	0.03	1.06	17.92	1.46	33.32
Grava gruesa no coloidal	0.025	1.06	12.53	1.59	27.93
Piedritas y ripio	0.035	1.32	37.93	1.46	45.85

Tomado de: Propio

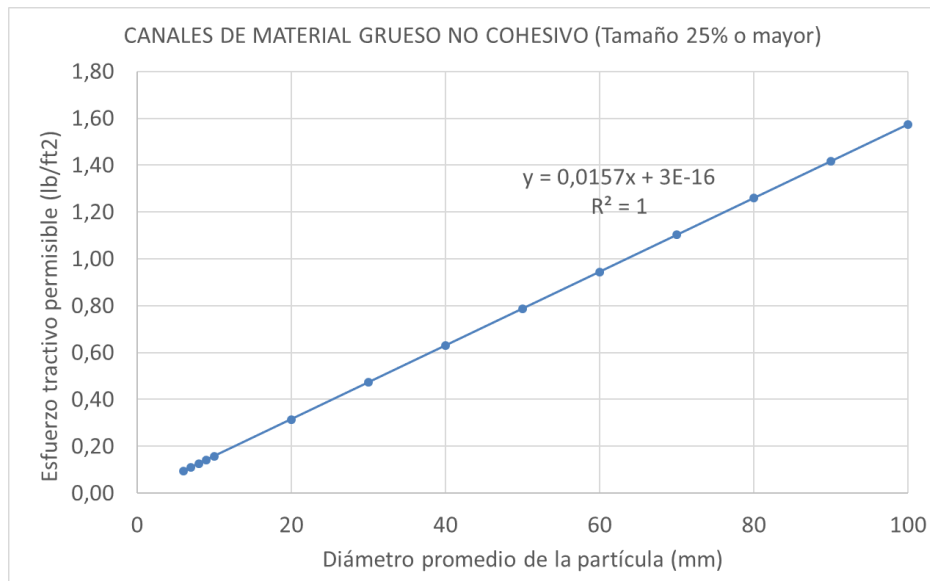
A continuación se presentan unos valores de referencia de fuerzas tractivas permisibles recomendadas, de acuerdo al diámetro promedio de la partícula (mm) Shields d50, Lane d75:

Tabla 21. Fuerzas tractivas permisibles recomendadas

Diámetro promedio de la partícula (mm) Shields d50, Lane d75	Canales de material grueso no cohesivo (tamaño 25% o mayor) (lb/ft ²)	Canales de material grueso no cohesivo (tamaño 25% o mayor) (kg/m ²)
0,1	0,001	0,006
0,2	0,003	0,014
0,3	0,005	0,023
0,4	0,006	0,031
0,5	0,008	0,039
0,6	0,010	0,047
0,7	0,011	0,056
0,8	0,013	0,064
0,9	0,015	0,072
1	0,016	0,080

Diámetro promedio de la partícula (mm) Shields d50, Lane d75	Canales de material grueso no cohesivo (tamaño 25% o mayor) (lb/ft ²)	Canales de material grueso no cohesivo (tamaño 25% o mayor) (kg/m ²)
2	0,033	0,163
3	0,050	0,245
4	0,067	0,327
5	0,084	0,409
6	0,101	0,492
7	0,118	0,574
8	0,134	0,656
9	0,151	0,739
10	0,168	0,821
20	0,337	1,644
30	0,505	2,467
40	0,674	3,289
50	0,842	4,112
60	1,011	4,935
70	1,179	5,758
80	1,348	6,581
90	1,517	7,404
100	1,685	8,227

Tomado de: Apuntes Escuela Colombiana de Ingeniería



Gráfica 15. Esfuerzo tractivo permisible de canales de material grueso no cohesivo (tamaño 25% o mayor)

Tomado de: Apuntes Escuela Colombiana de Ingeniería

Capítulo IV

Diseño geométrico horizontal y sinuoso de cauces aluviales

De acuerdo con los parámetros de diseño geométrico horizontal y sinuoso descritos en el subcapítulo 1.2.5, para cada uno de los canales diseñados, a continuación, se anexan los resultados de los cálculos realizados. Para mayor detalle, se puede tener revisar la hoja de diseño anexa al presente proyecto de grado.

Tabla 22. Diseño geométrico horizontal y sinuoso del primer canal

Parámetros	Lc(m)	1000	Longitud de la llanura o del eje del Valle	
	s	1.50*	Índice de Sinuosidad	
	Lr(m)	1500.00	Longitud del río (Lc*s)	
	B(m)	47.08150562	Amplitud de onda en Valle: Llanura menos base del canal	
	B'(m)	223.67	Amplitud de onda para el diseño	
	Rc(m)		39.3	Rc=0.26*Lb(Williams G.P 1986)
			22.21	Rc=0.22*Lm(Williams G.P 1986)
			30.7	Rc medio
		25*	Radio de curvatura característico de los meandros a utilizar en el diseño.	
Función objetivo para resolver Alpha	α	0.444	Ángulo de deflexión de onda en radianes	
	α Semilla	0.445*	Cambiando la celda en (radianes)	
	α Val	-0.001	Resolver para: asem-aval=0(radianes)	
Resultados	α Grados	25.44	Ángulo de deflexión de la onda en grados.	
	n	9.9	Número de ondas	
	H (m)	229.3	Hipotenusa	
	Lm(m)	100.9	Longitud de onda	
	Lm(m)	101.0	Longitud de onda (Verificación)	
	Lb(m)	151.12	Longitud hidráulica de la onda	
	Lb(m)	151.42	Longitud hidráulica de la onda (Verificación)	
	Lr(m)	1500.00	Longitud del río (Verificación)	
	La(m)	8.30	Longitud de aproximación de elementos circulares	
Atributos para el dibujo	b(m)	10.81906976*	Base superior en corona del canal para el caudal dominante Tr:2.33 yr	
	b Llanura (m)	57.90057538*	Base inferior del canal para el caudal máximo sin huella de corona o paso de vía.	
	c(m)	110.5		
	θ rad	2.70	Ángulo del sector circular para Rc en radianes	
	θ	154.50	Ángulo del sector circular para Rc en grados	
	Lm/4(m)	25	Longitud de onda fraccionada en 4 partes	
	Lc*(Lm/4)	40	Subdivisiones del eje del valle suavizado	

*Los parámetros de las casillas azules son los que se deben ingresar a la tabla de cálculo.

Tomado de: Propio

Tabla 23. Diseño geométrico horizontal y sinuoso del segundo canal

Parámetros	Lc(m)	1000	Longitud de la llanura o del eje del Valle
	s	1.50*	Índice de Sinuosidad
	Lr(m)	1500.00	Longitud del río (Lc*s)
	B(m)	67.21405122	Amplitud de onda en Valle: Llanura menos base del canal
	B'(m)	118.54	Amplitud de onda para el diseño
	Rc(m)	52.5	Rc=0.26*Lb(Williams G.P 1986)
		29.60	Rc=0.22*Lm(Williams G.P 1986)
		41.0	Rc medio
25*		Radio de curvatura característico de los meandros a utilizar en el diseño.	
Función objetivo para resolver Alpha	α	1.032	Ángulo de deflexión de onda en radianes
	α Semilla	1.032118604*	Cambiando la celda en (radianes)
	α Val	0.000	Resolver para: asem-aval=0(radianes)
Resultados	α Grados	59.14	Ángulo de deflexión de la onda en grados.
	n	7.4	Número de ondas
	H (m)	136.3	Hipotenusa
	Lm(m)	134.5	Longitud de onda
	Lm(m)	134.5	Longitud de onda (Verificación)
	Lb(m)	201.82	Longitud hidráulica de la onda
	Lb(m)	201.80	Longitud hidráulica de la onda (Verificación)
	Lr(m)	1500.00	Longitud del río (Verificación)
	La(m)	48.16	Longitud de aproximación de elementos circulares OK
Atributos para el dibujo	b(m)	22.96382242*	Base superior en corona del canal para el caudal dominante Tr:2.33 yr
	b Llanura (m)	90.17787364*	Base inferior del canal para el caudal máximo sin huella de corona o paso de vía.
	c(m)	44.1	
	θ rad	2.11	Ángulo del sector circular para Rc en radianes
	θ	120.86	Angulo del sector circular para Rc en grados
	Lm/4(m)	34	Longitud de onda fraccionada en 4 partes
	Lc*(Lm/4)	30	Subdivisiones del eje del valle suavizado

*Los parámetros de las casillas azules son los que se deben ingresar a la tabla de cálculo.

Tomado de: Propio

Tabla 24. Diseño geométrico horizontal y sinuoso del tercer canal

Parámetros	Lc(m)	1000	Longitud de la llanura o del eje del Valle
	s	1.15*	Índice de Sinuosidad
	Lr(m)	1150.00	Longitud del río (Lc*s)
	B(m)	102.0449527	Amplitud de onda en Valle: Llanura menos base del canal
	B'(m)	134.63	Amplitud de onda para el diseño
	Rc(m)	115.9	Rc=0.26*Lb(Williams G.P 1986)
		85.32	Rc=0.22*Lm(Williams G.P 1986)
		100.6	Rc medio
75*		Radio de curvatura característico de los meandros de la cuenca a utilizar en el diseño.	
Función objetivo para resolver alpha	α	1.928	Ángulo de deflexión de onda en radianes
	α Semilla	1.928232432*	Cambiando la celda en (radianes)
	α Val	0.000	Resolver para: asem-aval=0(radianes)
Resultados	α Grados	110.47	Ángulo de deflexión de la onda en grados.
	n	2.6	Número de ondas
	H (m)	236.1	Hipotenusa
	Lm(m)	387.8	Longitud de onda
	Lm(m)	387.9	Longitud de onda (Verificación)
	Lb(m)	445.94	Longitud hidráulica de la onda
	Lb(m)	445.99	Longitud hidráulica de la onda (Verificación)
	Lr(m)	1150.00	Longitud del río (Verificación)
	La(m)	131.99	Longitud de aproximación de elementos circulares OK
Atributos para el dibujo	b(m)	98.87629982*	Base superior en corona del canal para el caudal dominante Tr:2.33 yr
	b Llanura (m)	200.9212525*	Base inferior del canal para el caudal máximo sin huella de corona o paso de vía.
	c(m)	52.0	
	θ rad	1.21	Ángulo del sector circular para Rc en radianes
	θ	69.52	Ángulo del sector circular para Rc en grados
	Lm/4(m)	97	Longitud de onda fracionada en 4 partes
	Lc*(Lm/4)	11	Subdivisiones del eje del valle suavizado

*Los parámetros de las casillas azules son los que se deben ingresar a la tabla de cálculo.

Tomado de: Propio

4.1. Trazado de ejes y construcción de modelo Civil 3D

A continuación, se describe el procedimiento para realizar el trazado de los ejes del valle y del canal sinuoso o canal dominante, así como la construcción del modelo en Autocad Civil 3D.

- Se procede a definir una superficie con la ubicación de 4 puntos a diferentes alturas, con el fin de implantar sobre esta los trazados del canal valle y sinuoso.
- Dibujar el eje del valle en este caso 1 km, y con el ancho disponible del valle hacer un eje auxiliar a ambos lados.
- Realizar el mismo procedimiento para los ejes del talud para el valle teniendo en cuenta la sección de diseño.
- Generar el eje sinuoso del canal dominante, para esto se deben tener en cuenta los elementos geométricos de la onda, longitud y amplitud de la onda. Estos valores permitirán el dibujo de los ejes directrices de cada onda a lo largo del eje del valle.
- Con la herramienta sample lines crear los ejes directrices de las ondas sobre el eje del valle.
- Una vez realizado el dibujo de las samples lines, quitar las etiquetas para una mejor comprensión del dibujo y generar un nuevo alineamiento. Se deben definir las características de radio seleccionado en la hoja de diseño de sinuosidad, también el tipo de curva como clotoide.
- Con los parámetros de radio y tipo de curva seleccionar el dibujo de eje con curvas, el dibujo de cada onda se debe realizar partiendo desde el punto inicial y se debe restringir el punto PI de curva en el extremo de la línea definida por B' hasta completar el dibujo sobre todo el eje del valle.
- La metodología desarrollada por (W.R.A.P y F.D.V.A.) se basa en un eje recto, que para el caso del presente proyecto de grado, el eje del valle es recto sin ningún tipo de sinuosidad.
- Partiendo del archivo donde se definió el MDT para la superficie copiar los ejes de centro y offset del valle, desde el archivo donde se definió el trazado sinuoso.
- A continuación se procede a generar el perfil del terreno sobre el eje del valle.
- Se añaden las etiquetas estación elevación para definir las cotas de inicio y fin del eje del valle, sobre el perfil, estas cotas se toman de la hoja de diseño donde se analizan las secciones de inicio y fin del realineamiento.

- Con los datos de cortar en el perfil se dibuja el fondo del valle con la herramienta dibujar perfil desde el menú home, profile, profile creation tools. Esta herramienta funciona igual que la utilizada para el dibujo de alineamientos en planta pero aplicada a los perfiles, sirve para dibujar perfiles en un Profile View y es útil para trazar los fondos del canal.
- Se dibuja el fondo del valle definido con los puntos de inicio y fin etiquetados anteriormente.
- Se dibuja con una poli-línea continua la geometría correspondiente al valle de creciente. Se deben tener en cuenta los taludes, alturas y anchos, todo en escala 1:1.
- Esta sección es la superficie de corte del terreno para definir el corredor para el valle, asimismo, las condiciones límites de las zonas de corte y relleno. Es importante verificar todas las dimensiones.
- Crear “sub-Assembly” y Assembly. Un “assembly” es un elemento que define el eje de una sección típica (sub-Assembly) utilizada para cortar el terreno siguiendo un eje establecido, en este caso el fondo del valle. Para definir estos elementos debemos definir la geometría de la sección y crear el sub-Assembly y asignarlo a un Assembly.
- En el menú home, créate design, seleccionamos Assembly la nombramos por ejemplo Secc_Valle_V1.
- En el menú home, créate design, seleccionamos el menú desplegable y seleccionamos la opción “Create Subassembly from a polyline”.
- Definir los códigos para la sub_assembly. Los códigos permiten tener control sobre las líneas de corte que se van generando cuando la Sección transversal se mueve y corta el modelo TIN sobre el Eje definido. Es importante definirlos para tener certeza en la generación de la superficie TIN a partir del corredor del valle.

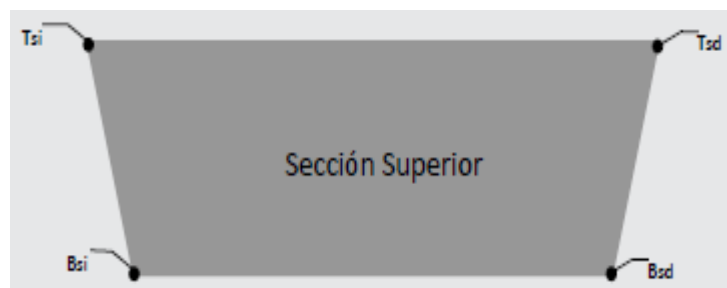


Figura 33 Definición de puntos “code” para la sección del valle

Tomado de: Apuntes ECI

Nomenclatura:

Bsd: Base Superior Derecha

Bsi: Base Superior Izquierda

Tsd: Talud Superior Derecho

Tsi: Talud Superior Izquierdo

- Para asignar los códigos debe seleccionarse en primer lugar el elemento Sub-Assembly, luego presionar clic derecho y seleccionar Add Code, en la barra de comandos aparecen las diferentes opciones, se ingresa el nombre del código, seleccionar Point y finalmente asignar el código al punto correspondiente.
- Seleccionar la Sub-assembly y con el botón derecho del mouse seleccionar "addtoAssembly".
- La definición de corredor requiere de varios elementos: Una Superficie TIN, un alineamiento en planta, un Alineamiento en Perfil y una Sección transversal (puede tener varios elementos).
- Partiendo del archivo donde se definió el corredor para el Valle importar los ejes principales para cauce sinuoso y sus respectivos ejes Offset.
- Copiar los ejes de centro y offset, del cauce sinuoso, desde el archivo donde se definió el trazado sinuoso.
- En la pestaña Profile seleccionar la opción generar Perfil y generar el perfil del terreno sobre el eje del valle.
- Localizar las cotas de inicio y fin del cauce sinuoso de acuerdo al procedimiento anterior con el cauce del valle.
- Al igual dibujar el fondo del cauce sinuoso en el perfil del cauce sinuoso.
- Dibujar la sección definida para el cauce sinuoso, dibujo de la base.
- Crear "sub-Assembly" y Assembly para el canal dominante.
- Definir los códigos para la sub_assembly del canal dominante.
- Generar el corredor para el cauce sinuoso del canal dominante.
- Partiendo del corredor generado para el valle se realiza la exportación de los objetos que lo componen a un nuevo archivo que incluya las líneas de corte definidas anteriormente.
- Añadir todas las líneas de corte definidas, esto garantiza que se exporten todos los límites de corredor.
- Seleccionar la ruta para guardar el archivo, posteriormente abrirlo en ACAD.

- Realizar el mismo procedimiento para el canal sinuoso.
- Generar el contorno del corredor del eje del valle y del cauce sinuoso.
- Copiar y pegar el borde del corredor del cauce sinuoso en el archivo donde se exportaron las líneas del valle y recortar el valle.
- En el mismo archivo pegar los elementos que componen el cauce principal en el mismo archivo.
- Se recomienda que los elementos se encuentren en una misma capa, se deben eliminar los triángulos interpolados que no hagan parte del canal.
- Se debe seleccionar el estilo de modo tal que se muestren los triángulos y poder realizar la edición del TIN.

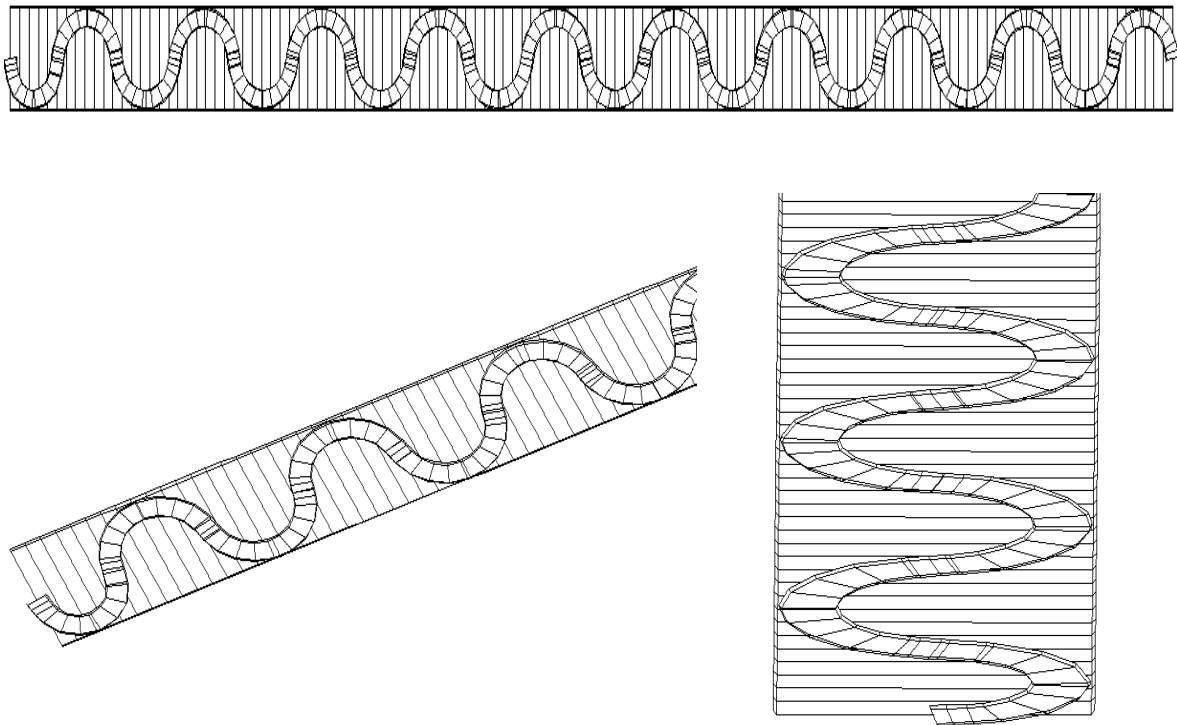


Figura 34 Trazado sinuoso primer canal – AutoCAD Civil 3D

Tomado de: Propio

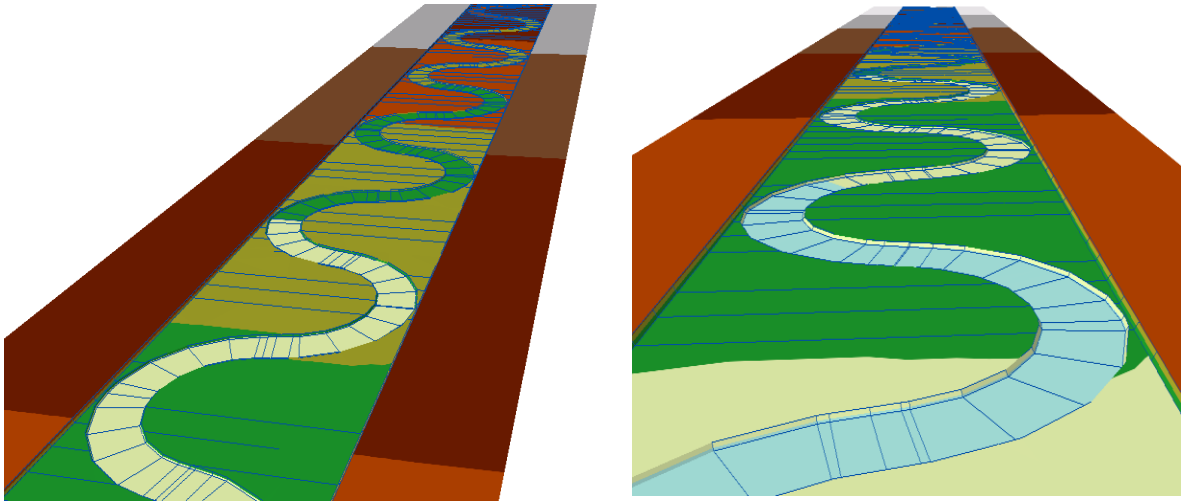


Figura 35 Trazado sinuoso primer canal – ArcGIS

Tomado de: Propio

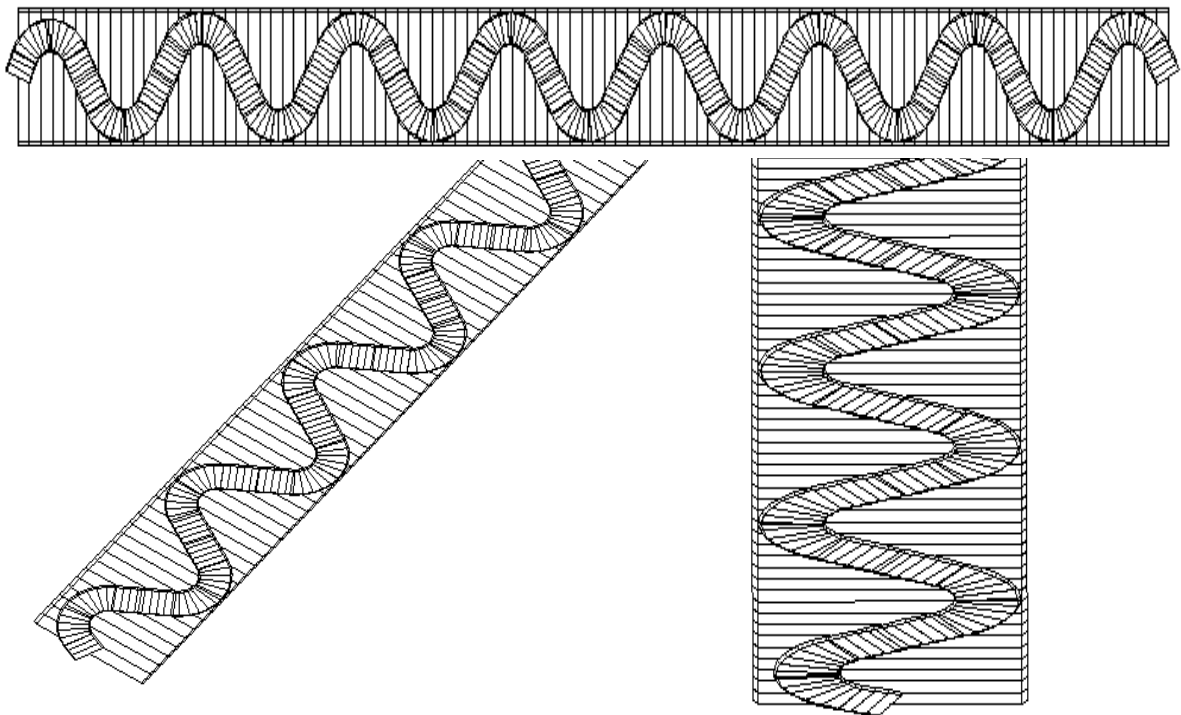


Figura 36 Trazado sinuoso segundo canal – AutoCAD Civil 3D

Tomado de: Propio

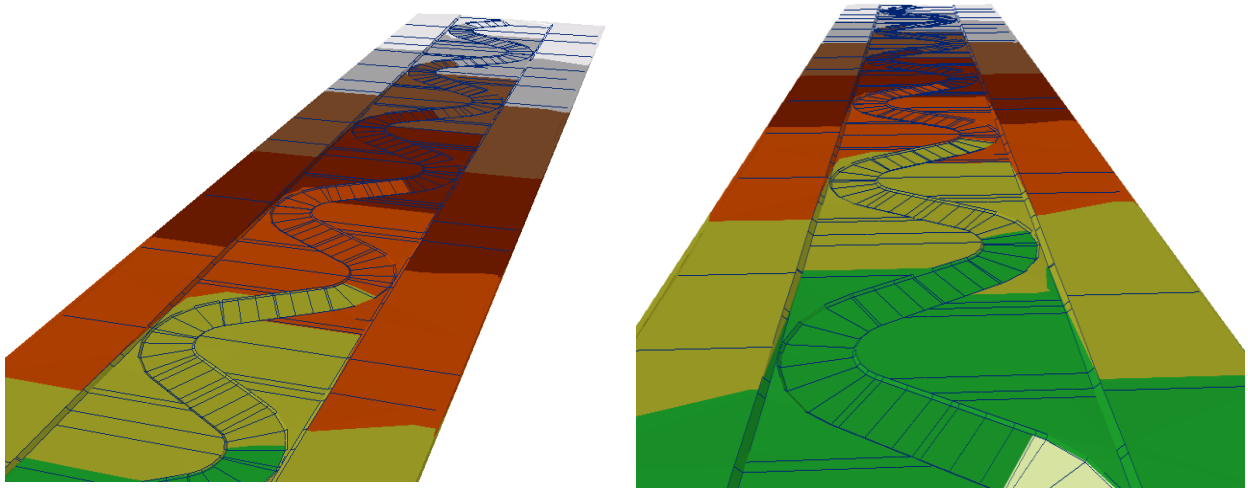


Figura 37 Trazado sinuoso segundo canal – ArcGIS

Tomado de: Propio

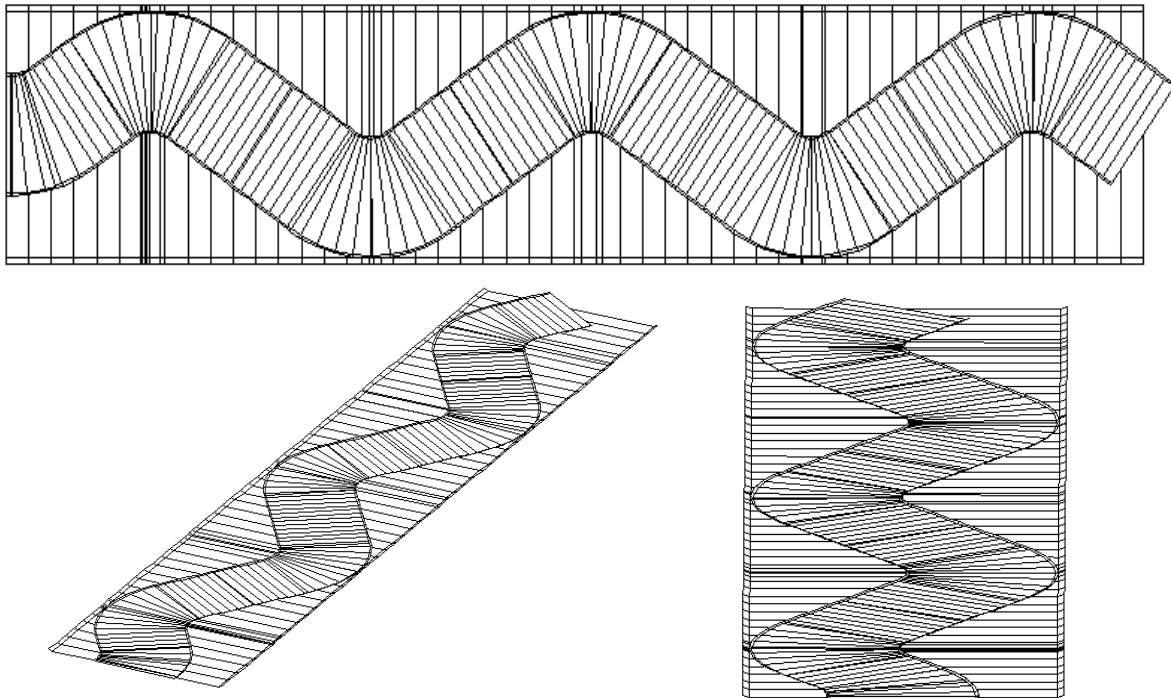


Figura 38 Trazado sinuoso tercer canal – AutoCAD Civil 3D

Tomado de: Propio

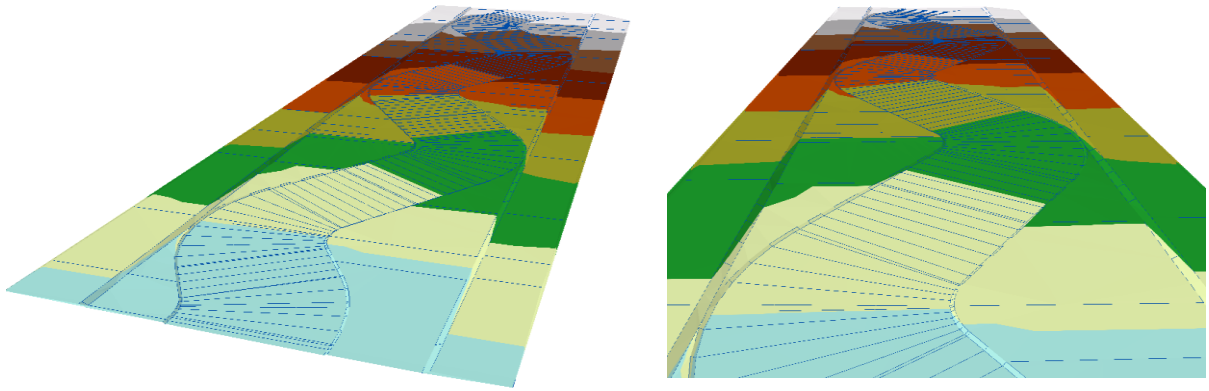


Figura 39 Trazado sinuoso tercer canal – ArcGIS

Tomado de: Propio

Capítulo V

Diseño hidráulico secciones canales diseñados

Para la verificación hidráulica del diseño de los canales artificiales, aluviales y sinuosos diseñados en la anterior actividad, se presenta la siguiente metodología:

A continuación, se modelará hidráulicamente, en estado permanente, los canales artificiales diseñados mediante las fichas técnicas de diseño para evaluar el comportamiento hidráulico de los diseños realizados, tanto por flujo uniforme como por el método de la fuerza tractiva, con el fin de efectuar el análisis de borde libre, velocidades y esfuerzos cortantes.

5.1. Diseño Hidráulico Primer Canal.

Tabla 25. Datos de diseño primer canal

Parámetro		Datos	
TR	Periodo de retorno	Dominante (años)	Creciente (años)
		2.33	100
Qd	Caudal de diseño (m ³ /s)	3.60	10
T	Temperatura media del agua °C	10	
d₇₅	Tamaño de partícula del material del lecho para que la sección sea estable (mm)	2.60	
n	Rugosidad del diseño	Canal dominante	Valle
		0.018	0.035
Z	Taludes de diseño	1:1	
Lv	Longitud del valle (m)	1000	
Lr	Longitud del río (m)	1500	
S	Pendiente longitudinal (m/m)	0.001	
T	Ancho Máximo disponible (m)	100	
θ	Ángulo de reposo del material (°)	30	
H	Altura total del canal (m)	1	

Tomado de: Propio

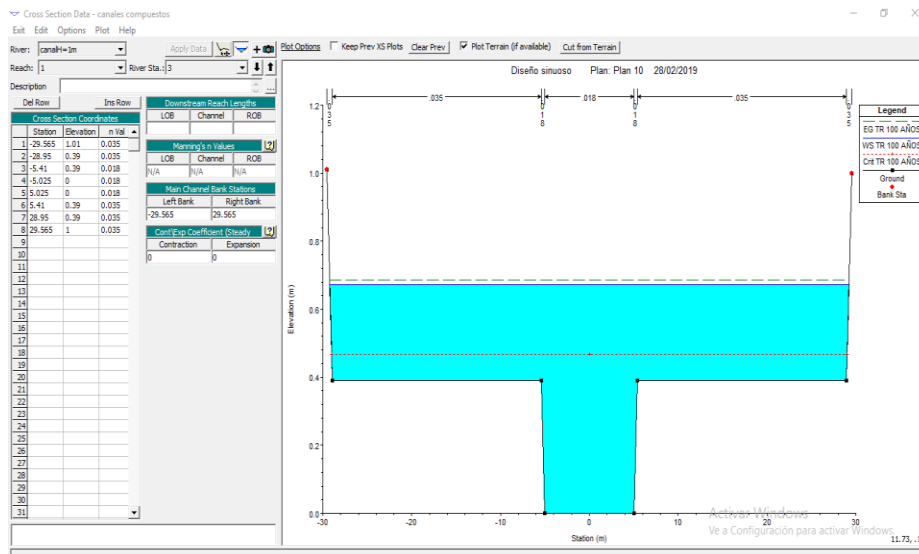


Figura 42. Sección transversal primer canal aguas abajo – flujo uniforme

Tomado de: Propio

Profile Output Table - Standard Table 1

File Options Std. Tables Locations Help

HEC-RAS Plan: Plan 10 River: canalH=1m Reach: 1 Profile: TR 100 AÑOS

Reach	River Sta	Profile	Q Total (m ³ /s)	Min Ch El (m)	W.S. Elev (m)	Crit W.S. (m)	E.G. Elev (m)	E.G. Slope (m/m)	Vel Chnl (m/s)	Flow Area (m ²)	Top Width (m)	Froude # Chl	Shear Total (N/m ²)
1	4	TR 100 AÑOS	10.00	0.10	0.77	0.56	0.79	0.001000	0.49	20.55	58.47	0.26	3.41
1	3	TR 100 AÑOS	10.00	0.00	0.67	0.47	0.69	0.001001	0.49	20.55	58.47	0.26	3.42

Figura 43. Resultados primer canal – flujo uniforme

Tomado de: Propio

Tabla 26. Cálculo flujo uniforme para sección compuesta – primer canal

No. sección	Área (m ²)	Perímetro (m)	Radio hidráulico (m)	(Radio hidráulico (m)) 2/3	Coefficiente de manning (n)	Conductividad (k)	Pendiente (m/m)	Velocidad (m/s)	Caudal (m ³ /s)
1	0.04	0.40	0.10	0.22	0.035	0.25	0.001	0.20	0.01
2	6.68	23.54	0.28	0.43	0.035	82.37	0.001	0.39	2.60
3	0.18	0.55	0.34	0.48	0.018	4.96	0.001	0.85	0.16
4	6.73	10.05	0.67	0.77	0.018	286.53	0.001	1.35	9.06
5	0.18	0.55	0.34	0.48	0.018	4.96	0.001	0.85	0.16
6	6.68	23.54	0.28	0.43	0.035	82.37	0.001	0.39	2.60
7	0.04	0.40	0.10	0.22	0.035	0.25	0.001	0.20	0.01
	20.54					461.70		0.71	14.60

Tomado de: Propio

De acuerdo con los resultados obtenidos mediante la modelación hidráulica del primer canal por flujo uniforme, se pudo evidenciar que la profundidad hidráulica total y el borde libre calculado coinciden con los calculados en la hoja de diseño. Se evidencia que la velocidad promedio calculada en el modelo hidráulico es de 0.49 m/s y la fuerza tractiva promedio es de 3.41 N/m². Según la verificación por flujo uniforme y los valores máximos permisibles, este diseño sí cumple con la velocidad y cortante máximo.

5.1.2. Verificación sección primer canal – método fuerza tractiva.

El procedimiento de cálculo del método de fuerza tractiva se explica en el numeral 3.2. Así mismo los resultados se evidencian desde la tabla No. 13 hasta la tabla No. 17. A continuación, por medio del software de modelación hidráulica HEC-RAS V 5.0.3, se realizará la verificación de la sección del canal diseñado por el método de la fuerza tractiva, con el fin de verificar su capacidad, profundidad hidráulica, borde libre y diámetro de la partícula. La verificación en HEC-RAS solo se realiza para evidenciar que el procedimiento de cálculo fue correcto en la hoja de diseño.

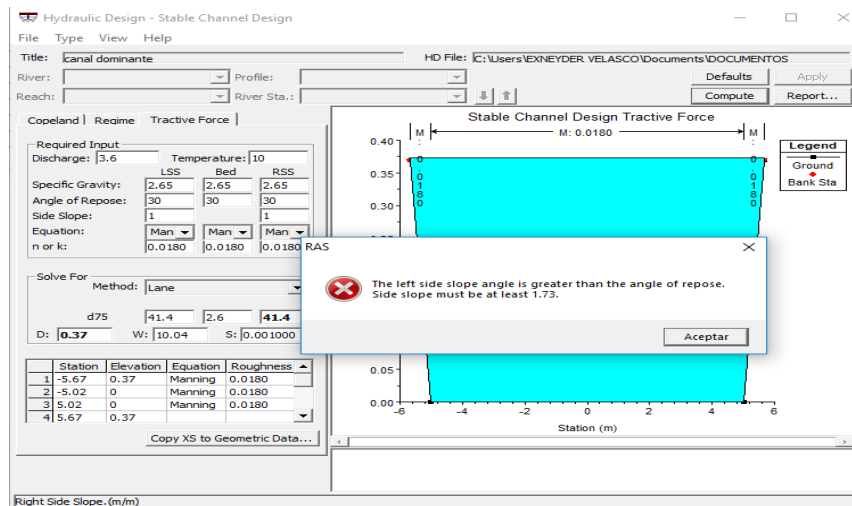


Figura 44. Sección transversal canal dominante primer canal – fuerza tractiva

Tomado de: Propio

En este caso, para el primer canal se propuso un talud 1:1 pero según el módulo de diseño de canales estables del HEC-RAS el talud mínimo a utilizar en este caso para conseguir una sección estable debe ser de 1:1.73.

A continuación, se realiza la modificación del talud y se verifica de nuevo la sección del canal, utilizando el mínimo talud que permite el módulo de diseño de canales estables del HEC-RAS.

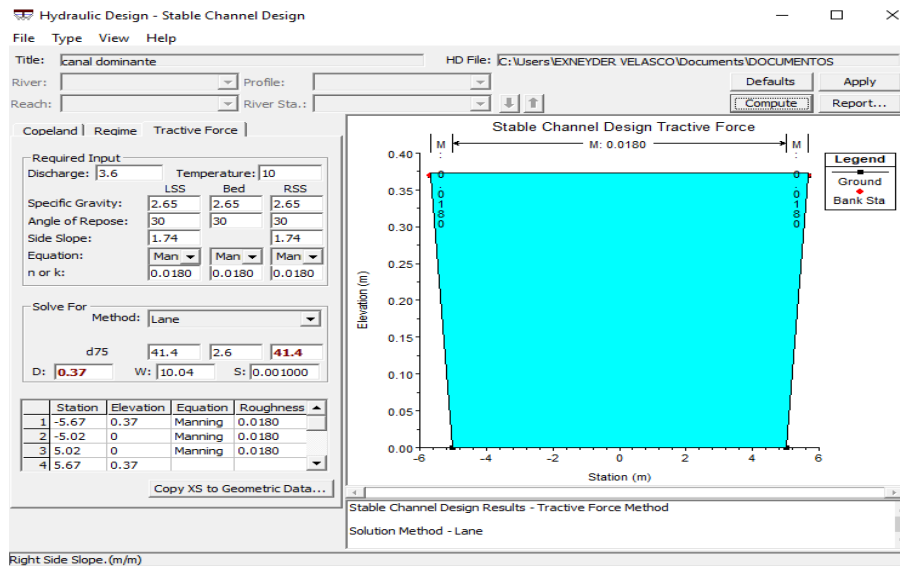


Figura 45. Sección transversal canal dominante primer canal – fuerza tractiva (ajuste)

Tomado de: Propio

Aunque la anterior verificación no permite determinar la estabilidad del canal dominante del primer canal, debido a que el módulo de diseño de canales estables del HEC-RAS no permite calcular canales con taludes menores a 1:73, se toman como referencia aproximada los resultados obtenidos, donde se evidencia que los taludes del canal son inestables y necesitan de un material de recubrimiento de 41.4 mm en todo el fondo. Adicionalmente, se evidencia una proximidad de las dimensiones geométricas del canal diseñado con las hojas de diseño, respecto a la verificación realizada por el método de la fuerza tractiva.

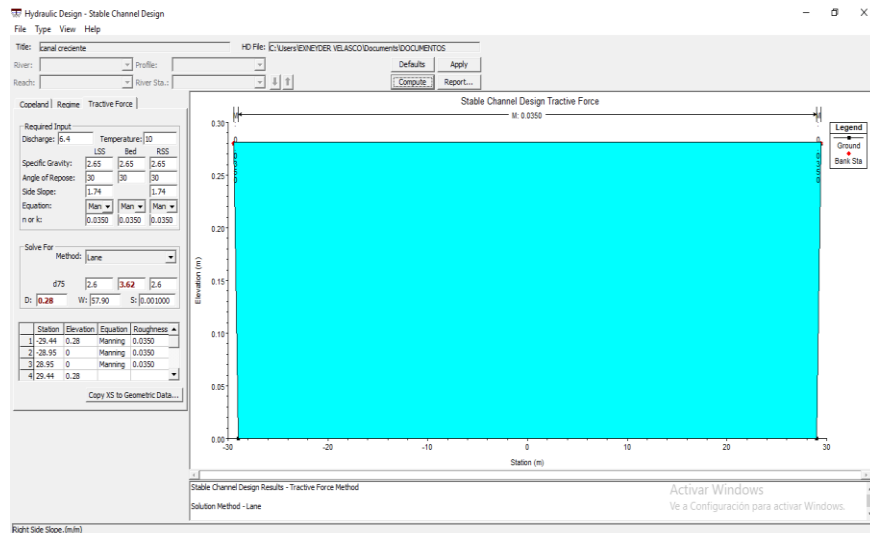


Figura 46. Sección transversal canal valle primer canal – fuerza tractiva

Tomado de: Propio

De igual forma, aunque la anterior verificación no permite determinar la estabilidad del canal valle del primer canal, debido a que el módulo de diseño de canales estables del HEC-RAS no permite calcular canales con taludes menores a 1:73, se toman como referencia aproximada los resultados obtenidos, donde se evidencia que los taludes del canal son inestables y necesitan de un material de recubrimiento de 3.62 mm en todo el fondo. Adicionalmente, se evidencia una proximidad de las dimensiones geométricas del canal diseñado con las hojas de diseño, respecto a la verificación realizada por el método de la fuerza tractiva.

5.2. Diseño Hidráulico Segundo Canal.

Tabla 27. Datos de diseño segundo canal

PARAMETRO		Datos	
TR	Periodo de retorno	Dominante (años)	Creciente (años)
		2.33	100
Qd	Caudal de diseño (m3/s)	36	100
T	Temperatura media del agua °C	10	
d ₇₅	Tamaño de partícula del material del lecho para que la sección sea estable (mm)	38.99	
n	Rugosidad del diseño	Canal dominante	Valle

	PARAMETRO	Datos	
		0.018	0.035
Z	Taludes de diseño	1:2	
Lv	Longitud del valle (m)	1000	
Lr	Longitud del río (m)	1500	
S	Pendiente longitudinal (m/m)	0.01	
T	Ancho Máximo disponible (m)	200	
θ	Ángulo de reposo del material (°)	45	
H	Altura total del canal (m)	1.5	

Tomado de: Propio

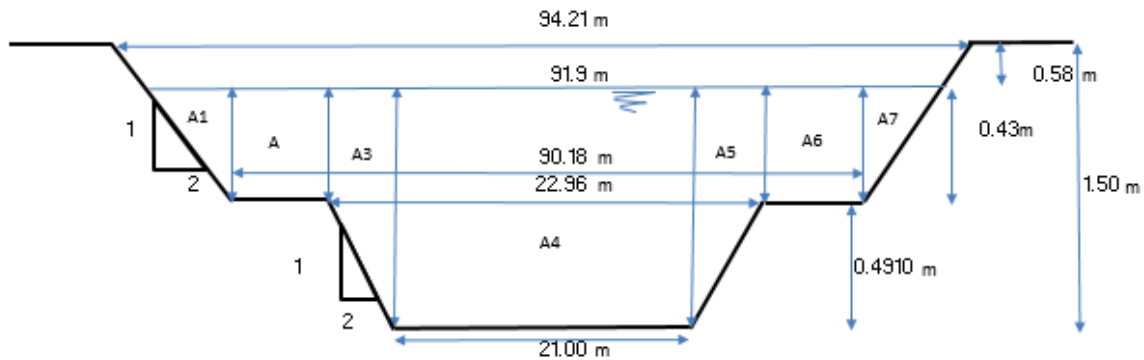


Figura 47. Sección transversal segundo canal

Tomado de: Propio

5.2.1. Verificación sección segundo canal - flujo uniforme.

A continuación, por medio del software de modelación hidráulica HEC-RAS V 5.0.3, se realizará la verificación de las secciones del canal diseñado por el método de flujo uniforme, con el fin de verificar su capacidad, profundidad hidráulica, borde libre, velocidad permisible y fuerza tractiva permisible. Dicha verificación es necesaria, ya que por medio de la modelación se obtienen resultados más precisos y se verifica la capacidad hidráulica del canal diseñado.

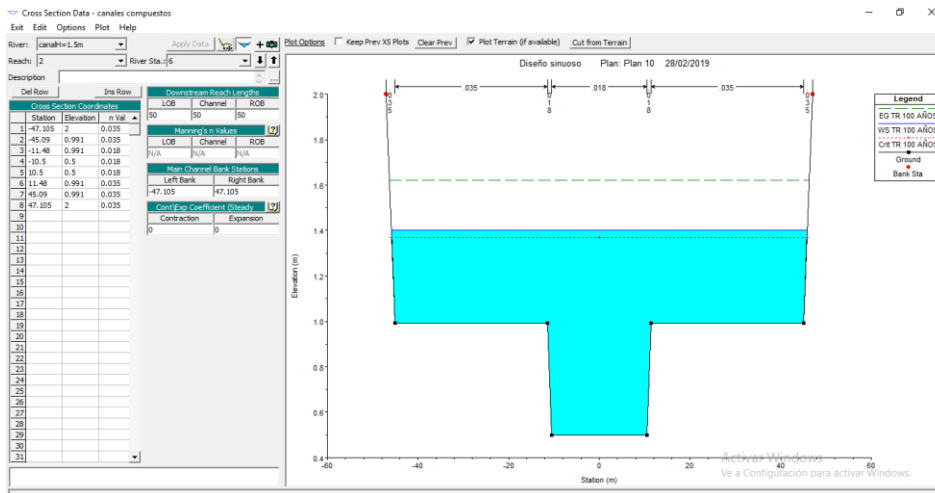


Figura 48. Sección transversal segundo canal aguas arriba – flujo uniforme

Tomado de: Propio

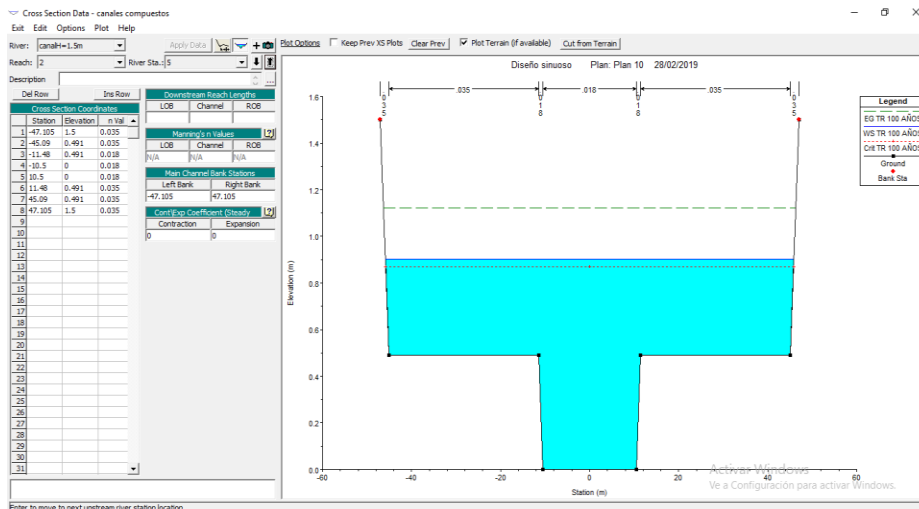


Figura 49. Sección transversal segundo canal aguas abajo – flujo uniforme

Tomado de: Propio

Profile Output Table - Standard Table 1

File Options Std. Tables Locations Help

HEC-RAS Plan: Plan 10 River: canalH=1.5m Reach: 2 Profile: TR 100 AÑOS													
Reach	River Sta	Profile	Q Total (m ³ /s)	Min Ch El (m)	W.S. Elev (m)	Crit W.S. (m)	E.G. Elev (m)	E.G. Slope (m/m)	Vel Chnl (m/s)	Flow Area (m ²)	Top Width (m)	Froude # Chl	Shear Total (N/m ²)
2	6	TR 100 AÑOS	100.00	0.50	1.40	1.37	1.62	0.009990	2.08	48.14	91.82	0.92	51.13
2	5	TR 100 AÑOS	100.00	0.00	0.90	0.87	1.12	0.010007	2.08	48.12	91.82	0.92	51.19

Figura 50. Resultados segundo canal – flujo uniforme

Tomado de: Propio

Tabla 28. Cálculo flujo uniforme para sección compuesta – segundo canal

No. sección	Área (m ²)	Perímetro (m)	Radio hidráulico (m)	(Radio hidráulico (m)) 2/3	Coefficiente de manning (n)	Conductividad (k)	Pendiente (m/m)	Velocidad (m/s)	Caudal (m ³ /s)
1	0.19	0.97	0.19	0.33	0.035	1.79	0.01	0.96	0.18
2	14.56	33.61	0.43	0.57	0.035	238.09	0.01	1.64	23.81
3	0.67	1.10	0.61	0.72	0.018	26.54	0.01	3.98	2.65
4	19.41	21.00	0.92	0.95	0.018	1022.85	0.01	5.27	102.28
5	0.67	1.10	0.61	0.72	0.018	26.54	0.01	3.98	2.65
6	14.56	33.61	0.43	0.57	0.035	238.09	0.01	1.64	23.81
7	0.19	0.97	0.19	0.33	0.035	1.79	0.01	0.96	0.18
	50.23					1555.70		3.10	155.57

Tomado de: Propio

De acuerdo a los resultados obtenidos mediante la modelación hidráulica del segundo canal por flujo uniforme, se pudo evidenciar que la profundidad hidráulica total y el borde libre calculado se aproximan con los calculados en la hoja de diseño. Se observa que la velocidad promedio calculada en el modelo hidráulico es de 2.08 m/s y la fuerza tractiva promedio es de 51.16 N/m². Según la verificación por flujo uniforme y los valores máximos permisibles, este diseño no cumple con la velocidad y cortante máximo.

5.2.2. Verificación sección segundo canal – método fuerza tractiva.

El procedimiento de cálculo del método de fuerza tractiva se explica en el numeral 3.2. Así mismo los resultados se evidencian desde la tabla No. 13 hasta la tabla No. 17. A continuación, por medio del software de modelación hidráulica HEC-RAS V 5.0.3, se realizará la verificación de la sección del canal diseñado por el método de la fuerza tractiva, con el fin de verificar su capacidad, profundidad hidráulica, borde libre y diámetro de la partícula. La verificación en HEC-RAS solo se realiza para evidenciar que el procedimiento de cálculo fue correcto en la hoja de diseño.

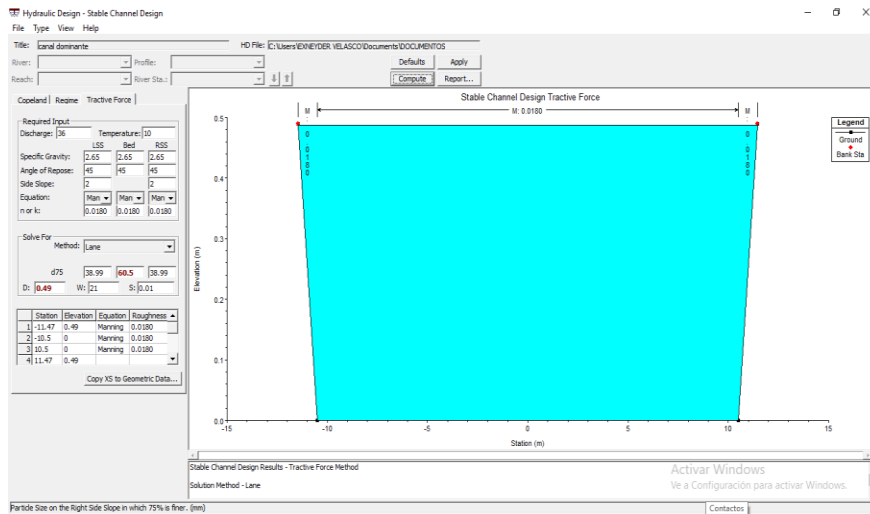


Figura 51. Sección transversal canal dominante segundo canal – fuerza tractiva

Tomado de: Propio

De acuerdo con lo anterior, se evidencia que el diámetro del material calculado con las hojas de diseño (38.99 mm) y las dimensiones del canal calculadas, permiten la estabilidad del canal hacia los taludes, se recomienda aumentar el diámetro del material en el fondo a 60.5 mm. Adicionalmente, se evidencia una proximidad de las dimensiones geométricas del canal diseñado con las hojas de diseño, respecto a la verificación realizada por el método de la fuerza tractiva.

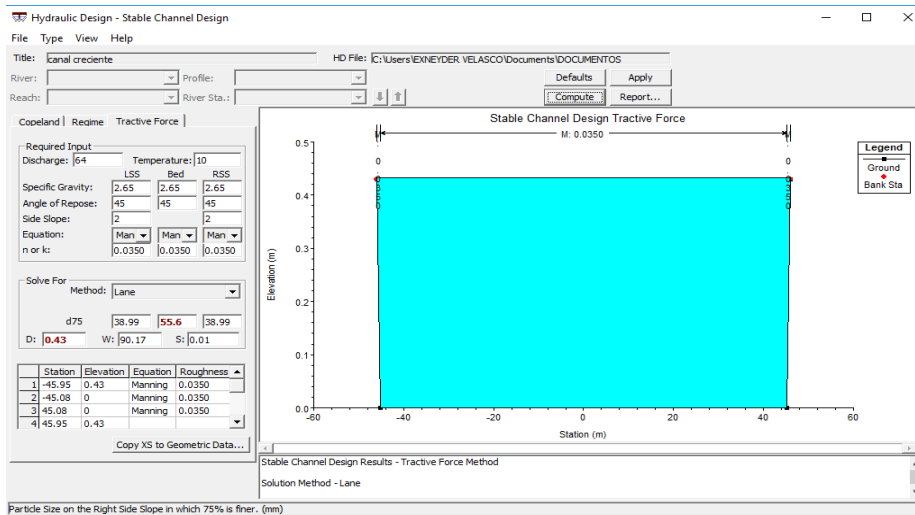


Figura 52. Sección transversal canal valle segundo canal – fuerza tractiva

Tomado de: Propio

De acuerdo con lo anterior, se evidencia que el diámetro del material calculado con las hojas de diseño (38.99 mm) y las dimensiones del canal calculadas, permiten la estabilidad del canal hacia los taludes, se recomienda aumentar el diámetro del material en el fondo a 55.6 mm. Adicionalmente, se evidencia una proximidad de las dimensiones geométricas del canal diseñado con las hojas de diseño, respecto a la verificación realizada por el método de la fuerza tractiva.

5.3. Diseño Hidráulico Tercer Canal.

Tabla 29. Datos de diseño tercer canal

Parámetro		Datos	
TR	Periodo de retorno	Dominante (años)	Creciente (años)
		2.33	100
Qd	Caudal de diseño (m ³ /s)	288	800
T	Temperatura media del agua °C	10	
d75	Tamaño de partícula del material del lecho para que la sección sea estable (mm)	93.58	
n	Rugosidad del diseño	Canal dominante	Valle
		0.018	0.035
Z	Taludes de diseño	1:3	
Lv	Longitud del valle (m)	1000	
Lr	Longitud del río (m)	1150	
S	Pendiente longitudinal (m/m)	0.018	
T	Ancho Máximo disponible (m)	300	
θ	Ángulo de reposo del material (°)	30	
H	Altura total del canal (m)	2	

Tomado de: Propio

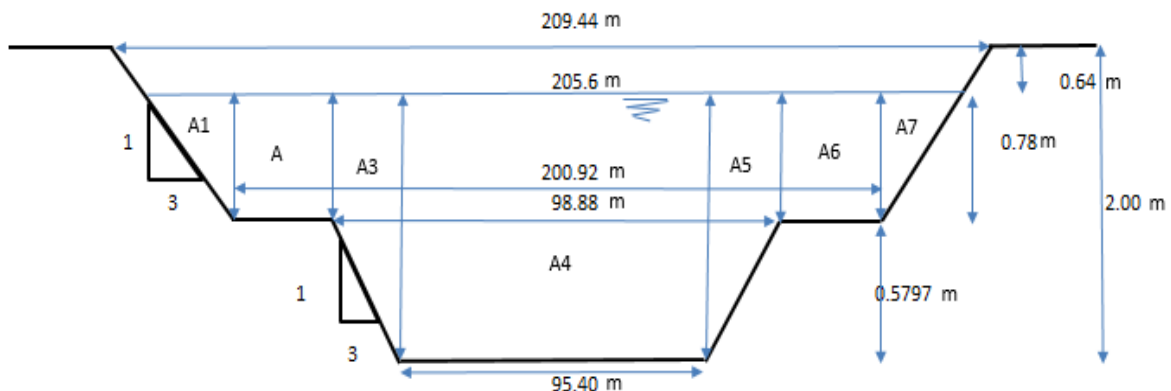


Figura 53. Sección transversal tercer canal

Tomado de: Propio

5.3.1. Verificación sección tercer canal - flujo uniforme.

A continuación, por medio del software de modelación hidráulica HEC-RAS V 5.0.3, se realizará la verificación de las secciones del canal diseñado por el método de flujo uniforme, con el fin de verificar su capacidad, profundidad hidráulica, borde libre, velocidad permisible y fuerza tractiva permisible. Dicha verificación es necesaria, ya que por medio de la modelación se obtienen resultados más precisos y se verifica la capacidad hidráulica del canal diseñado.

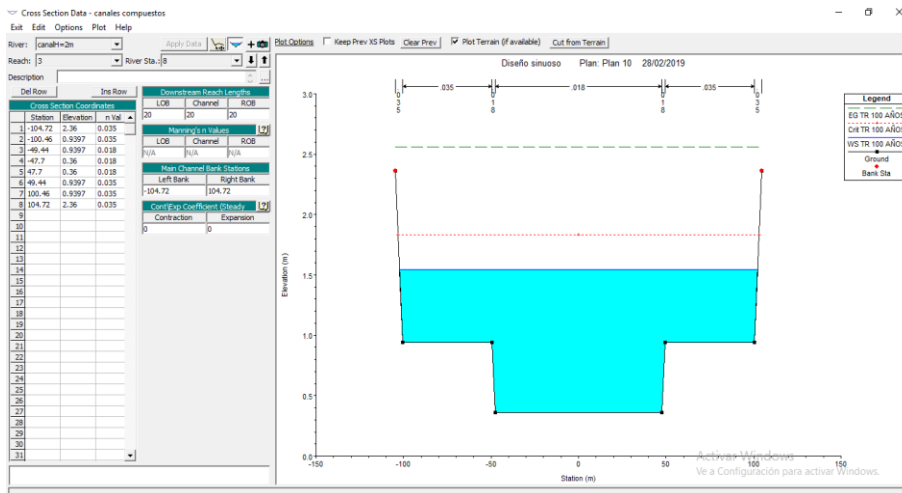


Figura 54. Sección transversal tercer canal aguas arriba – flujo uniforme

Tomado de: Propio

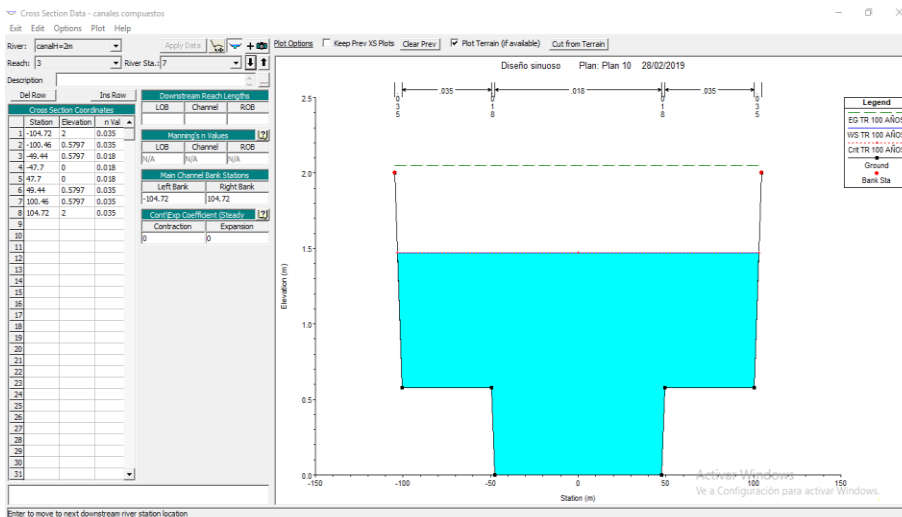


Figura 55. Sección transversal tercer canal aguas abajo – flujo uniforme

Tomado de: Propio

HEC-RAS Plan: Plan 10 River: canalH=2m Reach: 3 Profile: TR 100 AÑOS													
Reach	River Sta	Profile	Q Total (m3/s)	Min Ch El (m)	W.S. Elev (m)	Crit W.S. (m)	E.G. Elev (m)	E.G. Slope (m/m)	Vel Chnl (m/s)	Flow Area (m2)	Top Width (m)	Froude # Chl	Shear Total (N/m2)
3	8	TR 100 AÑOS	800.00	0.36	1.55	1.83	2.56	0.018005	4.47	179.10	204.55	1.52	154.30
3	7	TR 100 AÑOS	800.00	0.00	1.47	1.47	2.05	0.007112	3.36	237.85	206.27	1.00	80.24

Figura 56. Resultados tercer canal – flujo uniforme

Tomado de: Propio

Tabla 30. Cálculo flujo uniforme para sección compuesta – tercer canal

No. sección	Área (m ²)	Perímetro (m)	Radio hidráulico (m)	(Radio hidráulico (m)) 2/3	Coefficiente de manning (n)	Conductividad (k)	Pendiente (m/m)	Velocidad (m/s)	Caudal (m ³ /s)
1	0.92	2.47	0.37	0.52	0.035	13.50	0.018	1.98	1.81
2	39.86	51.02	0.78	0.85	0.035	966.07	0.018	3.25	129.61
3	1.86	1.83	1.02	1.01	0.018	104.59	0.018	7.53	14.03
4	129.83	95.40	1.36	1.23	0.018	8857.96	0.018	9.15	1188.42
5	1.86	1.83	1.02	1.01	0.018	104.59	0.018	7.53	14.03
6	39.86	51.02	0.78	0.85	0.035	966.07	0.018	3.25	129.61
7	0.92	2.47	0.37	0.52	0.035	13.50	0.018	1.98	1.81
	215.11					11026.28		6.88	1479.33

Tomado de: Propio

De acuerdo con los resultados obtenidos mediante la modelación hidráulica del tercer canal por flujo uniforme, se pudo evidenciar que la profundidad hidráulica total y el borde libre calculado se aproximan con los calculados en la hoja de diseño. Se observa que la velocidad promedio calculada en el modelo hidráulico es de 3.91 m/s y la fuerza tractiva promedio es de 117.27 N/m². Según la verificación por flujo uniforme y los valores máximos permisibles, este diseño no cumple con la velocidad y cortante máximo.

5.3.2. Verificación sección tercer canal – método fuerza tractiva.

El procedimiento de cálculo del método de fuerza tractiva se explica en el numeral 3.2. Así mismo los resultados se evidencian desde la tabla No. 13 hasta la tabla No. 17. A continuación, por medio del software de modelación hidráulica HEC-RAS V 5.0.3, se realizará la verificación de la sección del canal diseñado por el método de la fuerza tractiva, con el fin de verificar su capacidad, profundidad hidráulica, borde libre y diámetro de la partícula. La verificación en HEC-RAS solo se realiza para evidenciar que el procedimiento de cálculo fue correcto en la hoja de diseño.

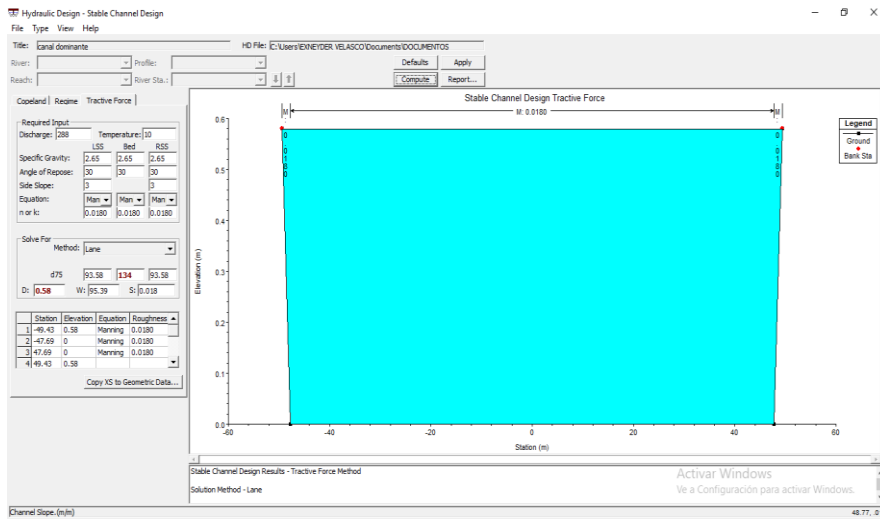


Figura 57. Sección transversal canal dominante tercer canal – fuerza tractiva

Tomado de: Propio

De acuerdo a lo anterior, se evidencia que el diámetro del material calculado con las hojas de diseño (93.58 mm) y las dimensiones del canal calculadas, permiten la estabilidad del canal hacia los taludes, se recomienda aumentar el diámetro del material en el fondo a 134 mm. Adicionalmente, se evidencia una proximidad de las dimensiones geométricas del canal diseñado con las hojas de diseño, respecto a la verificación realizada por el método de la fuerza tractiva.

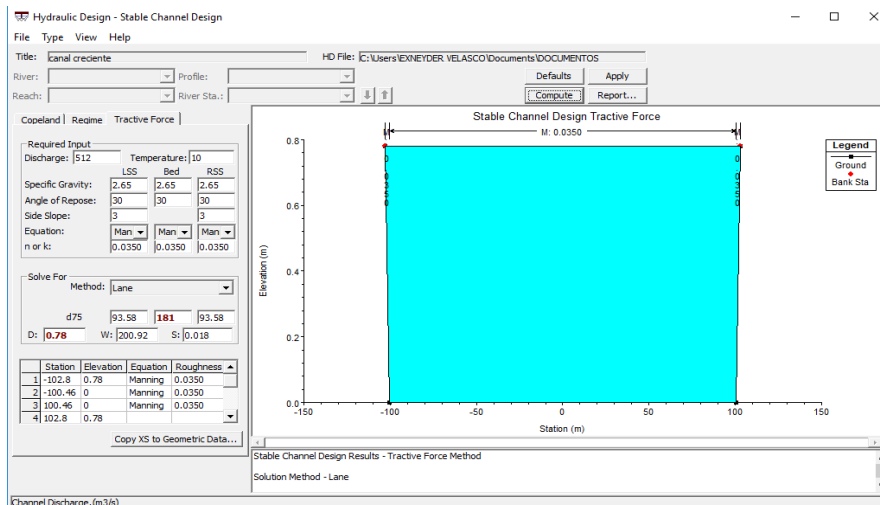


Figura 58. Sección transversal canal valle tercer canal – fuerza tractiva

Tomado de: Propio

De acuerdo con lo anterior, se evidencia que el diámetro del material calculado con las hojas de diseño (93.58 mm) y las dimensiones del canal calculadas, permiten la estabilidad del canal hacia los taludes, se recomienda aumentar el diámetro del material en el fondo a 181 mm. Adicionalmente, se evidencia una proximidad de las dimensiones geométricas del canal diseñado con las hojas de diseño, respecto a la verificación realizada por el método de la fuerza tractiva.

Capítulo VI

Modelación hidráulica

El objetivo principal de la modelación es el estudio del comportamiento hidráulico y la definición de las condiciones de los canales en las épocas de las crecientes o eventos extremos; esto se realiza para diferentes escenarios de probabilidad denominados periodos de retorno. En especial, el objetivo de la modelación es conocer el comportamiento hidráulico que presenta cada canal en cada periodo de retorno.

La determinación de los niveles de la superficie del agua se efectúa mediante la modelación hidráulica de cada canal diseñado, la cual permite la definición del perfil de la superficie del agua a lo largo del canal sinuoso para las crecientes consideradas y el análisis de las velocidades de la corriente, de la pendiente de la línea de energía y del estado del flujo.

A partir del caudal correspondiente a la creciente de diseño se define el perfil de la lámina de agua a lo largo de cada canal. Los datos del perfil representan los niveles máximos del agua, el área hidráulica, el ancho superficial de la lámina y la velocidad del flujo. Estos datos, junto con los demás parámetros de la evaluación, permiten conceptuar acerca de las posibilidades de inundación de la zona.

En el presente numeral se presentan los estudios hidráulicos realizados y los resultados obtenidos. Como se mencionó, se analizan crecientes con períodos de retorno a 2.33 y 100 años.

6.1. Esquema de modelación.

Para la modelación hidráulica se utiliza el programa de cálculo HEC-RAS v.5.0.3, implementándose en el mismo un cálculo en régimen permanente en la dirección principal de flujo (modelo en una dimensión).

El programa HEC-RAS (Rivers Analysis System), desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos de América, es un sistema integrado de software para análisis hidráulico de redes de canales naturales y artificiales.

Para la obtención de los resultados, el programa estima las pérdidas de carga que se producen entre secciones transversales y en el paso bajo las estructuras mediante la realización de balances de energía.

Se deben analizar los resultados de la modelación hidráulica de cada canal, con objeto de evaluar las elevaciones de la lámina de agua, la ocupación de las llanuras de inundación, las velocidades de paso del agua y los esfuerzos cortantes.

6.2. Flujo permanente.

El cálculo para flujo permanente se hace para caudales que deben ser transitados para las condiciones de diseño calculadas (hojas de diseño para canales aluviales sinuosos); para este caso, a los canales se le asignan dos caudales a diferentes periodos de retorno como son el TR 2.33 años siendo la condición para el canal dominante y el TR 100 años para la condición del canal valle o creciente.

Debido en el desarrollo implementado en el flujo permanente unidimensional en HEC-RAS se ejecutan diferentes simulaciones con variaciones en las alturas de las láminas de agua, velocidad de flujo y esfuerzos cortantes.

6.3. Esquema matemático del modelo hidráulico.

Con el modelo HEC-RAS es posible realizar análisis de comportamiento hidráulico del flujo a superficie libre para condiciones de flujo permanente. Con el modelo es posible determinar las alturas de los niveles de agua, hallar velocidades en dirección del flujo (1D) y demás características hidráulicas de un cauce. El procedimiento básico se fundamenta en las siguientes ecuaciones y supuestos, (HEC- RAS, River Analysis System Hydraulic Reference Manual, 2010), la ecuación principal para simular la hidráulica del flujo para canales de cualquier tipo de sección transversal bajo flujo gradualmente variado es la ecuación de Bernoulli:

$$y_2 + z_2 + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} = y_1 + z_1 + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} + h_e \quad (57)$$

Donde:

y_1, y_2 : Profundidad del agua en la sección.

z_1, z_2 : Cota de fondo en la sección.

V_1, V_2 : Son las velocidades medias del flujo en las secciones 1 y 2

α_1, α_2 : Son los coeficientes de corrección a la velocidad.

g : Es la aceleración de la fuerza de gravedad.

h_e : Son las pérdidas de Energía.

$$h_e = L\bar{S}_f + C \left| \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} \right| \quad (58)$$

Donde:

L : Es la longitud entre las secciones.

\bar{S}_f : Es la pendiente de fricción (Motriz) entre dos secciones.

C : Es el coeficiente de pérdidas por expansión o contracción.

La longitud entre secciones se define como:

$$L = \frac{L_{izq}Q_{izq} + L_{central}Q_{central} + L_{der}Q_{der}}{Q_{izq} + Q_{central} + Q_{der}} \quad (59)$$

Donde:

$L_{izq}, L_{central}, L_{der}$: Longitud entre cada sección especificada para la ribera izquierda, cauce principal y ribera derecha.

$Q_{izq}, Q_{central}, Q_{der}$: Caudal medio aritmético entre los flujos a través de la ribera izquierda, cauce principal y ribera derecha.

De esta manera para cada sección se aplica la fórmula de Manning:

$$Q = \frac{AR^{\frac{2}{3}}S^{\frac{1}{2}}}{n} \quad (60)$$

Donde:

Q : Caudal del cauce.

n : Coeficiente de Manning (rugosidad del cauce).

S : Pendiente longitudinal del cauce.

A : Área hidráulica.

R : Radio Hidráulico.

La pendiente longitudinal del cauce, o bien, la de la pendiente de la línea de energía se calcula por medio de la fórmula de Manning para flujo uniforme en cada sección del tramo:

$$S = \left(\frac{n^2 V^2}{R^{\frac{4}{3}}} \right) \quad (61)$$

En donde:

n : Coeficiente de rugosidad de Manning, valor adimensional.

V : Velocidad promedio del agua, en m/s.

R : Radio hidráulico, en m, igual al área hidráulica A , en m^2 , dividida entre el perímetro mojado P , en m.

Cada perfil batimétrico se debe dividir en ribera izquierda, cauce principal y ribera derecha, en cada una de estas subsecciones se puede evaluar la ecuación de Manning, usando los respectivos coeficientes de rugosidad de Manning para cada sección.

Por otro lado, las pérdidas localizadas en un punto del canal se expresan mediante la ecuación:

$$hl = k * \left| \left(\frac{v_1^2}{2g} \right) - \left(\frac{v_2^2}{2g} \right) \right| \quad (62)$$

En donde:

k : Coeficiente de pérdidas localizadas, adimensional.

v : Velocidad promedio aguas arriba (1) y aguas abajo (2) del punto o tramo en donde se produce la pérdida localizada, en m/s.

6.4. Desarrollo de modelos hidráulicos

A continuación, se muestra el desarrollo de los modelos hidráulicos de los canales diseñados anteriormente.

Para la modelación hidráulica de los canales sinuosos diseñados, se realizó la siguiente metodología:

- Se ensambló el modelo topológico hidráulico en HecRAS en 1D (unidimensionales) a partir de las geometrías y vectores obtenidos en Esri ArcGIS y Autodesk Civil 3D.
- Se construyeron tres modelos en 1D (unidimensionales) combinando la información obtenida mediante las fichas técnicas de diseño realizado para la implantación de los cauces artificiales.
- Se modeló hidráulicamente, en estado permanente, los cauces artificiales diseñados para evaluar el comportamiento hidráulico de los diseños realizados, para efectuar el análisis de llanuras de inundación, borde libre, velocidades y esfuerzos cortantes.

6.4.1. Modelo hidráulico primer canal

- Para el modelo hidráulico del primer canal, se definen inicialmente unas condiciones de frontera aguas abajo del canal, donde se establecen unas cotas de entrega a un supuesto cauce. Para el periodo de retorno de TR 2.33 años se establece una cota de 2549.34 m la cual permite una zona de remanso del flujo y para el TR 100 años una cota de entrega de 2549.9 m la cual se encuentra por encima de la última cota de entrega del canal y genera una elevación del flujo al final del canal. Ambas cotas se establecieron con el fin de distribuir uniformemente el flujo a lo largo del canal.
- Después de trazadas las secciones transversales ortogonales a la zona central del cauce y en el punto medio de las curvas, se exporta el modelo de terreno generado en ArcGIS al HECRAS con el fin de realizar el modelo hidráulico.

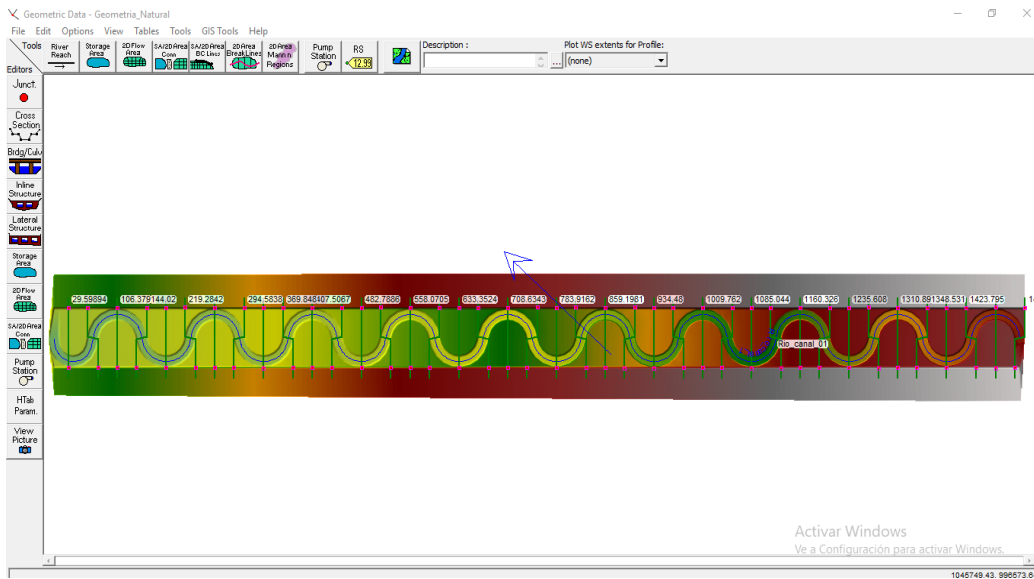


Figura 59. Modelo de terreno exportado a HECRAS primer canal

Tomado de: Propio

- Se procede a ejecutar el modelo hidráulico en condiciones de flujo permanente, obteniendo las manchas en planta en cada una de las secciones transversales:

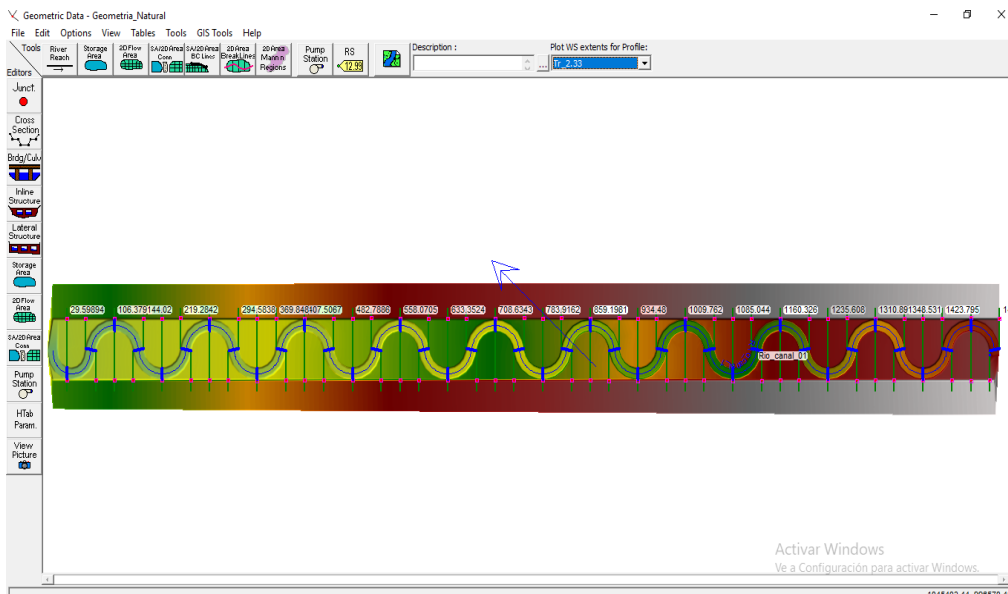


Figura 60. Manchas de las secciones transversales del primer canal – TR 2.33 años

Tomado de: Propio

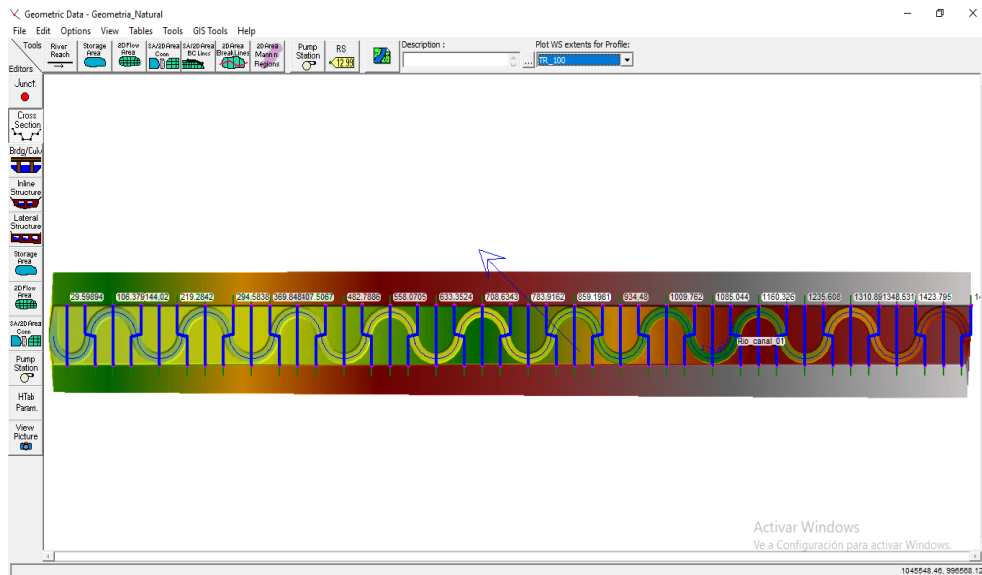


Figura 61. Manchas de las secciones transversales del primer canal – TR 100 años
Tomado de: Propio

- Así mismo, se obtuvieron las secciones transversales de muestreo: Dominante centrado, dominante cargado al talud de crecienta izquierdo y dominante cargado al talud de crecienta derecho.

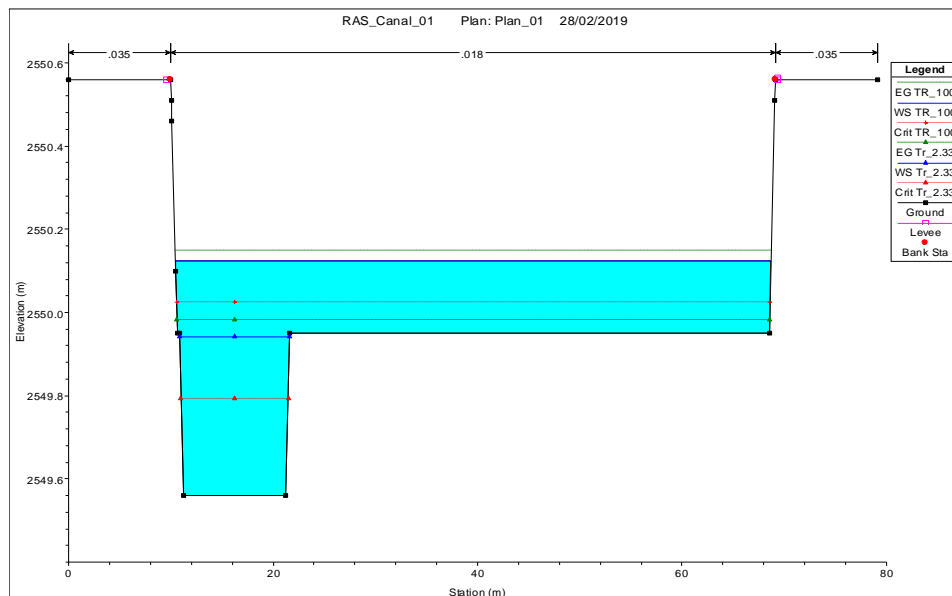


Figura 62. Sección transversal dominante cargado al talud izquierdo - primer canal
Tomado de: Propio

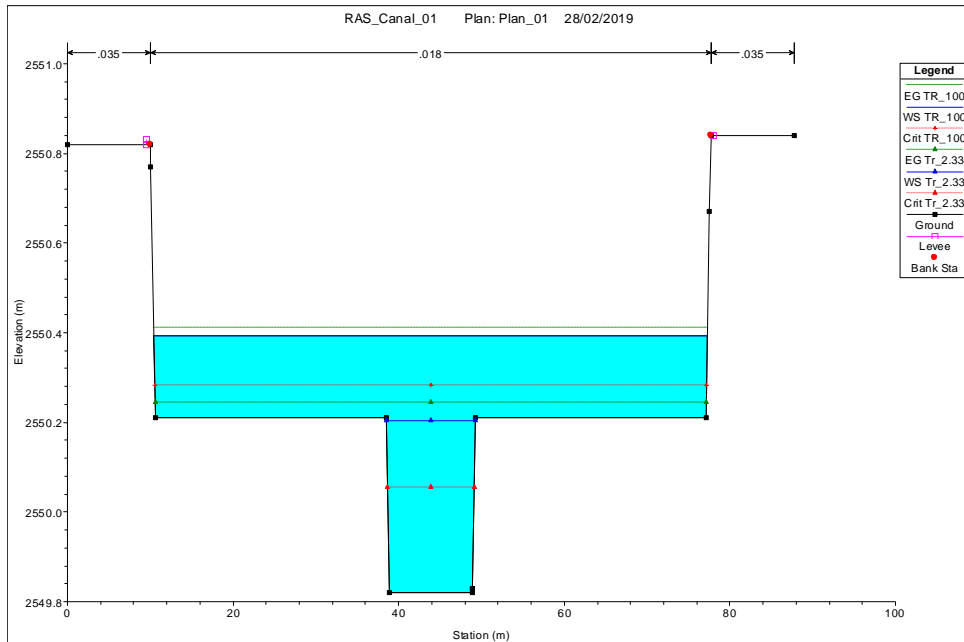


Figura 63. Sección transversal dominante centrado - primer canal

Tomado de: Propio

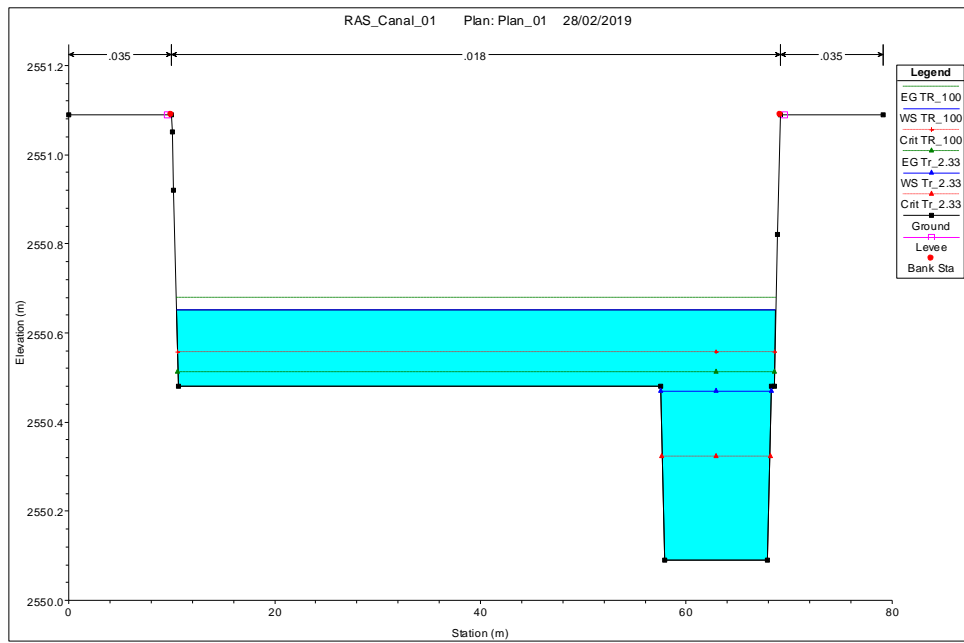


Figura 64. Sección transversal dominante cargado al talud derecho - primer canal

Tomado de: Propio

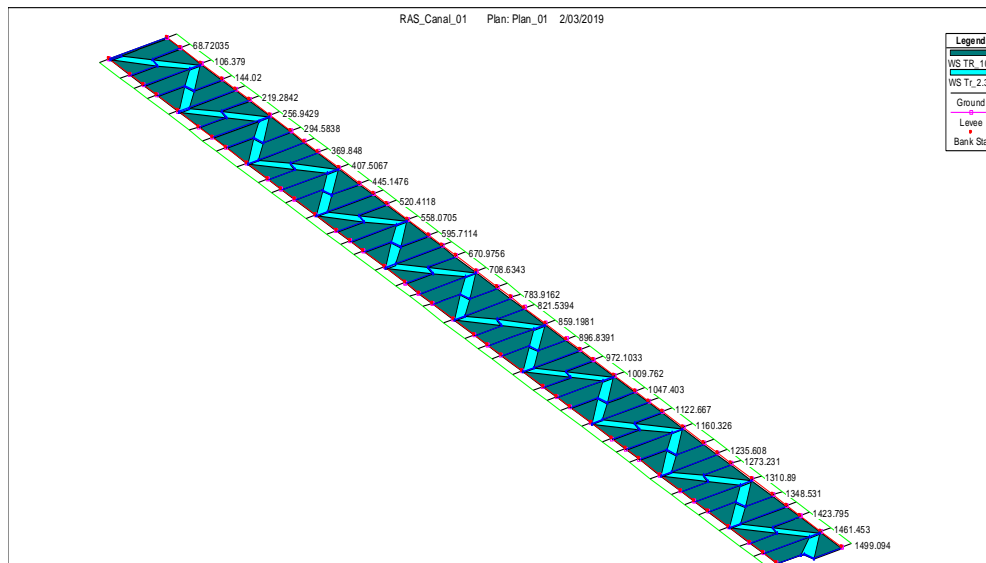


Figura 65. Perspectiva modelación hidráulica - primer canal

Tomado de: Propio

6.4.2. Modelo hidráulico segundo canal

- Para el modelo hidráulico del segundo canal, se definen inicialmente unas condiciones de frontera aguas abajo del canal, donde se establecen unas cotas de entrega a un supuesto cauce. Para el periodo de retorno de TR 2.33 años se establece una cota de 2549.35 m la cual permite una zona de remanso del flujo y para el TR 100 años una cota de entrega de 2549.9 m la cual se encuentra por encima de la última cota de entrega del canal y genera una elevación del flujo al final del canal. Ambas cotas se establecieron con el fin de distribuir uniformemente el flujo a lo largo del canal.
- Después de trazadas las secciones transversales ortogonales a la zona central del cauce y en el punto medio de las curvas, se exporta el modelo de terreno generado en ArcGIS al HECRAS con el fin de realizar el modelo hidráulico.

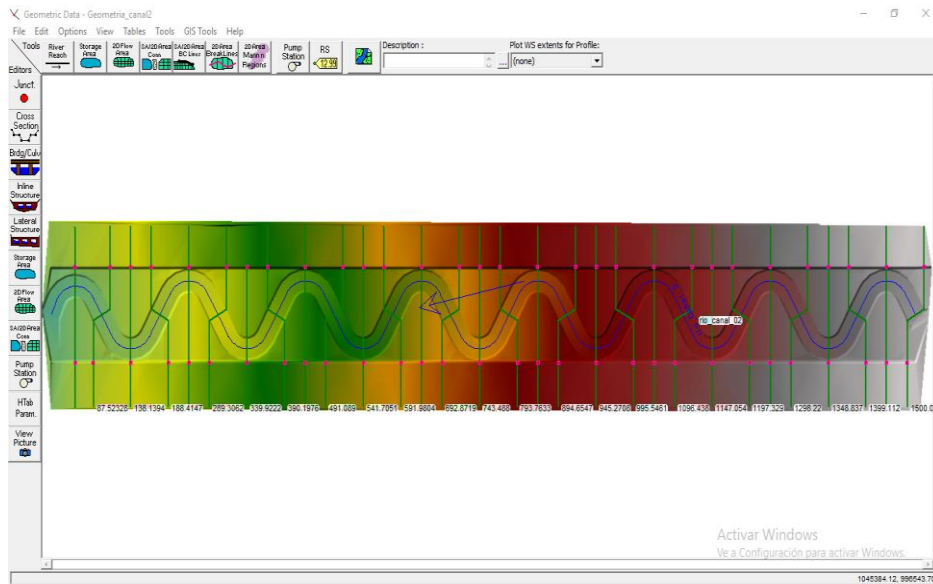


Figura 66. Modelo de terreno exportado a HECRAS segundo canal

Tomado de: Propio

- Se procede a ejecutar el modelo hidráulico en condiciones de flujo permanente, obteniendo las manchas en planta en cada una de las secciones transversales:

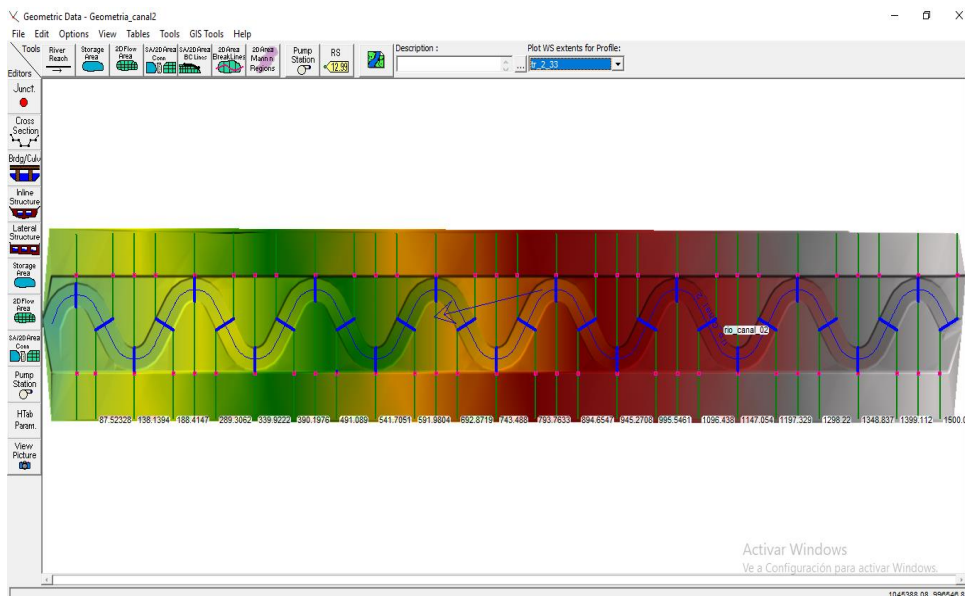


Figura 67. Manchas de las secciones transversales del segundo canal – TR 2.33

años

Tomado de: Propio

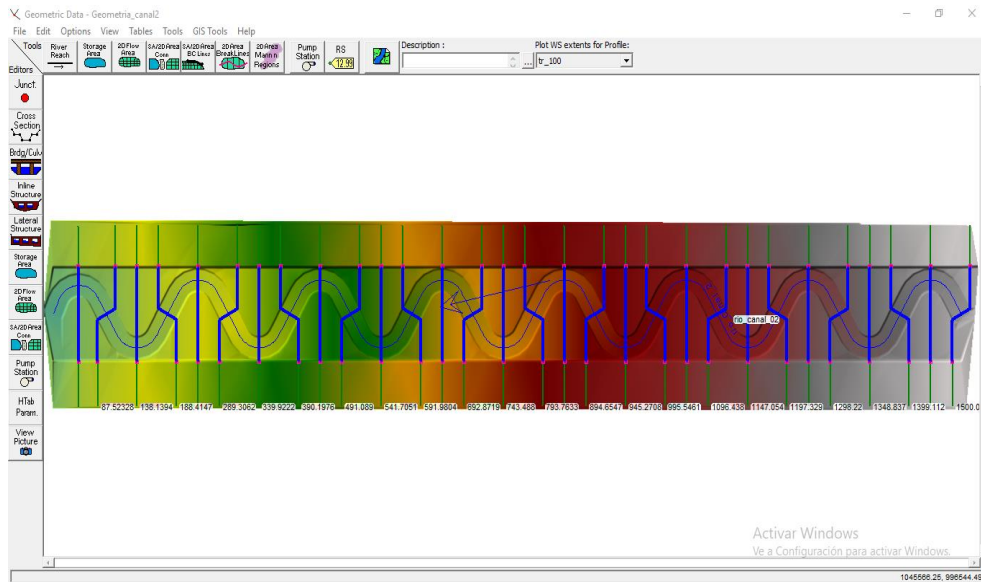


Figura 68. Manchas de las secciones transversales del segundo canal – TR 100 años

Tomado de: Propio

- Así mismo, se obtuvieron las secciones transversales de muestreo: Dominante centrado, dominante cargado al talud de creciente izquierdo y dominante cargado al talud de creciente derecho.

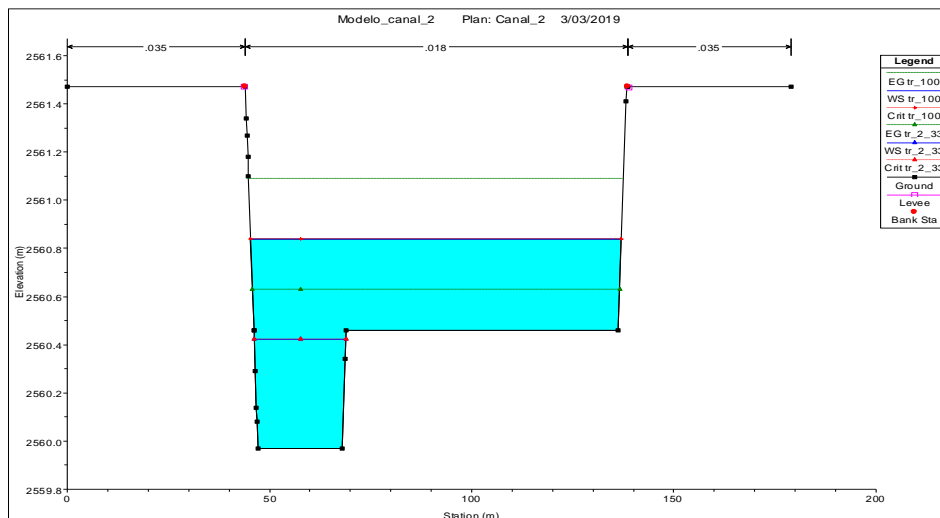


Figura 69. Sección transversal dominante cargado al talud izquierdo - segundo canal

Tomado de: Propio

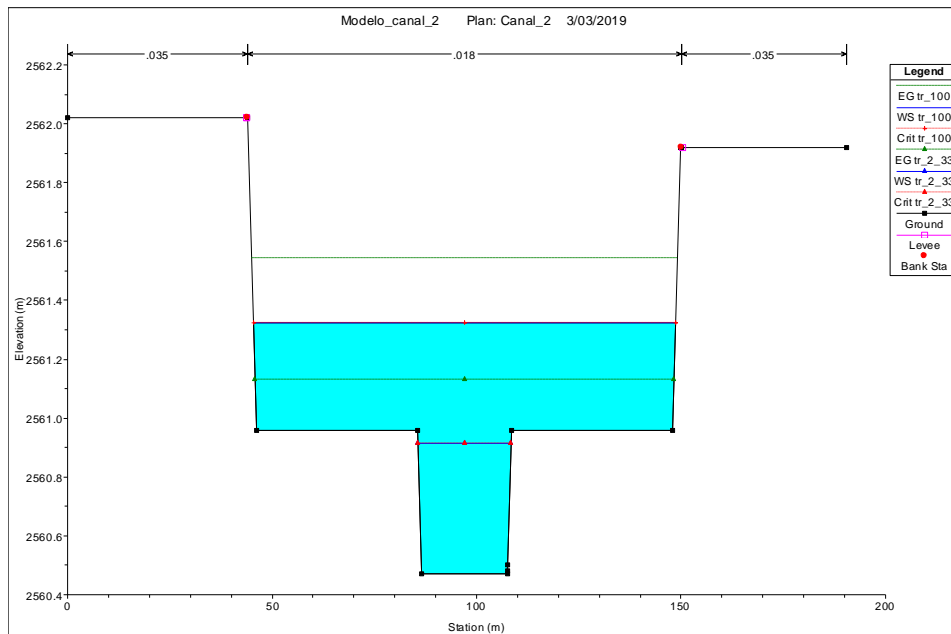


Figura 70. Sección transversal dominante centrado - segundo canal
Tomado de: Propio

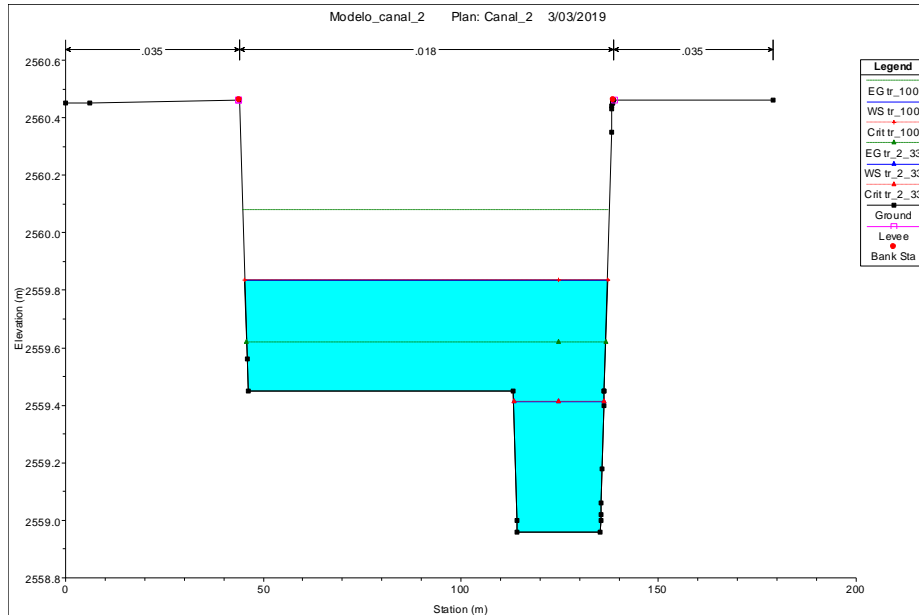


Figura 71. Sección transversal dominante cargado al talud derecho - segundo canal
Tomado de: Propio

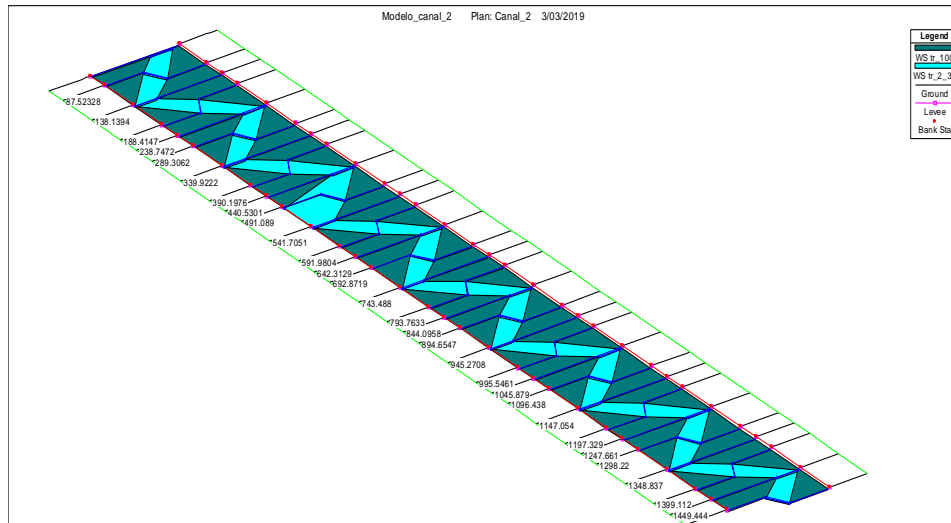


Figura 72. Perspectiva modelación hidráulica - segundo canal

Tomado de: Propio

6.4.3. Modelo hidráulico tercer canal

- Para el modelo hidráulico del tercer canal, las condiciones de frontera aguas arriba y aguas abajo del canal es la profundidad normal con la pendiente de diseño de 0.018 m/m.
- Después de trazadas las secciones transversales ortogonales a la zona central del cauce y en el punto medio de las curvas, se exporta el modelo de terreno generado en ArcGIS al HECRAS con el fin de realizar el modelo hidráulico.

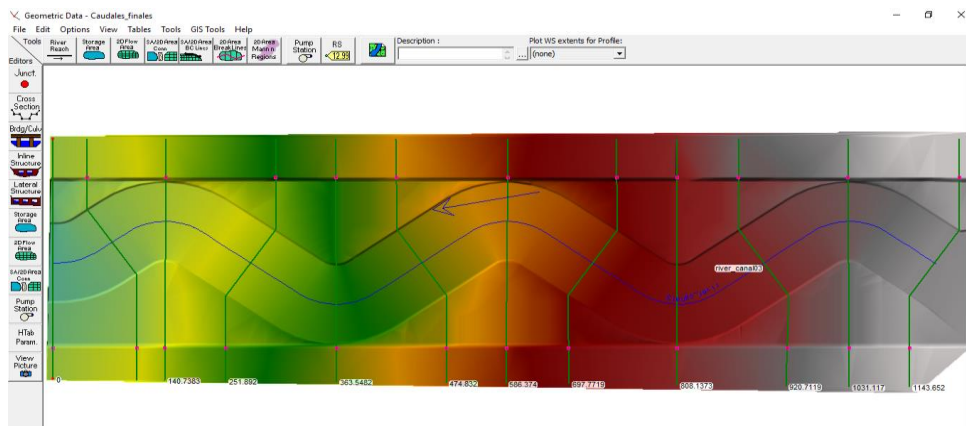


Figura 73. Modelo de terreno exportado a HECRAS tercer canal

Tomado de: Propio

- Se procede a ejecutar el modelo hidráulico en condiciones de flujo permanente, obteniendo las manchas en planta en cada una de las secciones transversales:

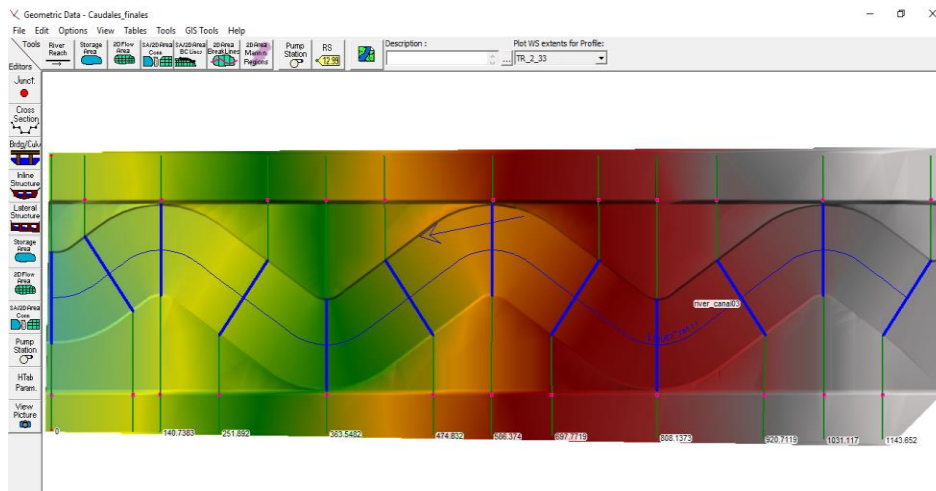


Figura 74. Manchas de las secciones transversales del tercer canal – TR 2.33 años

Tomado de: Propio

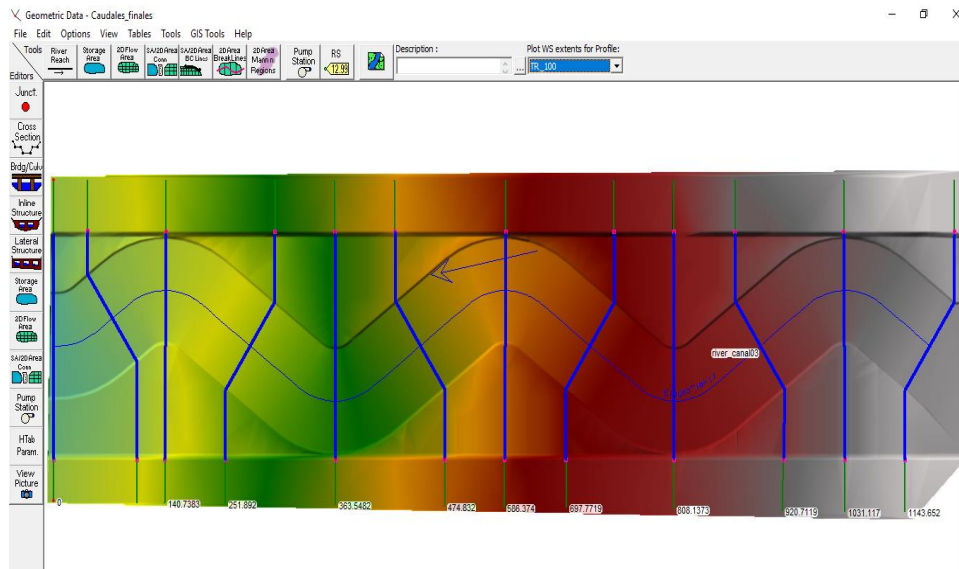


Figura 75. Manchas de las secciones transversales del tercer canal – TR 100 años

Tomado de: Propio

- Así mismo, se obtuvieron las secciones transversales de muestreo: Dominante centrado, dominante cargado al talud de creciente izquierdo y dominante cargado al talud de creciente derecho.

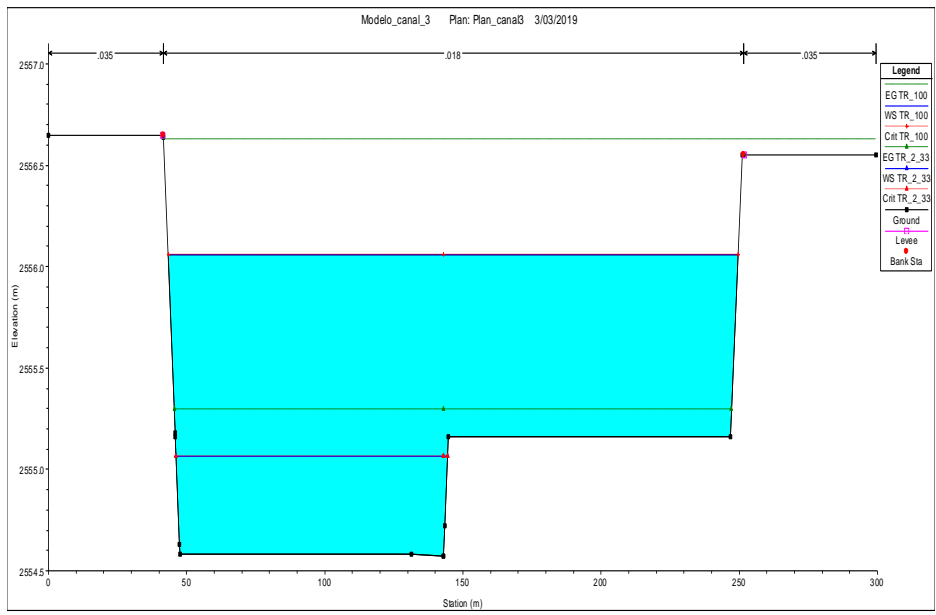


Figura 76. Sección transversal dominante cargado al talud izquierdo - tercer canal
Tomado de: Propio

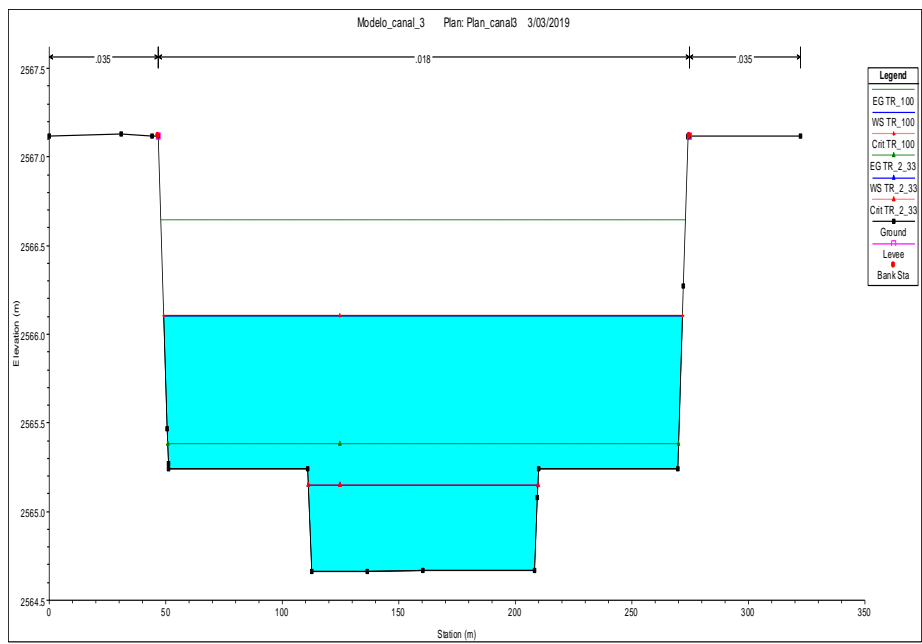


Figura 77. Sección transversal dominante centrado - tercer canal
Tomado de: Propio

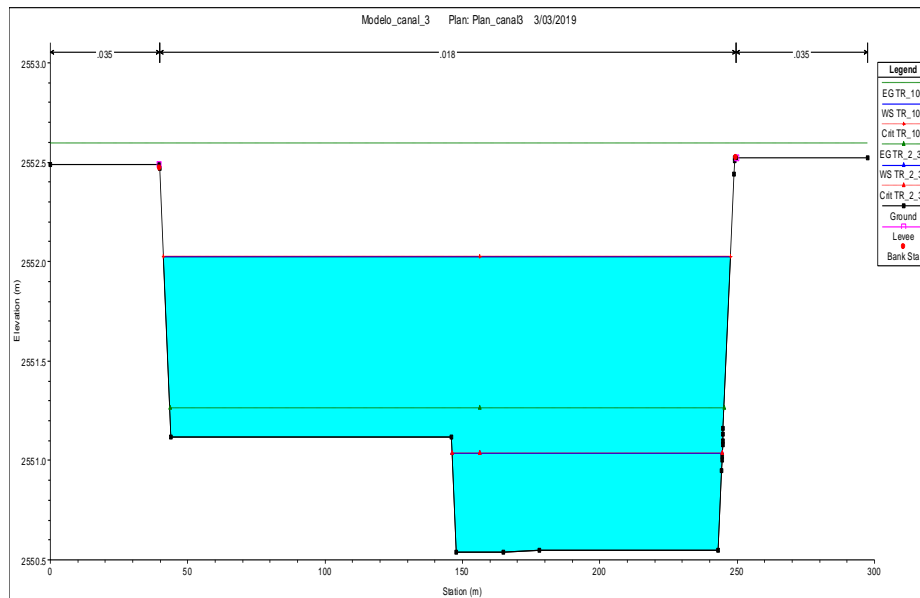
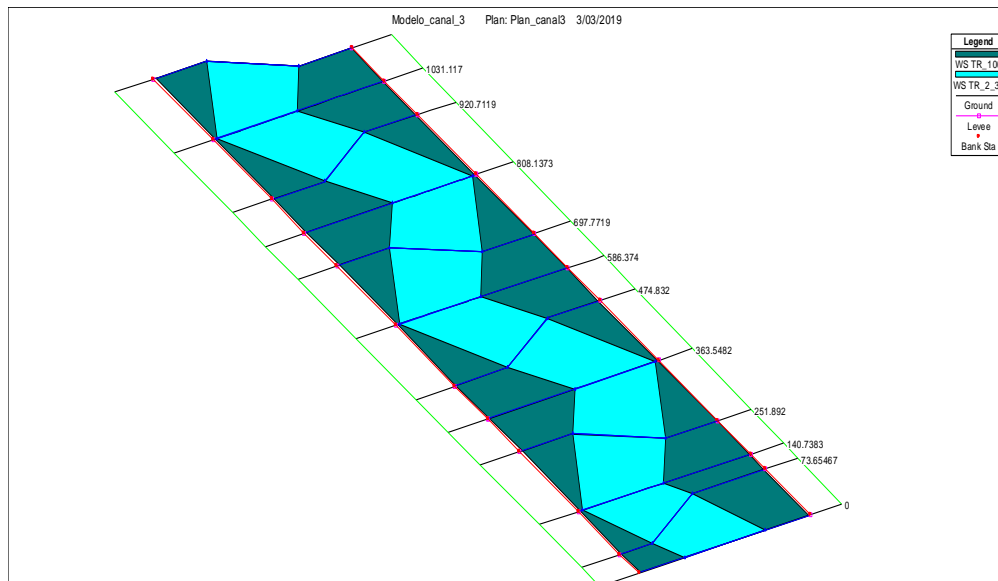


Figura 78. Sección transversal dominante cargado al talud derecho - tercer canal
Tomado de: Propio

Figura 79. Perspectiva modelación hidráulica - tercer canal



Tomado de: Propio

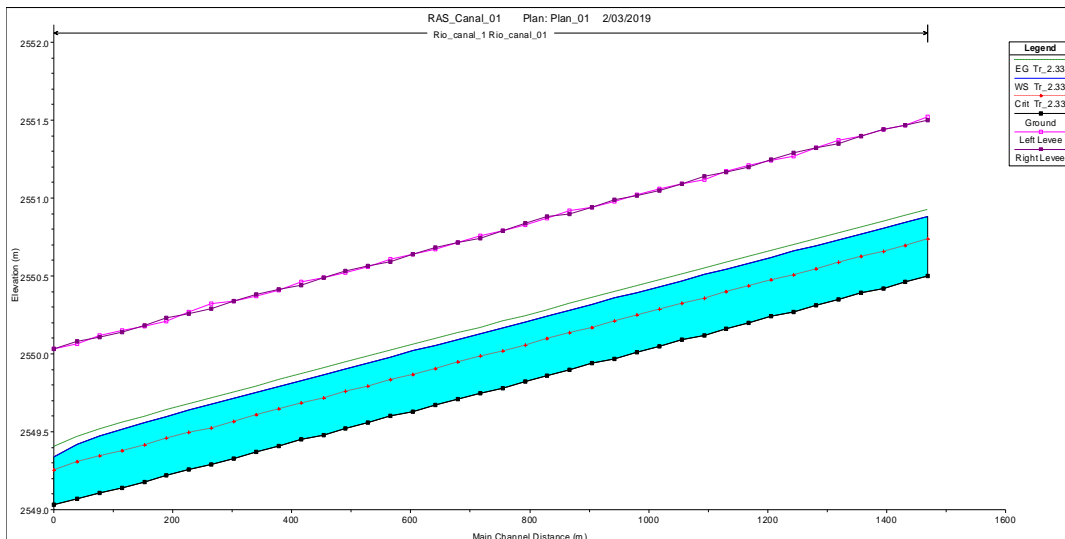
Capítulo VII

Análisis de Resultados

En el presente capítulo se presenta el análisis de resultados de las modelaciones hidráulicas realizadas para cada uno de los canales, donde se incluyen los perfiles de flujo para los dos periodos de retorno, las gráficas de análisis de borde libre, profundidad de lámina de agua, elevación inversa o cota de lámina, velocidad, cortante y potencia de la corriente. Adicionalmente, se presentan las gráficas de la mapificación de los resultados en RAS Mapper, donde se incluye un análisis espacial de los parámetros de diseño planteados.

7.1. Resultados modelación hidráulica primer canal

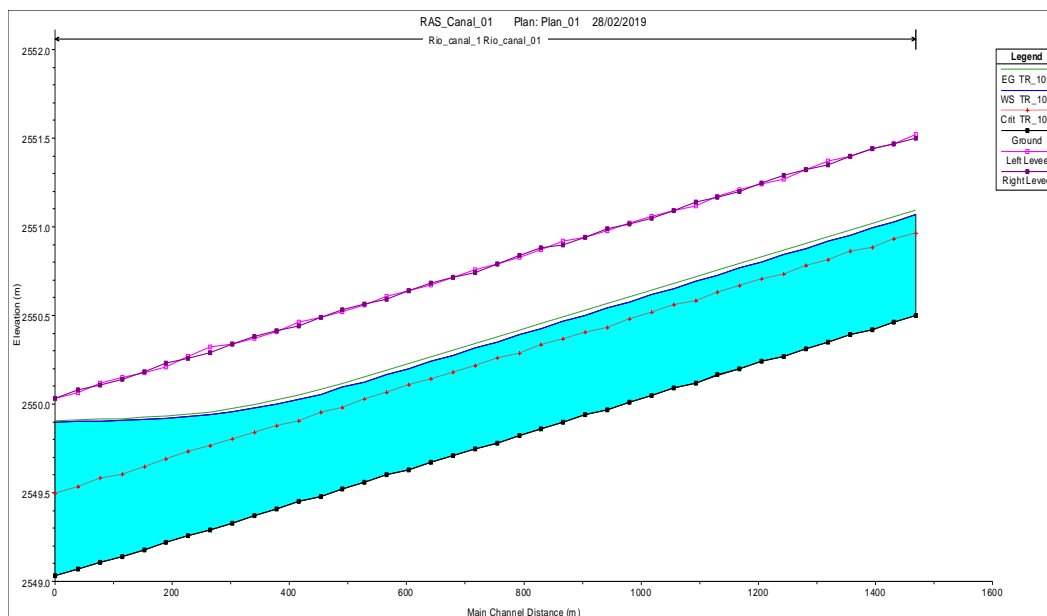
En la siguiente gráfica se puede apreciar el perfil longitudinal de flujo a un periodo de retorno de 2.33 años, donde se aprecia que de acuerdo a las condiciones de frontera definidas inicialmente, el perfil de flujo tiende a presentar un remanso al finalizar, ya que se definió una cota menor a partir de la lámina de agua, con el fin de generar un flujo uniforme en todo el canal.



Gráfica 16. Perfil longitudinal de flujo TR 2.33 años - primer canal

Tomado de: Propio

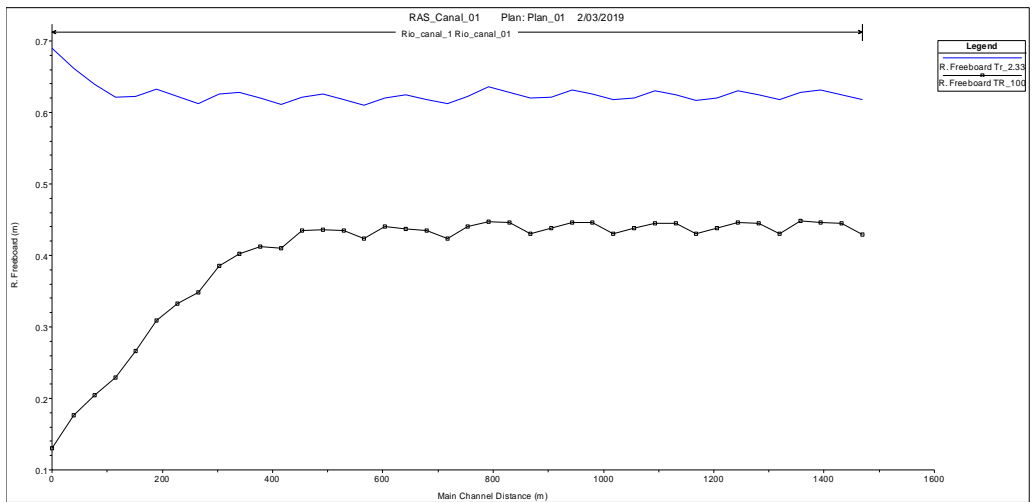
Así mismo, se puede apreciar el perfil longitudinal de flujo a un periodo de retorno de 100 años, donde se aprecia que de acuerdo a las condiciones de frontera definidas inicialmente, el perfil de flujo tiende a presentar una elevación al finalizar, ya que se definió una cota mayor a partir de la lámina de agua, con el fin de generar un flujo uniforme en todo el canal.



Gráfica 17. Perfil longitudinal de flujo TR 100 años - primer canal

Tomado de: Propio

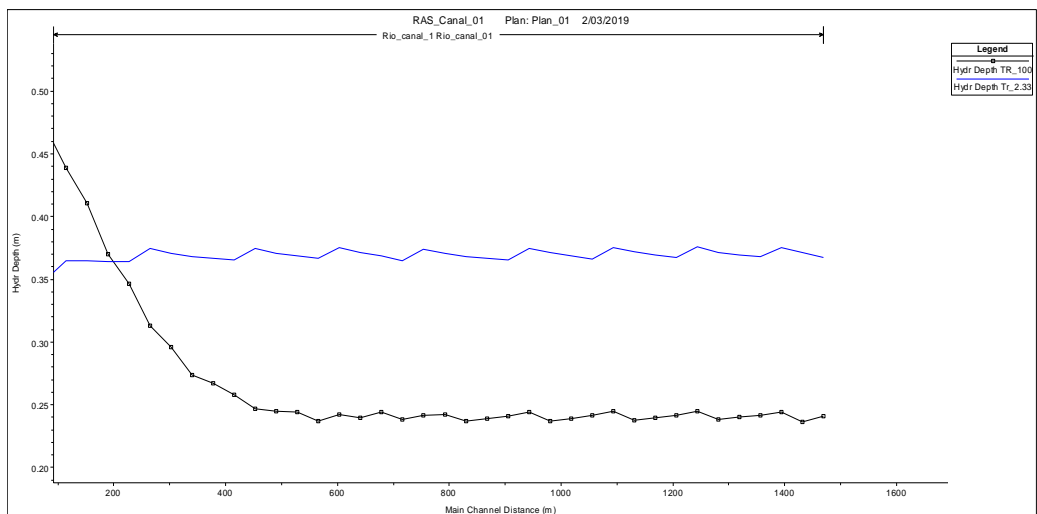
En la siguiente gráfica se pueden evidenciar los bordes libres generados a lo largo del canal en cada uno de los periodos de retorno. En ambos periodos de retorno se observa que los bordes libres no son constantes, pero en el tramo inicial antes de que se inicien los perfiles de flujo de remanso y elevación respectivamente, tienden a ser muy equivalentes entre ellos tendiendo a ser lineales. En el periodo de retorno de 2.33 años se pueden evidenciar bordes libres entre 0.54 m y 0.69 m y en el periodo de retorno de 100 años los rangos de borde libre están entre 0.13 m y 0.45 m.



Gráfica 18. Bordes libres - primer canal

Tomado de: Propio

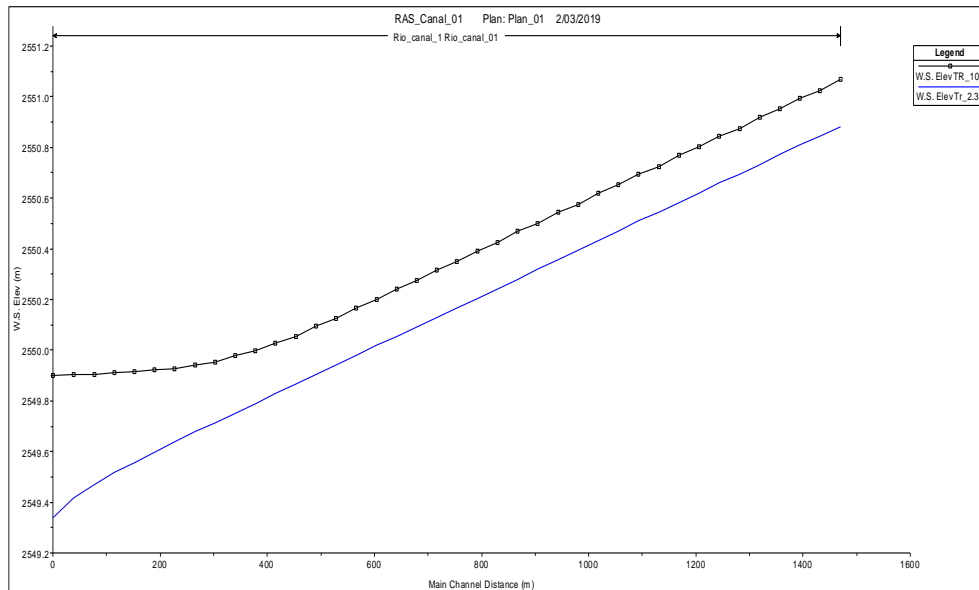
En la gráfica de profundidad hidráulica del canal, se puede evidenciar que en el periodo de retorno de 2.33 años al finalizar el perfil del flujo en la zona de remanso, se presentan láminas de agua entre 0.10 m y 0.13 m, en el tramo inicial se presentan láminas de agua entre 0.30 m y 0.38 m. Las láminas de agua en el periodo de retorno de 100 años tienden a ser más constantes entre sí a través de lo largo del canal. Al finalizar el perfil de flujo debido a que se presenta una elevación, las láminas de agua pasan de 0.27 m a valores desde 0.30 m y 0.55 m.



Gráfica 19. Profundidad hidráulica - primer canal

Tomado de: Propio

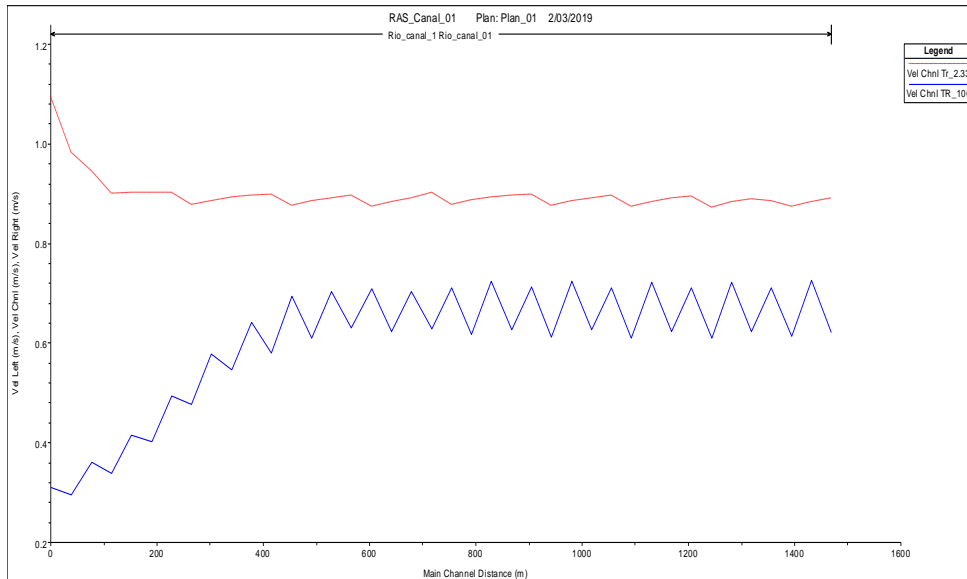
En la siguiente gráfica se puede apreciar las cotas de la lámina de agua en los dos periodos de retorno 2.33 años y 100 años. Se evidencian que las cotas de lámina tienden a ser lineales hasta los puntos donde inicia el remanso o la elevación, las cotas para el perfil de 2.33 años se encuentran entre 2550.88 m y 2549.34 m, las cotas para el perfil de 100 años se encuentran entre 2551.07 m y 2549.31 m.



Gráfica 20. Cota de lámina de agua - primer canal

Tomado de: Propio

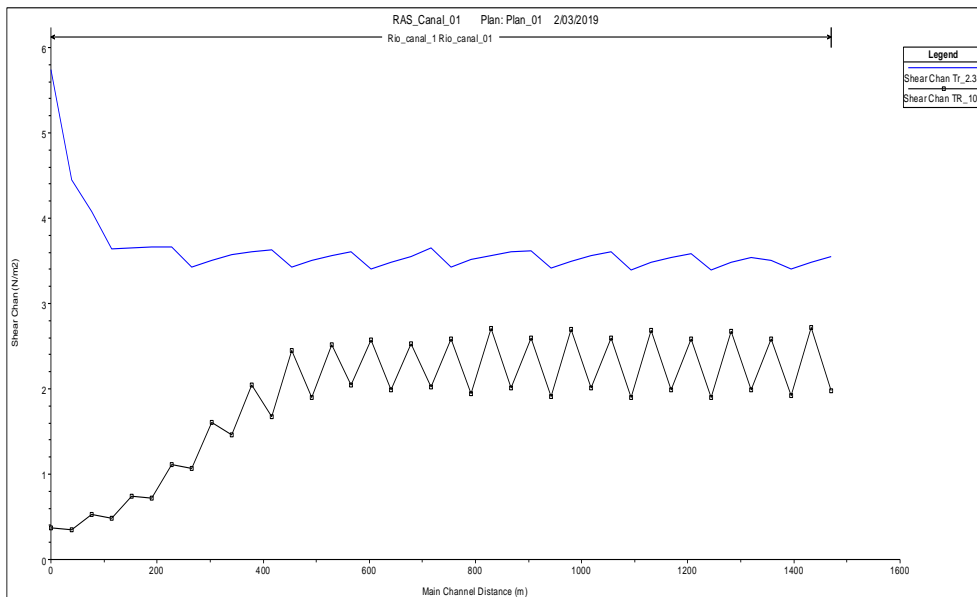
A continuación, se muestran las gráficas de velocidades en los periodos de retorno. En el periodo de retorno de 100 años las velocidades no tienen a ser constantes y son variables, se encuentran en un rango entre 0.31 m/s y 0.63 m/s. Para el periodo de retorno de 2.33 años las velocidades tienden a ser más constantes, oscilando entre 0.87 m/s y 1.10 m/s. La variabilidad se debe a que es un canal sinuoso y por cambios de dirección entre curvas las velocidades aumentan y disminuyen.



Gráfica 21. Velocidad - primer canal

Tomado de: Propio

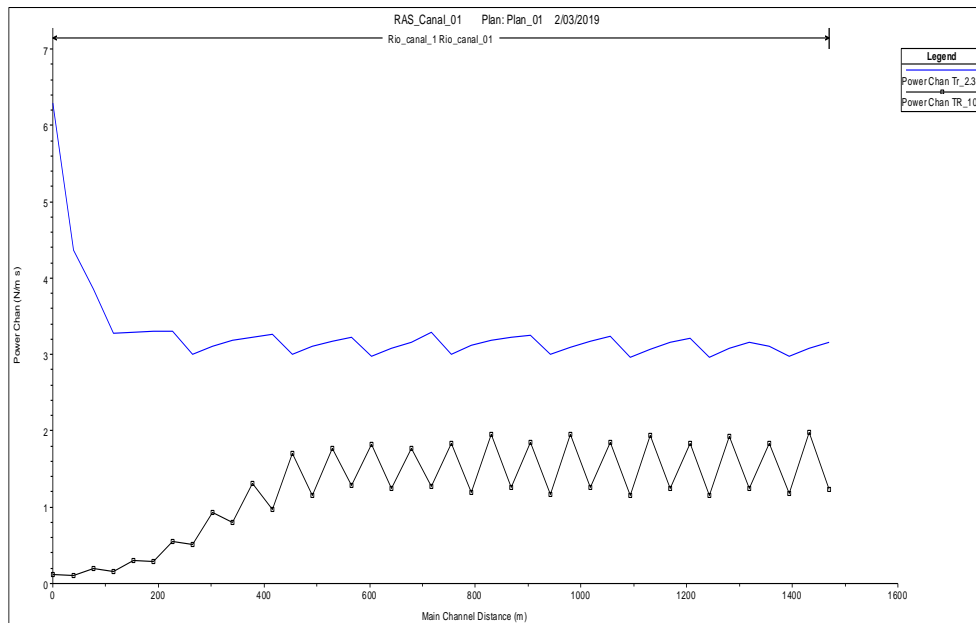
A continuación, se muestran las gráficas de los esfuerzos cortantes generados en el canal, en el periodo de retorno de 2.33 años oscilan entre 3.30 N/m² y 5.74 N/m², para el periodo de retorno de 100 años estos esfuerzos se encuentran entre 0.35 N/m² y 2.72 N/m².



Gráfica 22. Esfuerzo cortante - primer canal

Tomado de: Propio

En la siguiente gráfica se muestra la potencia de la corriente para cada uno de los periodos de retorno. En el periodo de retorno de 2.33 años en la zona de remanso, se presentan valores de potencia entre 3.58 N/m*s y 6.29 N/m*s. En el tramo del perfil de flujo uniforme los valores oscilan entre 2.96 N/m*s y 3.85 N/m*s. En el periodo de retorno de 100 años en la zona de elevación del flujo, se presentan valores de potencia entre 0.1 N/m*s y 0.97 N/m*s. En el tramo del perfil de flujo uniforme los valores oscilan entre 1.16 N/m*s y 1.98 N/m*s.



Gráfica 23. Potencia de la corriente - primer canal

Tomado de: Propio

7.1.1. Resultados RAS Mapper modelación hidráulica primer canal

A continuación, se realizan los análisis de los resultados de la modelación hidráulica en RAS Mapper. En consideración, este análisis se realiza de forma específica, debido a los comportamientos uniformes que se presentan en cada sección transversal, esto se debe a la modelación que fue transitada en flujo subcrítico.

Las profundidades hidráulicas para el periodo de retorno de 2.33 años a través de la sección hidráulica del cauce dominante, presentan una aproximación de 0.38 m. Tomando como referencia la sección transversal de la abscisa 859.1981, en la cual se identifica una lámina de agua de 0.386 m y comparándose con la calculada con la hoja de diseño correspondiente a 0.38 m, se evidencia que estos datos coinciden en toda la longitud del canal.

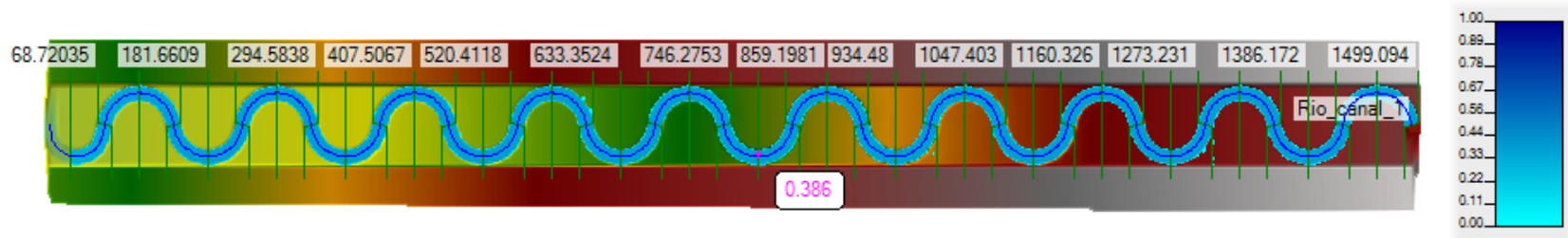


Figura 80. Profundidades hidráulicas RAS Mapper TR 2.33 años - primer canal

Tomado de: Propio

De acuerdo a las profundidades hidráulicas para el periodo de retorno de 100 años, se toma como referencia la sección transversal de la abscisa 859.1981, en la cual se identifica una lámina de agua de 0.567 m, comparándose con la calculada con

la hoja de diseño correspondiente a 0.67 m, con una diferencia de 0.10 m. El borde libre que se presenta es de 0.433 m, el cual permite el tránsito de crecientes de periodos de retorno más altos.

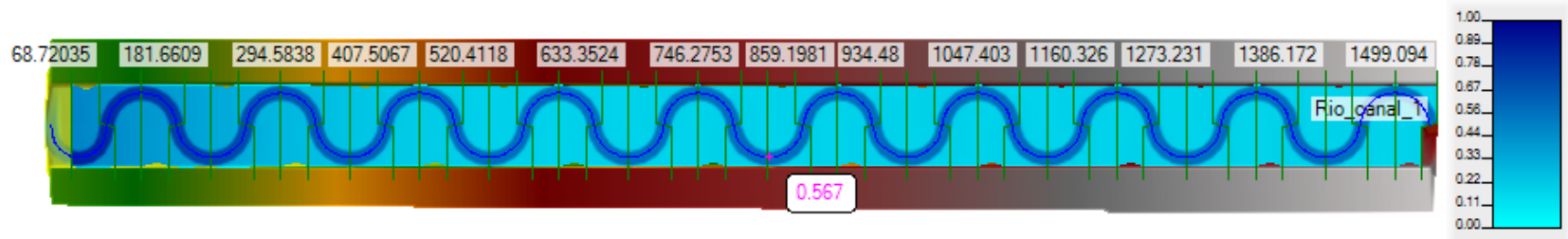


Figura 81. Profundidades hidráulicas RAS Mapper TR 100 años - primer canal

Tomado de: Propio

En la siguiente figura se evidencia la mapificación de la fuerza tractiva para un periodo de retorno de 2.33, observándose de acuerdo a la escala gráfica que los resultados de mayor valor se presentan en las uniones y en punto central de las curvas recargadas a los taludes del canal valle. En la zona de remanso del perfil de flujo se identifican los valores más altos de fuerza tractiva.

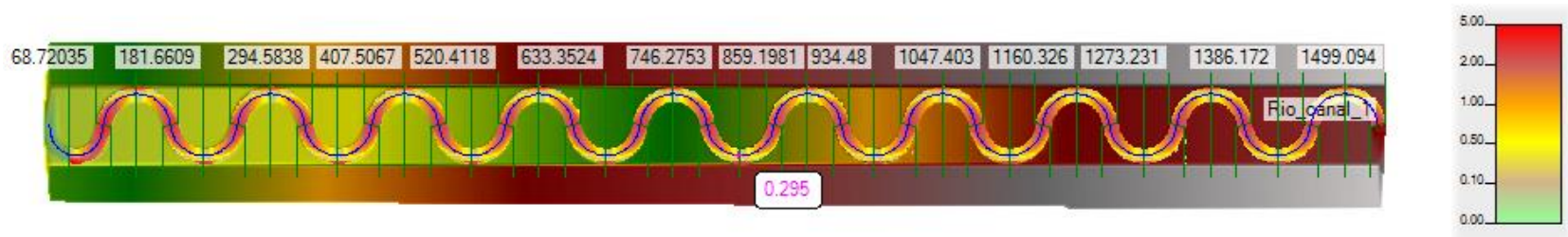


Figura 82. Fuerza tractiva RAS Mapper TR 2.33 años - primer canal

Tomado de: Propio

Así mismo, se muestra la mapificación de los resultados de fuerza tractiva para un periodo de retorno de 100 años, donde se observa que los valores más altos se concentran en las zonas de curvatura del cauce sinuoso sobre el canal valle. En la zona de elevación se evidencian las fuerzas tractivas más bajas, así como en las zonas entre curva y curva.

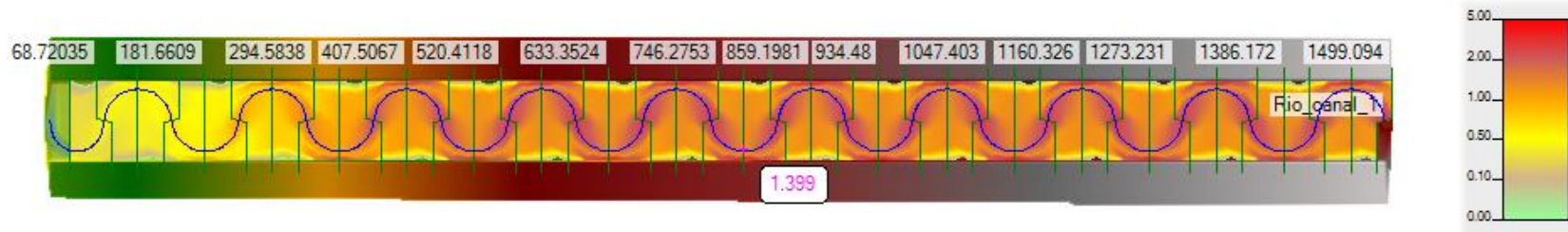


Figura 83. Fuerza tractiva RAS Mapper TR 100 años - primer canal

Tomado de: Propio

En la siguiente figura se puede apreciar el comportamiento de las velocidad en canal dominante a un periodo de retorno de 2.33 años. Se puede observar que las velocidades más altas las cuales se aproximan a 1 m/s se generan en la zona central de la unión de las curvas. Las velocidades de menor valor se presentan hacia las zonas centrales de cada curva. Los valores más altos de velocidades de flujo de todo el canal se presentan en la zona de remanso del canal aguas abajo.

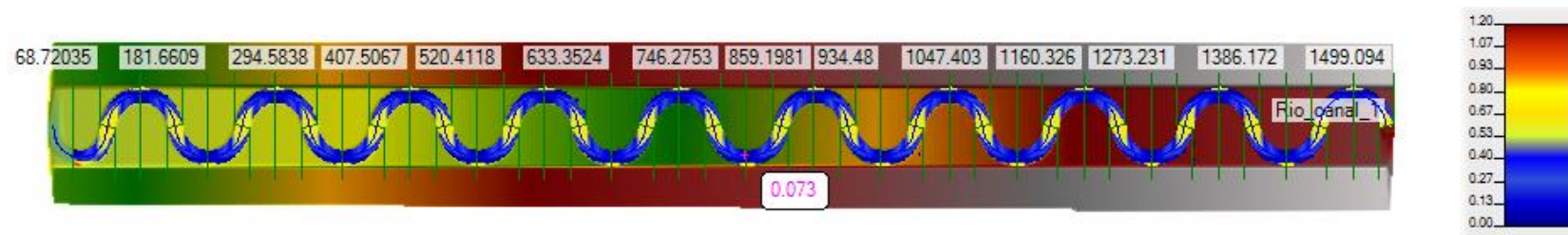


Figura 84. Velocidad RAS Mapper TR 2.33 años - primer canal

Tomado de: Propio

Igualmente, se puede apreciar el comportamiento de las velocidades en el canal a un periodo de retorno de 100 años. Se evidencia que los valores más altos de velocidad se presentan en las zonas de unión y en los costados externos de las curvas. Los menores valores se presentan en las zonas del canal valle en la parte interna de las curvas. En la zona de elevación las velocidades son las más bajas de todo el canal.

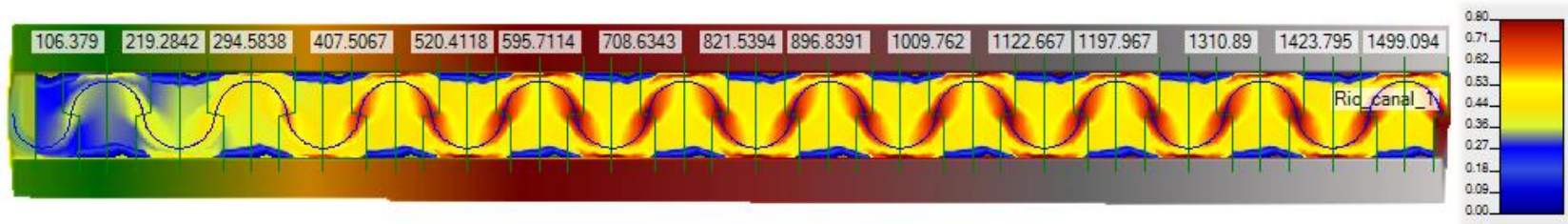


Figura 85. Velocidad RAS Mapper TR 100 años - primer canal

Tomado de: Propio

Por otra parte, se muestra la mapificación de la potencia de la corriente que los mayores valores se concentran en la unión y parte externa de las curvas. Los menores valores se presentan en las curvas del canal sinuoso.

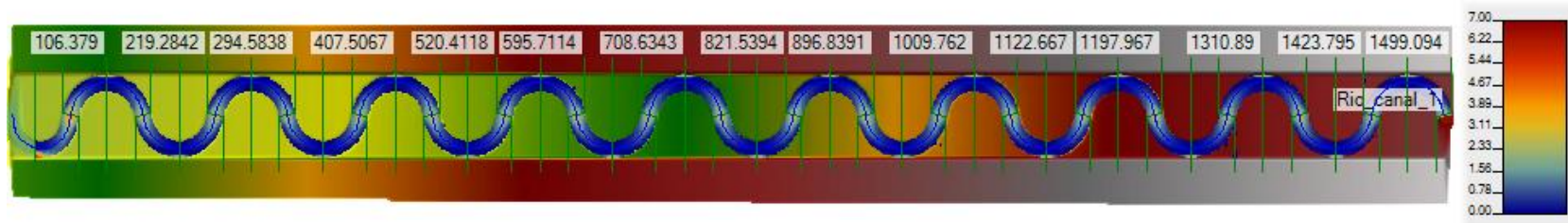


Figura 86. Potencia de la corriente RAS Mapper TR 2.33 años - primer canal

Tomado de: Propio

En la siguiente figura se evidencia la potencia de la corriente para un periodo de retorno de 100 años. Lo mayores valores se presentan en las uniones y parte externa de las curvas. Los menores valores se encuentran en la zona lateral del canal valle hacia cada costado de los taludes. Así mismo, se evidencia que en el canal valle se presenta mayor expansión de los datos de potencia, debido al rango a que el rango en que se encuentran es mucho menor que del canal dominante.

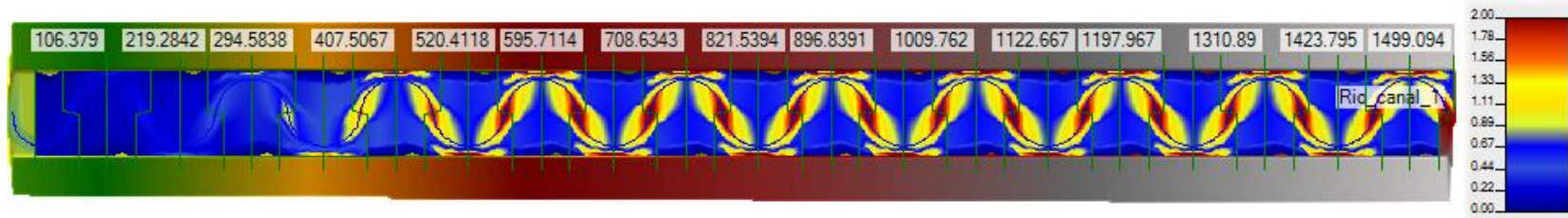


Figura 87. Potencia de la corriente RAS Mapper TR 100 años - primer canal

Tomado de: Propio

A continuación, se muestra la verificación de cumplimiento de los resultados de fuerza tractiva, velocidad y borde libre, de acuerdo a los valores de referencia recomendados y el borde libre calculado en la hoja de diseño del presente proyecto de grado. En los resultados se puede apreciar que la fuerza tractiva del canal y la velocidad del flujo en los dos periodos de retorno cumple con los valores de referencia. El borde libre del canal al finalizar el flujo desde la abscisa donde se inicia la elevación, no cumple debido a su comportamiento hidráulico de acuerdo a las condiciones de frontera definidas inicialmente. El borde libre en la descarga del flujo es de 0.13 m.

Tabla 31. Verificación de resultados modelación hidráulica TR 100 años – primer canal

A continuación se presentan los valores de referencia recomendados:

FUERZA TRACTIVA REFERENCIA (N/m ²)	
CANAL DOMINANTE (n=0.018)	11.93
CANAL CRECIENTE (n=0.035)	41.11

VELOCIDAD REFERENCIA (m/s)	
CANAL DOMINANTE (n=0.018)	1.19
CANAL CRECIENTE (n=0.035)	1.31

BORDE LIBRE CALCULADO (m)	0.33
---------------------------	------

SECCIÓN TRANSVERSAL	PERFIL	FUERZA TRACTIVA TOTAL	VERIFICACIÓN	VELOCIDAD TOTAL	VERIFICACIÓN	BORDE LIBRE	VERIFICACIÓN
		(N/m ²)		(m/s)		(m)	
1499.094	TR_100	1.97	CUMPLE	0.62	CUMPLE	0.43	CUMPLE
1461.453	TR_100	2.72	CUMPLE	0.73	CUMPLE	0.44	CUMPLE
1423.795	TR_100	1.92	CUMPLE	0.61	CUMPLE	0.45	CUMPLE
1386.172	TR_100	2.58	CUMPLE	0.71	CUMPLE	0.45	CUMPLE
1348.531	TR_100	1.99	CUMPLE	0.62	CUMPLE	0.43	CUMPLE
1310.89	TR_100	2.68	CUMPLE	0.72	CUMPLE	0.44	CUMPLE
1273.231	TR_100	1.9	CUMPLE	0.61	CUMPLE	0.45	CUMPLE
1235.608	TR_100	2.59	CUMPLE	0.71	CUMPLE	0.44	CUMPLE
1197.967	TR_100	1.99	CUMPLE	0.62	CUMPLE	0.43	CUMPLE
1160.326	TR_100	2.68	CUMPLE	0.72	CUMPLE	0.44	CUMPLE
1122.667	TR_100	1.9	CUMPLE	0.61	CUMPLE	0.45	CUMPLE
1085.044	TR_100	2.59	CUMPLE	0.71	CUMPLE	0.44	CUMPLE
1047.403	TR_100	2.02	CUMPLE	0.63	CUMPLE	0.43	CUMPLE
1009.762	TR_100	2.7	CUMPLE	0.72	CUMPLE	0.45	CUMPLE
972.1033	TR_100	1.91	CUMPLE	0.61	CUMPLE	0.45	CUMPLE
934.48	TR_100	2.6	CUMPLE	0.71	CUMPLE	0.44	CUMPLE
896.8391	TR_100	2.01	CUMPLE	0.63	CUMPLE	0.43	CUMPLE
859.1981	TR_100	2.7	CUMPLE	0.72	CUMPLE	0.45	CUMPLE

SECCIÓN TRANSVERSAL	PERFIL	FUERZA TRACTIVA TOTAL	VERIFICACIÓN	VELOCIDAD TOTAL	VERIFICACIÓN	BORDE LIBRE	VERIFICACIÓN
		(N/m2)		(m/s)		(m)	
821.5394	TR_100	1.94	CUMPLE	0.62	CUMPLE	0.45	CUMPLE
783.9162	TR_100	2.59	CUMPLE	0.71	CUMPLE	0.44	CUMPLE
746.2753	TR_100	2.03	CUMPLE	0.63	CUMPLE	0.42	CUMPLE
708.6343	TR_100	2.52	CUMPLE	0.7	CUMPLE	0.44	CUMPLE
670.9756	TR_100	1.99	CUMPLE	0.62	CUMPLE	0.44	CUMPLE
633.3524	TR_100	2.57	CUMPLE	0.71	CUMPLE	0.44	CUMPLE
595.7114	TR_100	2.05	CUMPLE	0.63	CUMPLE	0.42	CUMPLE
558.0705	TR_100	2.52	CUMPLE	0.7	CUMPLE	0.44	CUMPLE
520.4118	TR_100	1.89	CUMPLE	0.61	CUMPLE	0.44	CUMPLE
482.7886	TR_100	2.45	CUMPLE	0.7	CUMPLE	0.44	CUMPLE
445.1476	TR_100	1.68	CUMPLE	0.58	CUMPLE	0.41	CUMPLE
407.5067	TR_100	2.04	CUMPLE	0.64	CUMPLE	0.41	CUMPLE
369.848	TR_100	1.47	CUMPLE	0.55	CUMPLE	0.4	CUMPLE
332.2248	TR_100	1.6	CUMPLE	0.58	CUMPLE	0.39	CUMPLE
294.5838	TR_100	1.07	CUMPLE	0.48	CUMPLE	0.35	CUMPLE
256.9429	TR_100	1.11	CUMPLE	0.49	CUMPLE	0.33	NO CUMPLE
219.2842	TR_100	0.72	CUMPLE	0.4	CUMPLE	0.31	NO CUMPLE
181.6609	TR_100	0.74	CUMPLE	0.42	CUMPLE	0.27	NO CUMPLE
144.02	TR_100	0.48	CUMPLE	0.34	CUMPLE	0.23	NO CUMPLE
106.379	TR_100	0.53	CUMPLE	0.36	CUMPLE	0.2	NO CUMPLE
68.72035	TR_100	0.35	CUMPLE	0.3	CUMPLE	0.18	NO CUMPLE
29.59894	TR_100	0.37	CUMPLE	0.31	CUMPLE	0.13	NO CUMPLE

Fuente: Propio

Tabla 32. Verificación de resultados modelación hidráulica TR 2.33 años – primer canal

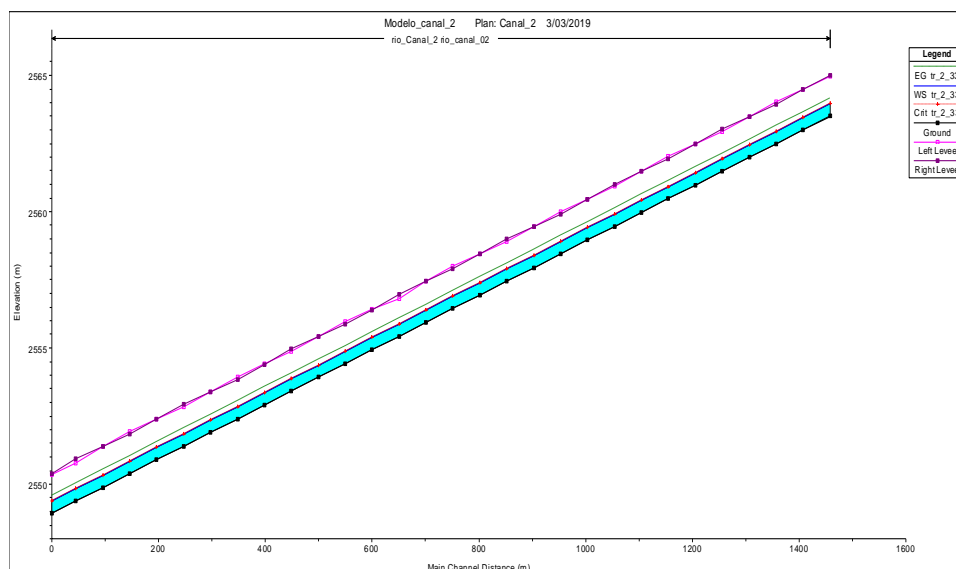
SECCIÓN TRANSVERSAL	PERFIL	FUERZA TRACTIVA TOTAL	VERIFICACIÓN	VELOCIDAD TOTAL	VERIFICACIÓN
		(N/m2)		(m/s)	
1461.453	Tr_2.33	3.48	CUMPLE	0.88	CUMPLE
1423.795	Tr_2.33	3.4	CUMPLE	0.87	CUMPLE
1386.172	Tr_2.33	3.51	CUMPLE	0.89	CUMPLE
1348.531	Tr_2.33	3.54	CUMPLE	0.89	CUMPLE
1310.89	Tr_2.33	3.48	CUMPLE	0.88	CUMPLE
1273.231	Tr_2.33	3.39	CUMPLE	0.87	CUMPLE
1235.608	Tr_2.33	3.59	CUMPLE	0.9	CUMPLE
1197.967	Tr_2.33	3.54	CUMPLE	0.89	CUMPLE
1160.326	Tr_2.33	3.48	CUMPLE	0.88	CUMPLE
1122.667	Tr_2.33	3.4	CUMPLE	0.87	CUMPLE
1085.044	Tr_2.33	3.61	CUMPLE	0.9	CUMPLE
1047.403	Tr_2.33	3.56	CUMPLE	0.89	CUMPLE
1009.762	Tr_2.33	3.5	CUMPLE	0.89	CUMPLE
972.1033	Tr_2.33	3.42	CUMPLE	0.88	CUMPLE
934.48	Tr_2.33	3.62	CUMPLE	0.9	CUMPLE
896.8391	Tr_2.33	3.6	CUMPLE	0.9	CUMPLE
859.1981	Tr_2.33	3.56	CUMPLE	0.89	CUMPLE
821.5394	Tr_2.33	3.51	CUMPLE	0.89	CUMPLE
783.9162	Tr_2.33	3.43	CUMPLE	0.88	CUMPLE
746.2753	Tr_2.33	3.65	CUMPLE	0.9	CUMPLE
708.6343	Tr_2.33	3.55	CUMPLE	0.89	CUMPLE
670.9756	Tr_2.33	3.48	CUMPLE	0.88	CUMPLE
633.3524	Tr_2.33	3.4	CUMPLE	0.87	CUMPLE

SECCIÓN TRANSVERSAL	PERFIL	FUERZA TRACTIVA TOTAL	VERIFICACIÓN	VELOCIDAD TOTAL	VERIFICACIÓN
		(N/m ²)		(m/s)	
595.7114	Tr_2.33	3.6	CUMPLE	0.9	CUMPLE
558.0705	Tr_2.33	3.56	CUMPLE	0.89	CUMPLE
520.4118	Tr_2.33	3.5	CUMPLE	0.89	CUMPLE
482.7886	Tr_2.33	3.42	CUMPLE	0.88	CUMPLE
445.1476	Tr_2.33	3.63	CUMPLE	0.9	CUMPLE
407.5067	Tr_2.33	3.6	CUMPLE	0.9	CUMPLE
369.848	Tr_2.33	3.57	CUMPLE	0.89	CUMPLE
332.2248	Tr_2.33	3.5	CUMPLE	0.89	CUMPLE
294.5838	Tr_2.33	3.42	CUMPLE	0.88	CUMPLE
256.9429	Tr_2.33	3.66	CUMPLE	0.9	CUMPLE
219.2842	Tr_2.33	3.66	CUMPLE	0.9	CUMPLE
181.6609	Tr_2.33	3.65	CUMPLE	0.9	CUMPLE
144.02	Tr_2.33	3.64	CUMPLE	0.9	CUMPLE
106.379	Tr_2.33	4.07	CUMPLE	0.95	CUMPLE
68.72035	Tr_2.33	4.45	CUMPLE	0.98	CUMPLE
29.59894	Tr_2.33	5.74	CUMPLE	1.1	CUMPLE

Fuente: Propio

7.2. Resultados modelación hidráulica segundo canal

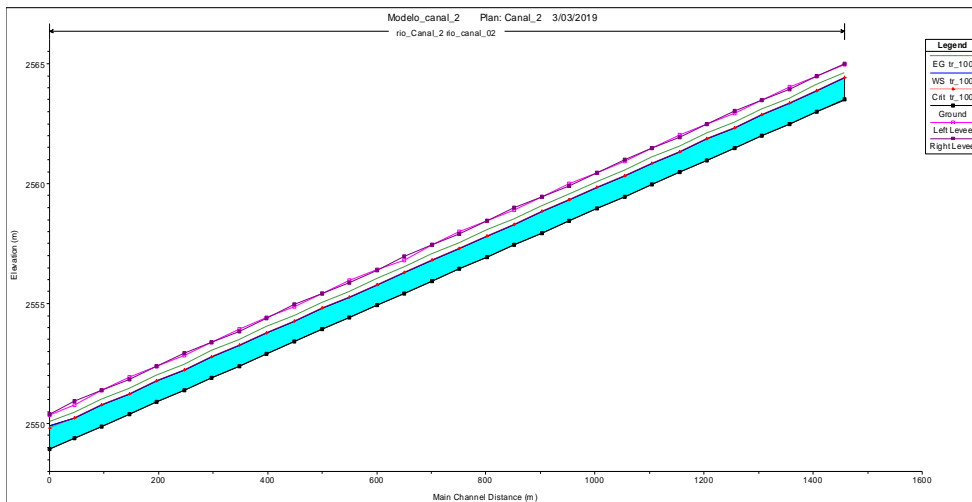
En la siguiente gráfica se puede apreciar el perfil longitudinal de flujo a un periodo de retorno de 2.33 años, donde se aprecia que de acuerdo a las condiciones de frontera definidas inicialmente, el perfil de flujo tiende a presentar un remanso al finalizar, ya que se definió una cota menor a partir de la lámina de agua, con el fin de generar un flujo uniforme en todo el canal.



Gráfica 24. Perfil longitudinal de flujo TR 2.33 años - segundo canal

Tomado de: Propio

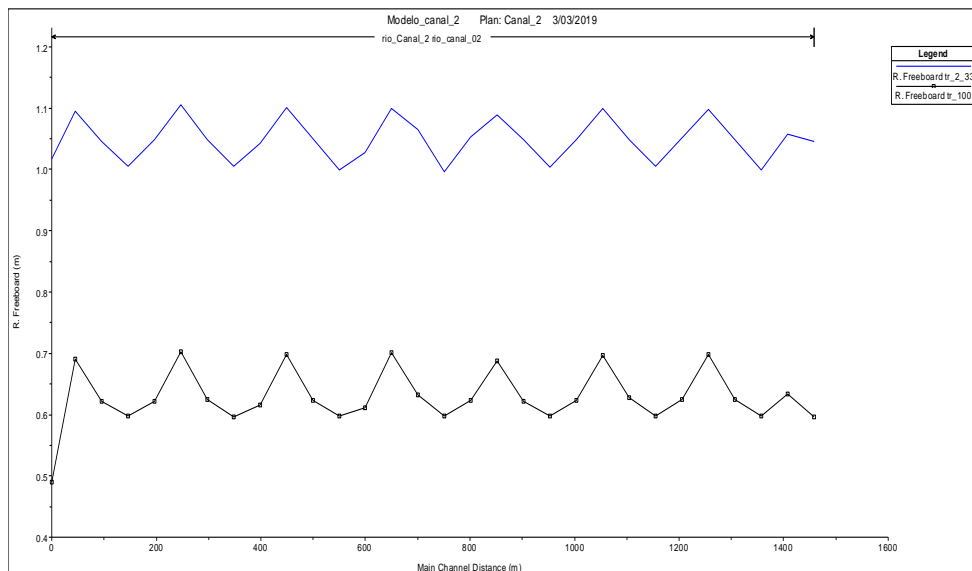
Así mismo, se puede apreciar el perfil longitudinal de flujo a un periodo de retorno de 100 años, donde se aprecia que de acuerdo a las condiciones de frontera definidas inicialmente, el perfil de flujo tiende a presentar una elevación al finalizar, ya que se definió una cota mayor a partir de la lámina de agua, con el fin de generar un flujo uniforme en todo el canal.



Gráfica 25. Perfil longitudinal de flujo TR 100 años – segundo canal

Tomado de: Propio

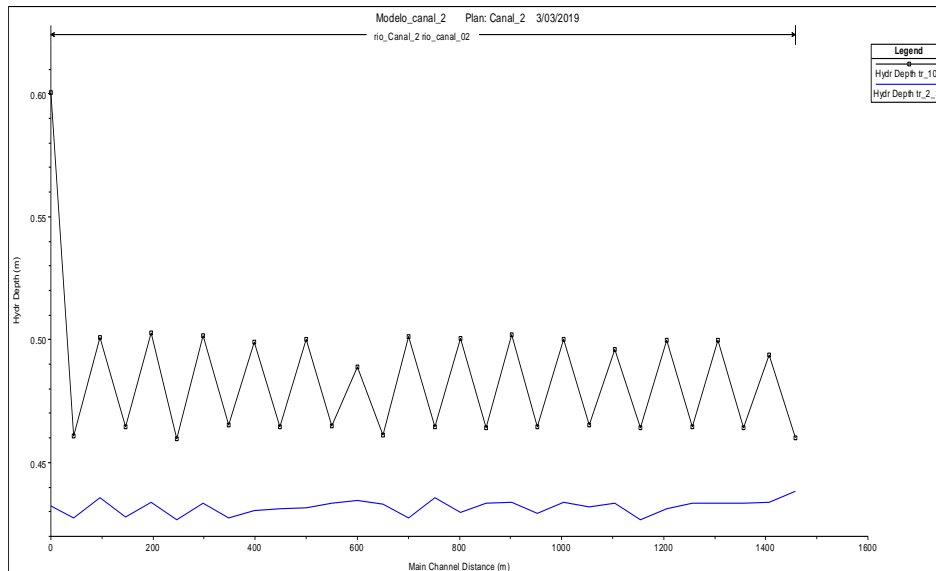
En la siguiente gráfica se pueden evidenciar los bordes libres generados a lo largo del canal en cada uno de los periodos de retorno. En ambos periodos de retorno se observa que los bordes libres no son constantes y tienen una variación a lo largo del canal. En el periodo de retorno de 2.33 años se pueden evidenciar bordes libres entre 1.00 m y 1.10 m y en el periodo de retorno de 100 años los rangos de borde libre están entre 0.49 m y 0.70 m.



Gráfica 26. Bordos libres - segundo canal

Tomado de: Propio

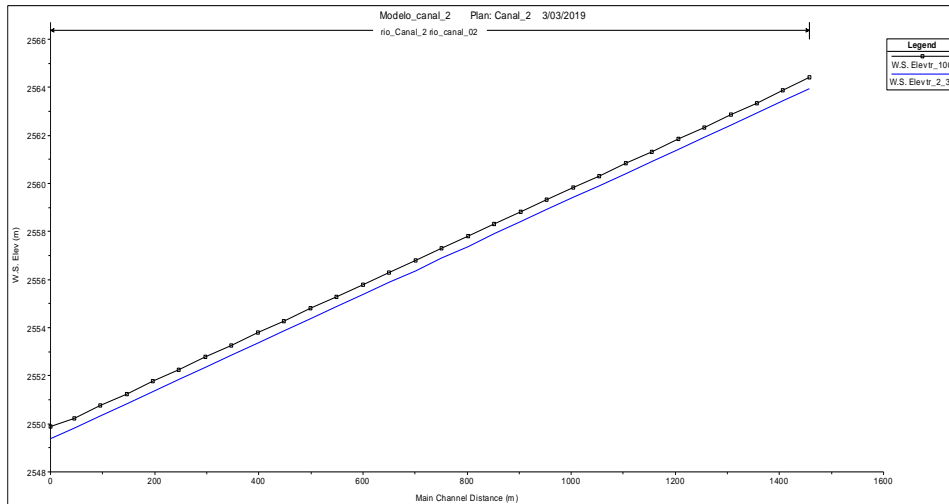
En la gráfica de profundidad hidráulica del canal, se puede evidenciar que en el periodo de retorno de 2.33 años las láminas de agua son más variables las cuales oscilan entre 0.43m y 0.44m, lo cual puede depender de la sinuosidad del cauce. Las láminas de agua en el periodo de retorno de 100 años tienden a ser más constantes entre sí a través a lo largo del canal. Las láminas de agua para este periodo de retorno están entre 0.46m y 0.60m.



Gráfica 27. Profundidad hidráulica - segundo canal

Tomado de: Propio

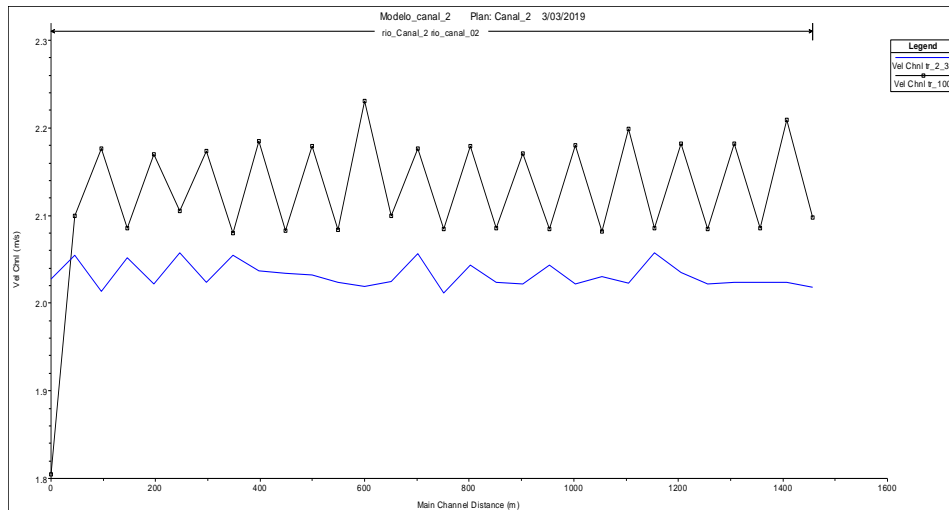
En la siguiente gráfica se puede apreciar las cotas de la lámina de agua de los dos periodos de retorno 2.33 años y 100 años. Se evidencian que las cotas de lámina tienden a ser lineales hasta los puntos donde inicia el remanso o la elevación, las cotas para el perfil de 2.33 años se encuentran entre 2549.37 m y 2563.95 m, las cotas para el perfil de 100 años se encuentran entre 2549.9 m y 2564.40 m.



Gráfica 28. Cota de lámina de agua - segundo canal

Tomado de: Propio

A continuación, se muestran las gráficas de velocidades en los periodos de retorno. En el periodo de retorno de 100 años las velocidades no tienen a ser constantes y son muy variables, se encuentran en un rango entre 1.8 m/s y 2.23 m/s. Para el periodo de retorno de 2.33 años las velocidades tienden a ser más constantes, oscilando entre 2.01 m/s y 2.06 m/s.

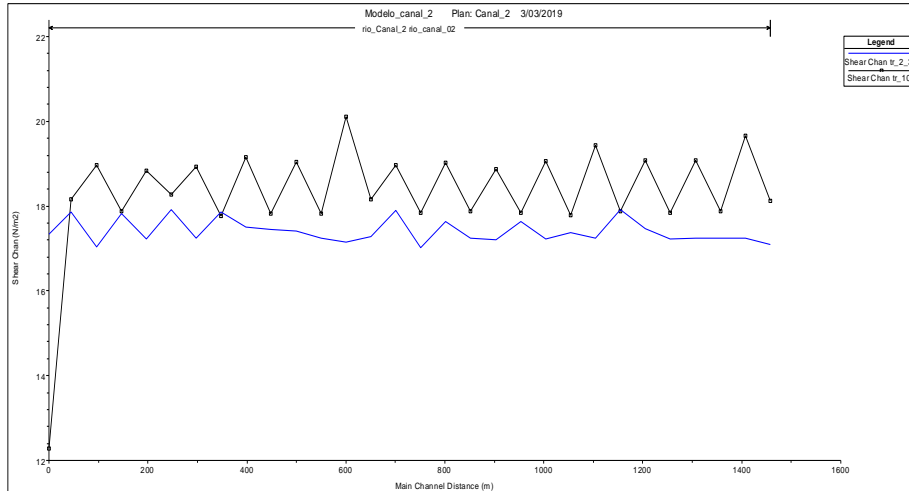


Gráfica 29. Velocidad - segundo canal

Tomado de: Propio

A continuación, se muestran las gráficas de los esfuerzos cortantes generados en el canal. Se puede evidenciar que en el periodo de retorno de 2.33 años tienden a ser menos

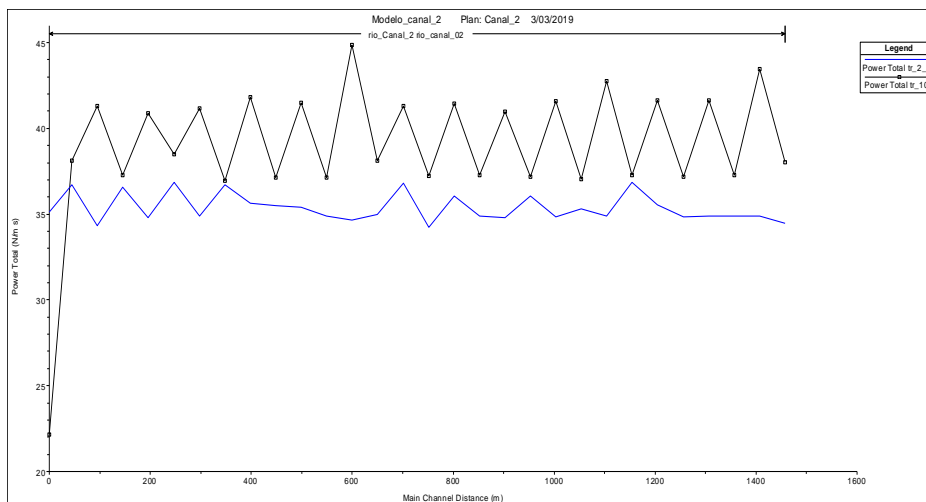
variables y oscilan entre 17.02 N/m^2 y 17.92 N/m^2 . Para el periodo de retorno de 100 años, los esfuerzos cortantes son más variables, y se encuentran entre 12.28 N/m^2 y 20.11 N/m^2 .



Gráfica 30. Esfuerzo cortante - segundo canal

Tomado de: Propio

En la siguiente gráfica se muestra la potencia de la corriente para cada uno de los periodos de retorno. En el periodo de retorno de 2.33 años se presentan valores de potencia entre $34.24 \text{ N/m}^2\text{s}$ y $36.87 \text{ N/m}^2\text{s}$. En el periodo de retorno de 100 años se presentan valores de potencia entre $22.15 \text{ N/m}^2\text{s}$ y $44.86 \text{ N/m}^2\text{s}$.



Gráfica 31. Potencia de la corriente - segundo canal

Tomado de: Propio

7.2.1. Resultados RAS Mapper modelación hidráulica segundo canal

A continuación, se realizan los análisis de los resultados de la modelación hidráulica en RAS Mapper. En consideración, este análisis se realiza de forma específica, debido a los comportamientos uniformes que se presentan en cada sección transversal, esto se debe a la modelación que fue transitada en flujo subcrítico.

Las profundidades hidráulicas para el periodo de retorno de 2.33 años a través de la sección hidráulica del cauce dominante, presentan una aproximación de 0.44 m. Tomando como referencia la sección transversal de la abscisa 793.7633, en la cual se identifica una lámina de agua de 0.441 m y comparándose con la calculada con la hoja de diseño correspondiente a 0.49 m, se evidencia que estos datos son muy aproximados en toda la longitud del canal.

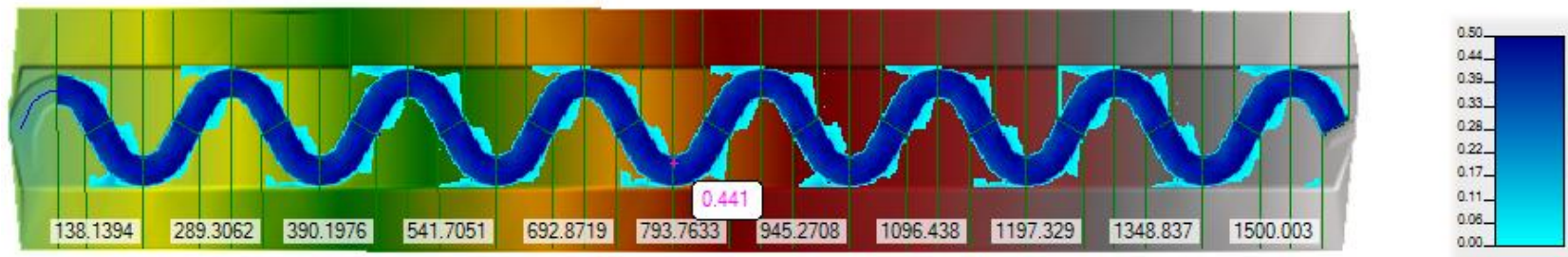


Figura 88. Profundidades hidráulicas RAS Mapper TR 2.33 años - segundo canal

Tomado de: Propio

De acuerdo a las profundidades hidráulicas para el periodo de retorno de 100 años, se toma como referencia la sección transversal de la abscisa 793.7633, en la cual se identifica una lámina de agua de 0.873 m, comparándose con la calculada con

la hoja de diseño correspondiente a 0.92 m, con una diferencia de 0.50 m. El borde libre que se presenta es de 0.62 m, el cual permite el tránsito de crecientes de periodos de retorno más altos.

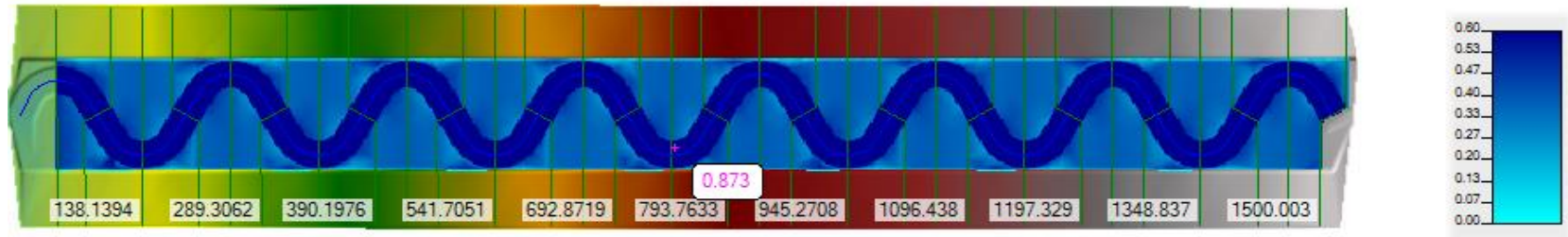


Figura 89. Profundidades hidráulicas RAS Mapper TR 100 años - segundo canal

Tomado de: Propio

En la siguiente figura se evidencia la mapificación de la fuerza tractiva para un periodo de retorno de 2.33, observándose de acuerdo a la escala gráfica que los resultados de mayor valor se presentan en las uniones y en punto central de las curvas recargadas a los taludes del canal valle. En la zona de remanso del perfil de flujo se identifican los valores más altos de fuerza tractiva. Los valores más bajos de fuerza tractiva se presentan en la zona interna de las curvas del canal dominante.

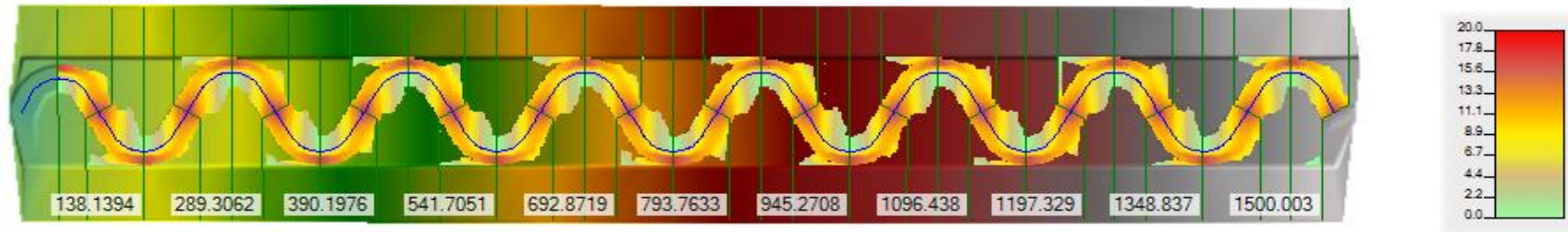


Figura 90. Fuerza tractiva RAS Mapper TR 2.33 años - segundo canal

Tomado de: Propio

Así mismo, se muestra la mapificación de los resultados de fuerza tractiva para un periodo de retorno de 100 años, donde se observa que los valores más altos se concentran en las zonas de curvatura del cauce sinuoso sobre el canal valle. En la zona entre curva y curva hacia los taludes del canal valle se evidencian las fuerzas tractivas más bajas.

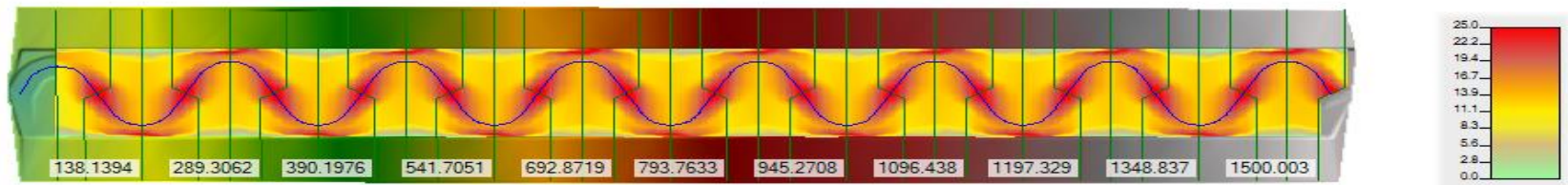


Figura 91. Fuerza tractiva RAS Mapper TR 100 años - segundo canal

Tomado de: Propio

En la siguiente figura se puede apreciar el comportamiento de las velocidades en canal dominante a un periodo de retorno de 2.33 años. Se puede observar que las velocidades más altas las cuales se aproximan a 2.20 m/s se generan en la zona central de la unión y en la zona externa de las curvas. Las velocidades de menor valor se presentan hacia las zonas centrales internas de cada curva.

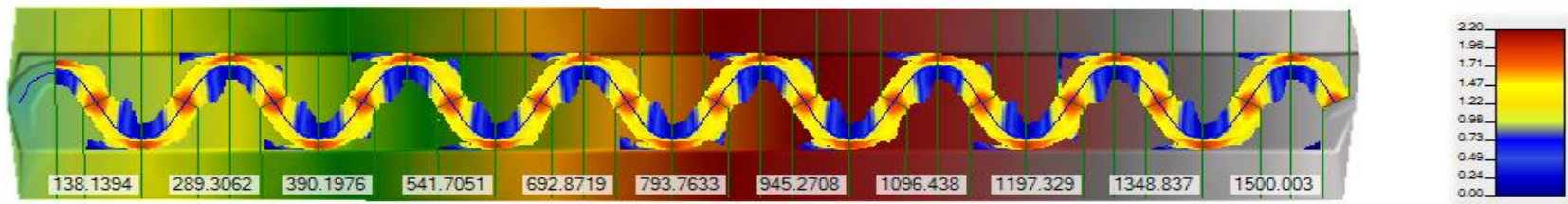


Figura 92. Velocidad RAS Mapper TR 2.33 años - segundo canal

Tomado de: Propio

Igualmente, se puede apreciar el comportamiento de las velocidades en el canal a un periodo de retorno de 100 años. Se evidencia que los valores más altos de velocidad se presentan en las zonas de unión y en los costados externos de las curvas. Los menores valores se presentan en las zonas del canal valle en la parte interna de las curvas hacia los costados de los taludes del canal valle.

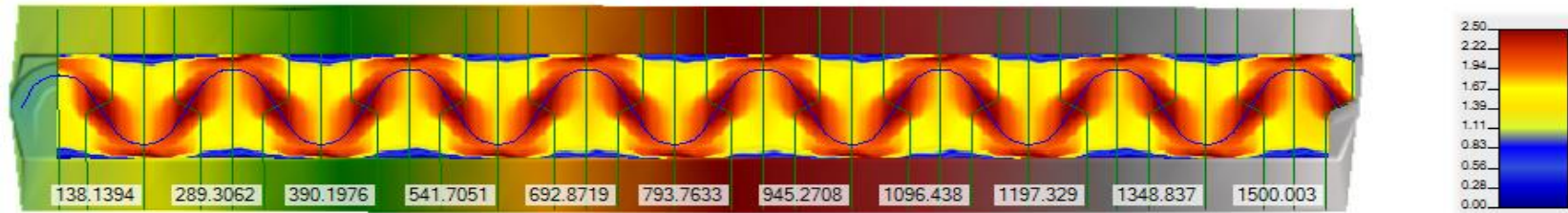


Figura 93. Velocidad RAS Mapper TR 100 años - segundo canal

Tomado de: Propio

Por otra parte, se muestra la mapificación de la potencia de la corriente, donde se evidencia que dentro del canal dominante los mayores valores se concentran en la unión y parte externa de las curvas. Los menores valores se presentan en la zona interna de las curvas del canal sinuoso.

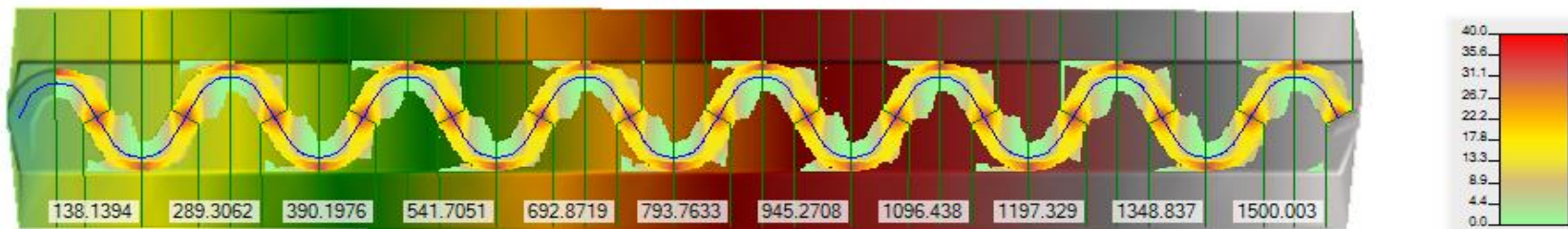


Figura 94. Potencia de la corriente RAS Mapper TR 2.33 años - segundo canal

Tomado de: Propio

En la siguiente figura se evidencia la potencia de la corriente para un periodo de retorno de 100 años. Lo mayores valores se presentan en las uniones y parte externa de las curvas. Los menores valores se encuentran en la zona lateral del canal valle hacia cada costado de los taludes del canal valle. Así mismo, se evidencia que en el canal valle se presenta mayor expansión de los datos de potencia.

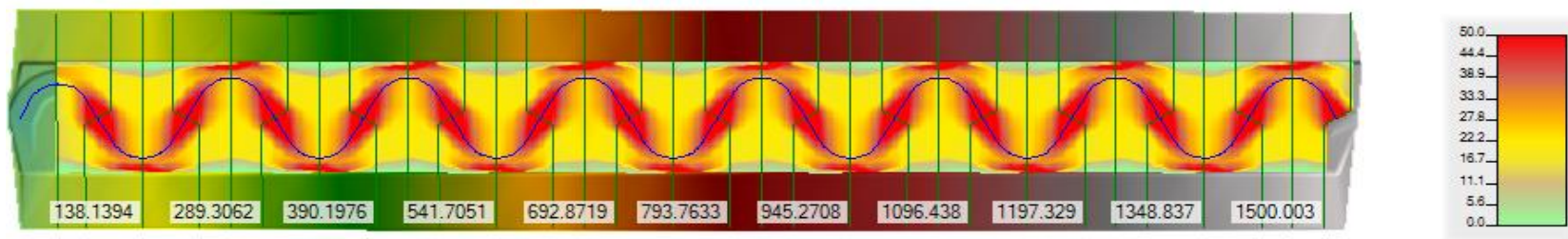


Figura 95. Potencia de la corriente RAS Mapper TR 100 años - segundo canal

Tomado de: Propio

A continuación, se muestra la verificación de cumplimiento de los resultados de fuerza tractiva, velocidad y borde libre, de acuerdo con los valores de referencia recomendados y el borde libre calculado en la hoja de diseño del presente proyecto de grado. En los resultados del canal valle para un periodo de retorno de 100 años, se puede apreciar que la fuerza tractiva del canal, la velocidad del flujo y el borde libre cumple con los valores de referencia. El borde libre del canal al finalizar el flujo desde la abscisa donde se inicia la elevación no cumple debido a su comportamiento hidráulico de acuerdo con las condiciones de frontera definidas inicialmente. Se evidencia que los valores de fuerza tractiva y velocidad para el canal dominante en un periodo de retorno de 2.33 años, de acuerdo con los valores de referencia no cumplen. Se evidencia que la pendiente pronunciada del presente canal (0.01 m/m) aumenta estos valores de fuerza tractiva y velocidad, en un régimen de flujo subcrítico.

Tabla 33. Verificación de resultados modelación hidráulica TR 100 años – segundo canal

A continuación se presentan los valores de referencia recomendados:

FUERZA TRACTIVA REFERENCIA (N/m ²)	
CANAL DOMINANTE (n=0.018)	11.93
CANAL CRECIENTE (n=0.035)	41.11

VELOCIDAD REFERENCIA (m/s)	
CANAL DOMINANTE (n=0.018)	1.19
CANAL CRECIENTE (n=0.035)	1.31

BORDE LIBRE CALCULADO (m)	0.33
---------------------------	------

SECCIÓN TRANSVERSAL	PERFIL	FUERZA TRACTIVA TOTAL	VERIFICACIÓN	VELOCIDAD TOTAL	VERIFICACIÓN	BORDE LIBRE	VERIFICACIÓN
		(N/m ²)		(m/s)		(m)	
1500.003	TR_100	18.13	CUMPLE	2.1	NO CUMPLE	0.6	CUMPLE
1449.444	TR_100	19.66	CUMPLE	2.21	NO CUMPLE	0.63	CUMPLE
1399.112	TR_100	17.88	CUMPLE	2.09	NO CUMPLE	0.6	CUMPLE
1348.837	TR_100	19.09	CUMPLE	2.18	NO CUMPLE	0.62	CUMPLE
1298.22	TR_100	17.85	CUMPLE	2.08	NO CUMPLE	0.7	CUMPLE
1247.661	TR_100	19.09	CUMPLE	2.18	NO CUMPLE	0.62	CUMPLE
1197.329	TR_100	17.88	CUMPLE	2.09	NO CUMPLE	0.6	CUMPLE
1147.054	TR_100	19.44	CUMPLE	2.2	NO CUMPLE	0.63	CUMPLE
1096.438	TR_100	17.79	CUMPLE	2.08	NO CUMPLE	0.7	CUMPLE
1045.879	TR_100	19.06	CUMPLE	2.18	NO CUMPLE	0.62	CUMPLE
995.5461	TR_100	17.85	CUMPLE	2.08	NO CUMPLE	0.6	CUMPLE
945.2708	TR_100	18.87	CUMPLE	2.17	NO CUMPLE	0.62	CUMPLE
894.6547	TR_100	17.87	CUMPLE	2.09	NO CUMPLE	0.69	CUMPLE
844.0958	TR_100	19.03	CUMPLE	2.18	NO CUMPLE	0.62	CUMPLE
793.7633	TR_100	17.85	CUMPLE	2.08	NO CUMPLE	0.6	CUMPLE
743.488	TR_100	18.97	CUMPLE	2.18	NO CUMPLE	0.63	CUMPLE
692.8719	TR_100	18.16	CUMPLE	2.1	NO CUMPLE	0.7	CUMPLE
642.3129	TR_100	20.11	NO CUMPLE	2.23	NO CUMPLE	0.61	CUMPLE

SECCIÓN TRANSVERSAL	PERFIL	FUERZA TRACTIVA TOTAL	VERIFICACIÓN	VELOCIDAD TOTAL	VERIFICACIÓN	BORDE LIBRE	VERIFICACIÓN
		(N/m2)		(m/s)		(m)	
591.9804	TR_100	17.82	CUMPLE	2.08	NO CUMPLE	0.6	CUMPLE
541.7051	TR_100	19.03	CUMPLE	2.18	NO CUMPLE	0.62	CUMPLE
491.089	TR_100	17.83	CUMPLE	2.08	NO CUMPLE	0.7	CUMPLE
440.5301	TR_100	19.14	CUMPLE	2.18	NO CUMPLE	0.62	CUMPLE
390.1976	TR_100	17.77	CUMPLE	2.08	NO CUMPLE	0.6	CUMPLE
339.9222	TR_100	18.93	CUMPLE	2.17	NO CUMPLE	0.62	CUMPLE
289.3062	TR_100	18.28	CUMPLE	2.11	NO CUMPLE	0.7	CUMPLE
238.7472	TR_100	18.84	CUMPLE	2.17	NO CUMPLE	0.62	CUMPLE
188.4147	TR_100	17.88	CUMPLE	2.09	NO CUMPLE	0.6	CUMPLE
138.1394	TR_100	18.97	CUMPLE	2.18	NO CUMPLE	0.62	CUMPLE
87.52328	TR_100	18.16	CUMPLE	2.1	NO CUMPLE	0.69	CUMPLE
42.47442	TR_100	12.28	CUMPLE	1.8	NO CUMPLE	0.49	NO CUMPLE

Fuente: Propio

Tabla 34. Verificación de resultados modelación hidráulica TR 2.33 años – segundo canal

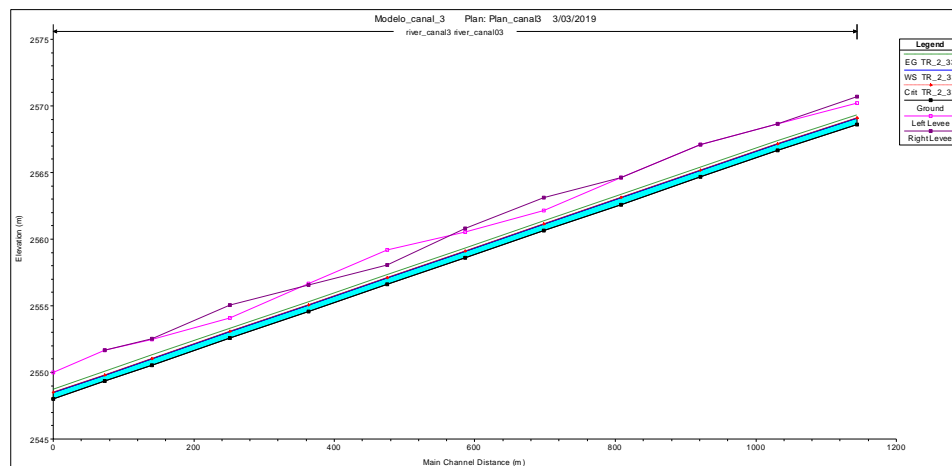
SECCIÓN TRANSVERSAL	PERFIL	FUERZA TRACTIVA TOTAL	VERIFICACIÓN	VELOCIDAD TOTAL	VERIFICACIÓN
		(N/m2)		(m/s)	
1500.003	Tr_2.33	17.09	NO CUMPLE	2.02	NO CUMPLE
1449.444	Tr_2.33	17.24	NO CUMPLE	2.02	NO CUMPLE
1399.112	Tr_2.33	17.25	NO CUMPLE	2.02	NO CUMPLE
1348.837	Tr_2.33	17.25	NO CUMPLE	2.02	NO CUMPLE
1298.22	Tr_2.33	17.22	NO CUMPLE	2.02	NO CUMPLE
1247.661	Tr_2.33	17.47	NO CUMPLE	2.03	NO CUMPLE
1197.329	Tr_2.33	17.92	NO CUMPLE	2.06	NO CUMPLE

SECCIÓN TRANSVERSAL	PERFIL	FUERZA TRACTIVA TOTAL	VERIFICACIÓN	VELOCIDAD TOTAL	VERIFICACIÓN
		(N/m2)		(m/s)	
1147.054	Tr_2.33	17.24	NO CUMPLE	2.02	NO CUMPLE
1096.438	Tr_2.33	17.38	NO CUMPLE	2.03	NO CUMPLE
1045.879	Tr_2.33	17.22	NO CUMPLE	2.02	NO CUMPLE
995.5461	Tr_2.33	17.64	NO CUMPLE	2.04	NO CUMPLE
945.2708	Tr_2.33	17.21	NO CUMPLE	2.02	NO CUMPLE
894.6547	Tr_2.33	17.25	NO CUMPLE	2.02	NO CUMPLE
844.0958	Tr_2.33	17.64	NO CUMPLE	2.04	NO CUMPLE
793.7633	Tr_2.33	17.02	NO CUMPLE	2.01	NO CUMPLE
743.488	Tr_2.33	17.89	NO CUMPLE	2.06	NO CUMPLE
692.8719	Tr_2.33	17.27	NO CUMPLE	2.03	NO CUMPLE
642.3129	Tr_2.33	17.15	NO CUMPLE	2.02	NO CUMPLE
591.9804	Tr_2.33	17.25	NO CUMPLE	2.02	NO CUMPLE
541.7051	Tr_2.33	17.41	NO CUMPLE	2.03	NO CUMPLE
491.089	Tr_2.33	17.45	NO CUMPLE	2.03	NO CUMPLE
440.5301	Tr_2.33	17.5	NO CUMPLE	2.04	NO CUMPLE
390.1976	Tr_2.33	17.86	NO CUMPLE	2.05	NO CUMPLE
339.9222	Tr_2.33	17.25	NO CUMPLE	2.02	NO CUMPLE
289.3062	Tr_2.33	17.92	NO CUMPLE	2.06	NO CUMPLE
238.7472	Tr_2.33	17.22	NO CUMPLE	2.02	NO CUMPLE
188.4147	Tr_2.33	17.82	NO CUMPLE	2.05	NO CUMPLE
138.1394	Tr_2.33	17.04	NO CUMPLE	2.01	NO CUMPLE
87.52328	Tr_2.33	17.86	NO CUMPLE	2.05	NO CUMPLE
42.47442	Tr_2.33	17.33	NO CUMPLE	2.03	NO CUMPLE

Fuente: Propio

7.3. Resultados modelación hidráulica tercer canal

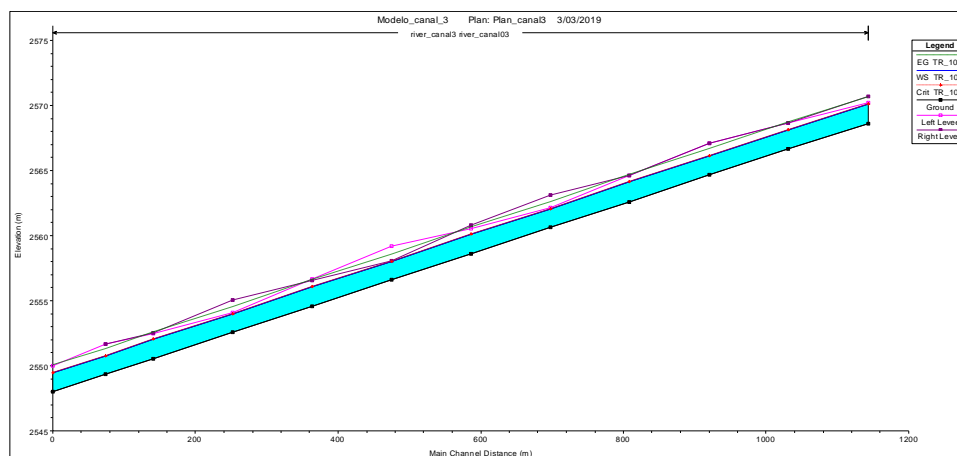
En la siguiente gráfica se puede apreciar el perfil longitudinal de flujo a un periodo de retorno de 2.33 años, donde se aprecia que de acuerdo a las condiciones de frontera definidas inicialmente, el perfil de flujo es uniforme en todo el canal.



Gráfica 32. Perfil longitudinal de flujo TR 2.33 años - tercer canal

Tomado de: Propio

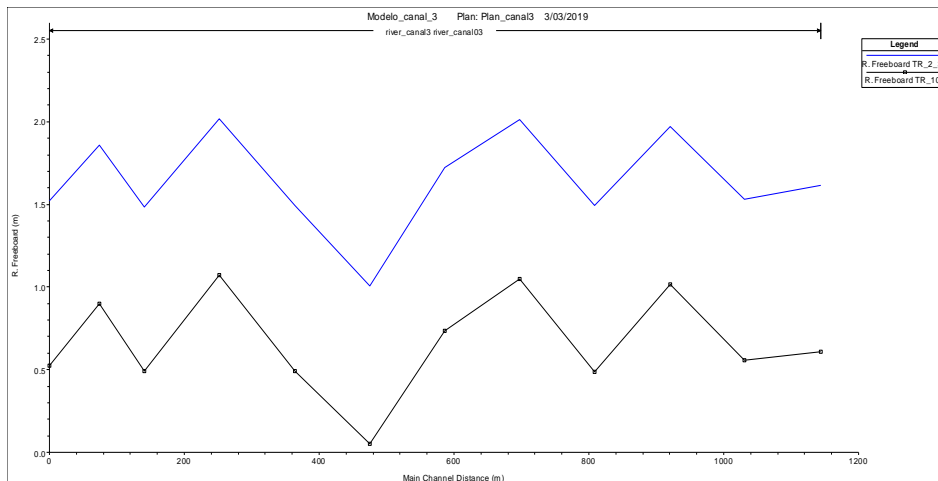
Así mismo, se puede apreciar el perfil longitudinal de flujo a un periodo de retorno de 100 años, donde se aprecia que de acuerdo a las condiciones de frontera definidas inicialmente, el perfil de flujo tiende a presentar una elevación al finalizar, ya que se definió una cota mayor a partir de la lámina de agua, con el fin de generar un flujo uniforme en todo el canal.



Gráfica 33. Perfil longitudinal de flujo TR 100 años - tercer canal

Tomado de: Propio

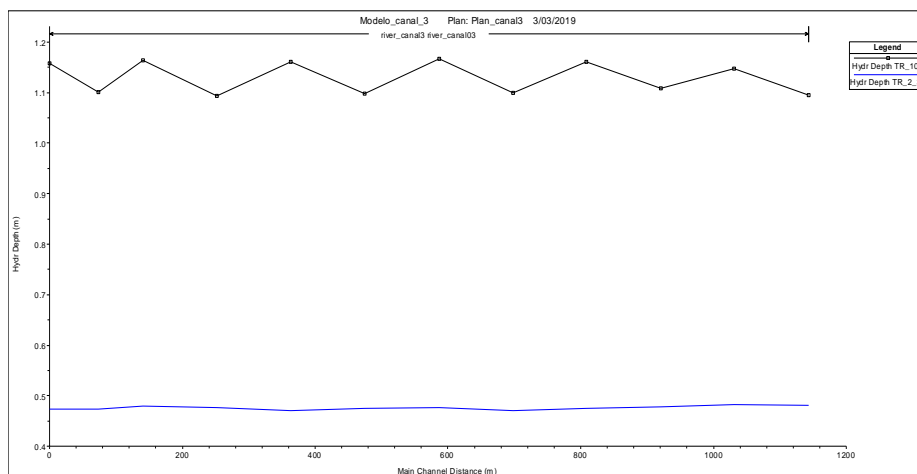
En la siguiente gráfica se pueden evidenciar los bordes libres generados a lo largo del canal en cada uno de los periodos de retorno. En ambos periodos de retorno se observa que los bordes libres no son constantes. Los bordes libres presentados en el canal para un periodo de retorno de 100 años, se encuentran en un rango entre 0.49 m y 1.07 m.



Gráfica 34. Bordes libres - tercer canal

Tomado de: Propio

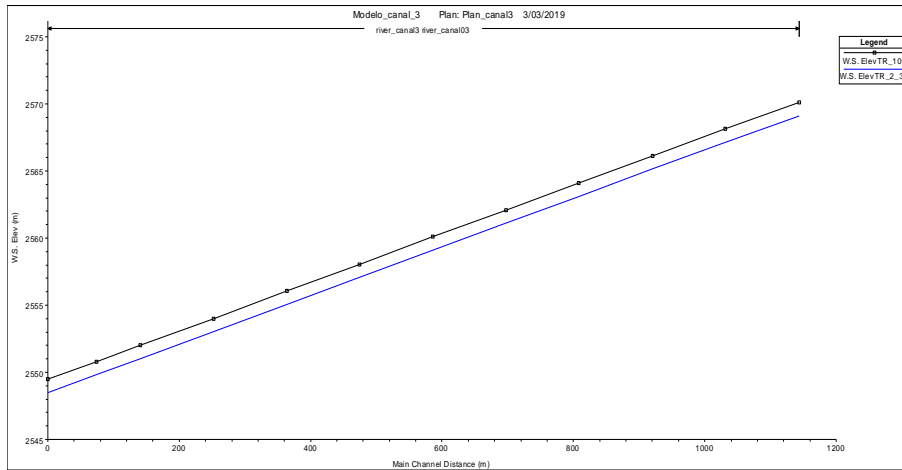
En la gráfica de profundidad hidráulica del canal, se puede evidenciar que en el periodo de retorno de 2.33 años se presentan láminas de agua entre 0.47 m y 0.48 m las cuales tienden a ser más constantes entre sí a través de lo largo del canal. Las láminas de agua en el periodo de retorno de 100 años oscilan entre 1.09 m y 1.17 m.



Gráfica 35. Profundidad hidráulica - tercer canal

Tomado de: Propio

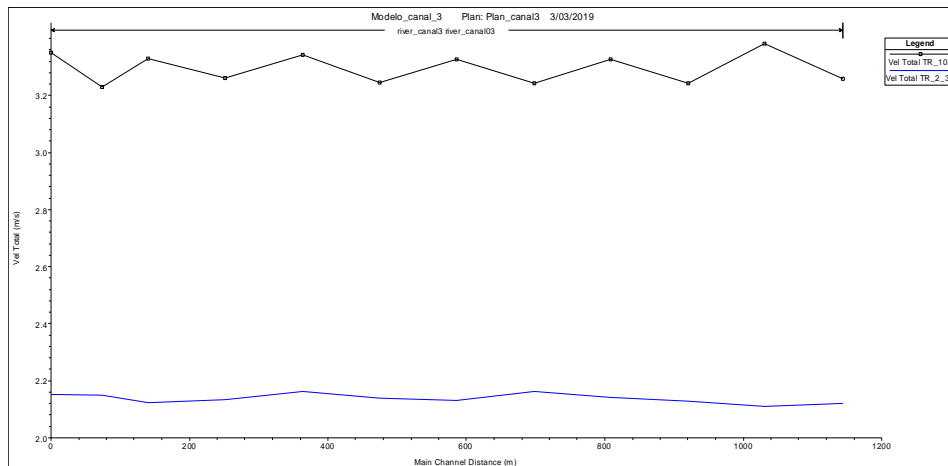
En la siguiente gráfica se puede apreciar las cotas de la lámina de agua en los dos periodos de retorno 2.33 años y 100 años. Se evidencian que las cotas de lámina tienden a ser lineales y paralelas, las cotas para el perfil de 2.33 años se encuentran entre 2548.88 m y 2569.09 m, las cotas para el perfil de 100 años se encuentran entre 2549.48 m y 2570.09m.



Gráfica 36. Cota de lámina de agua - tercer canal

Tomado de: Propio

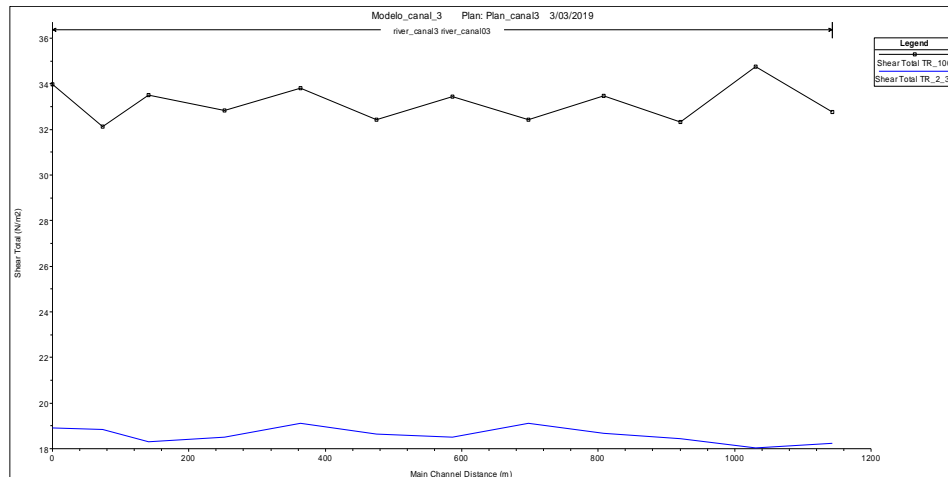
A continuación se muestran las gráficas de velocidades en los dos periodos de retorno. En el periodo de retorno de 100 años las velocidades no tienden a ser constantes y son variables, se encuentran en un rango entre 3.23 m/s y 3.38 m/s. Para el periodo de retorno de 2.33 años las velocidades tienden a ser más constantes, oscilando entre 2.11 m/s y 2.16 m/s.



Gráfica 37. Velocidad - tercer canal

Tomado de: Propio

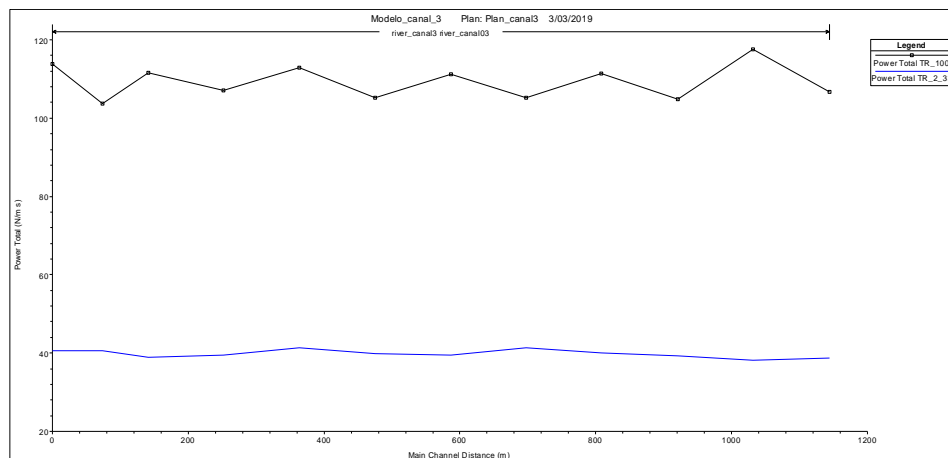
A continuación se muestran las gráficas de los esfuerzos cortantes generados en el canal, en el periodo de retorno de 2.33 años oscilan entre 18.05 N/m² y 19.12 N/m² y tienden a ser más constantes. Para el periodo de retorno de 100 años estos esfuerzos se encuentran entre 32.1 N/m² y 34.7 N/m² y son más variables que en el periodo de retorno de 2.33 años.



Gráfica 38. Esfuerzo cortante - tercer canal

Tomado de: Propio

En la siguiente gráfica se muestra la potencia de la corriente para cada uno de los periodos de retorno. En el periodo de retorno de 2.33 años los valores son más constantes y oscilan entre 38.08 N/m*s y 41.37 N/m*s. En el periodo de retorno de 100 años los valores son más variables y oscilan entre 103.8 N/m*s y 117.48 N/m*s.



Gráfica 39. Potencia de la corriente - tercer canal

Tomado de: Propio

7.3.1. Resultados RAS Mapper modelación hidráulica tercer canal

A continuación, se realizan los análisis de los resultados de la modelación hidráulica en RAS Mapper para el tercer canal. En consideración, este análisis se realiza de forma específica, debido a los comportamientos uniformes que se presentan en cada sección transversal, esto se debe a la modelación que fue transitada en flujo subcrítico.

Las profundidades hidráulicas para el periodo de retorno de 2.33 años a través de la sección hidráulica del cauce dominante, presentan una aproximación de 0.48 m. Tomando como referencia el promedio de la profundidad hidráulica del canal de acuerdo a los resultados arrojados por la modelación hidráulica, se identifica una lámina de agua promedio de 0.477 m y comparándose con la calculada con la hoja de diseño correspondiente a 0.57 m, se evidencia que estos datos son aproximados y presentan una diferencia de 0.10 m.

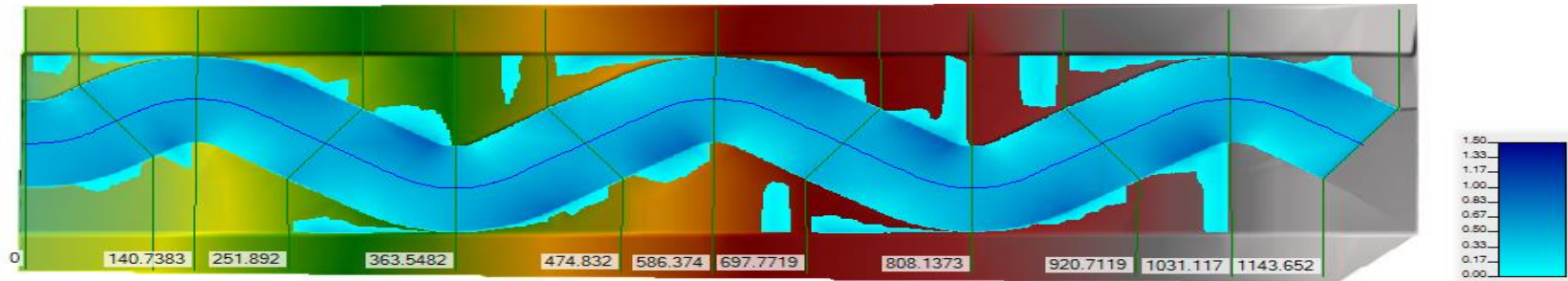


Figura 96. Profundidades hidráulicas RAS Mapper TR 2.33 años - tercer canal

Tomado de: Propio

Las profundidades hidráulicas para el periodo de retorno de 100 años a través de la sección hidráulica del canal valle, presentan un promedio de 1.13 m. Tomando como referencia el promedio de la profundidad hidráulica del canal de acuerdo a los resultados arrojados por la modelación hidráulica y comparándose con la calculada con la hoja de diseño correspondiente a 1.36 m, se evidencia que estos datos son aproximados y presentan una diferencia de 0.23 m.

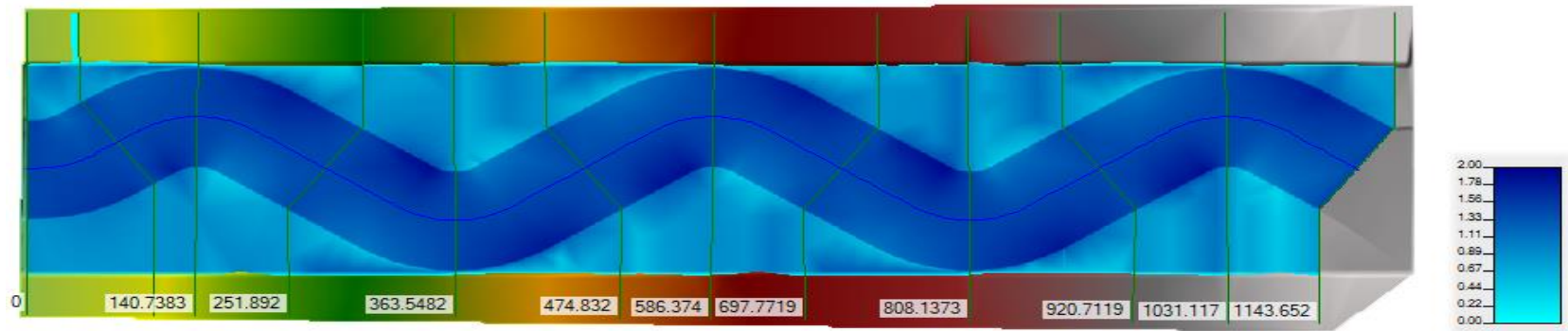


Figura 97. Profundidades hidráulicas RAS Mapper TR 100 años - tercer canal

Tomado de: Propio

En la siguiente figura se evidencia la mapificación de la fuerza tractiva para un periodo de retorno de 2.33, observándose de acuerdo a la escala gráfica que los resultados de mayor valor se presentan en las uniones y en punto central de las curvas recargadas a los taludes del canal valle. Los menores valores se hallan en la curva interna del cauce sinuoso.

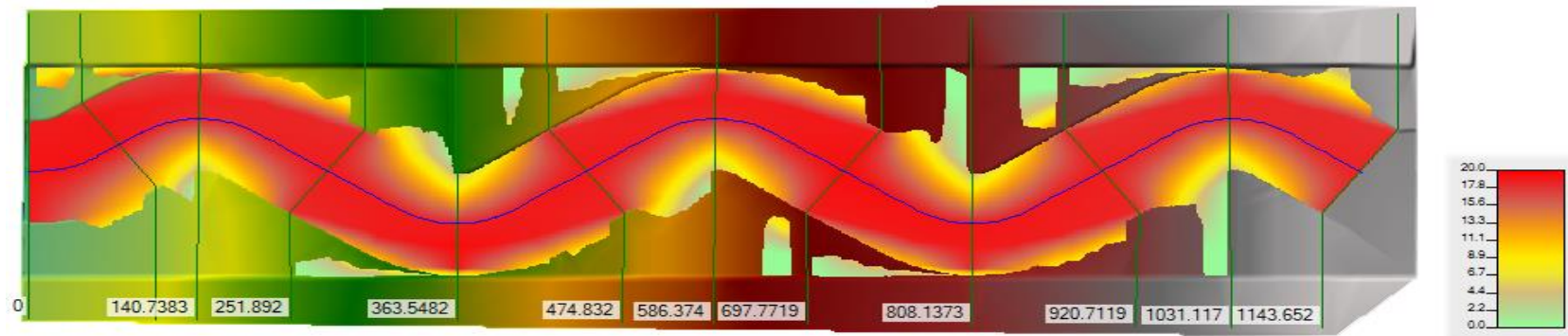


Figura 98. Fuerza tractiva RAS Mapper TR 2.33 años - tercer canal

Tomado de: Propio

Así mismo, se muestra la mapificación de los resultados de fuerza tractiva para un periodo de retorno de 100 años, donde se observa que los valores más altos se concentran en las zonas de curvatura del cauce sinuoso sobre el canal valle. Los menores valores se hallan en las zonas de valle entre curva y curva a los costados de los taludes.

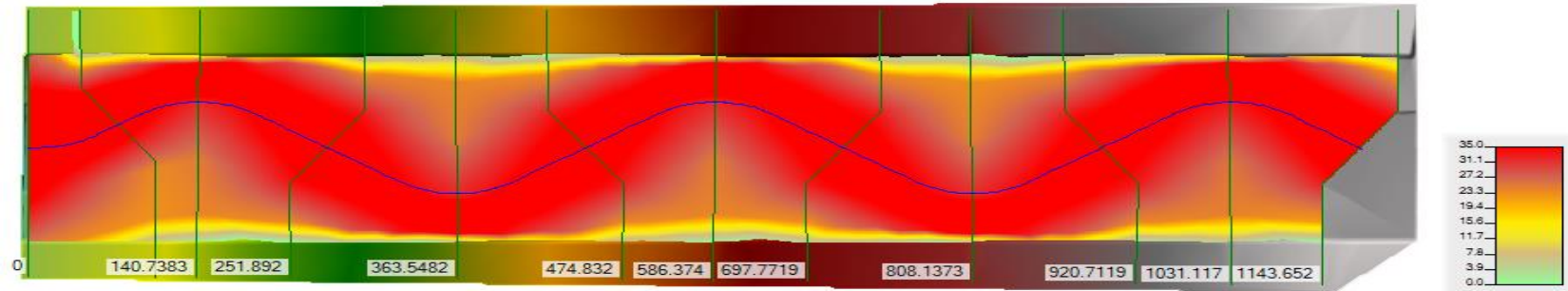


Figura 99. Fuerza tractiva RAS Mapper TR 100 años - tercer canal

Tomado de: Propio

En la siguiente figura se puede apreciar el comportamiento de las velocidades en canal dominante a un periodo de retorno de 2.33 años. Se puede observar que las velocidades más altas se aproximan a 2.20 m/s y se generan en la zona central del cauce. Las velocidades de menor valor se presentan hacia las zonas centrales de cada curva y hacia la base de los taludes.

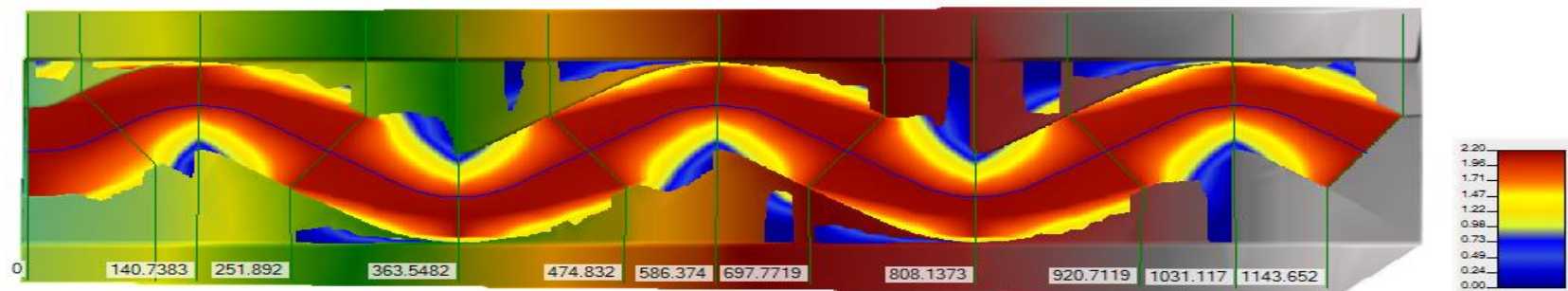


Figura 100. Velocidad RAS Mapper TR 2.33 años - tercer canal

Tomado de: Propio

Igualmente, se puede apreciar el comportamiento de las velocidades en el canal a un periodo de retorno de 100 años. Se evidencia que los valores más altos de velocidad se presentan en las zonas de unión y en los costados externos de las curvas. Los menores valores se presentan en las zonas del canal valle en la parte interna de las curvas y hacia la parte lateral de los taludes.

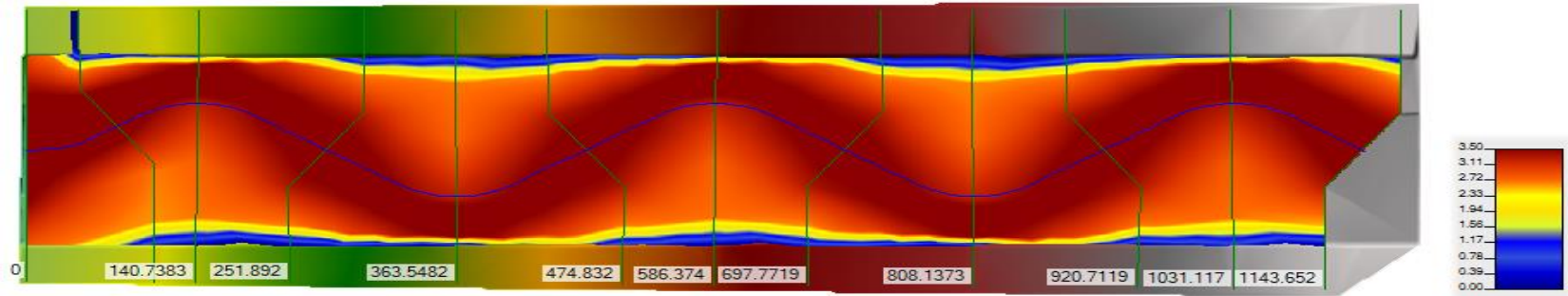


Figura 101. Velocidad RAS Mapper TR 100 años - tercer canal

Tomado de: Propio

Por otra parte, se muestra la mapiación de la potencia de la corriente, donde se evidencia que los mayores valores se concentran en la zona central de las curvas. Los menores valores se presentan hacia los costados laterales de los taludes.

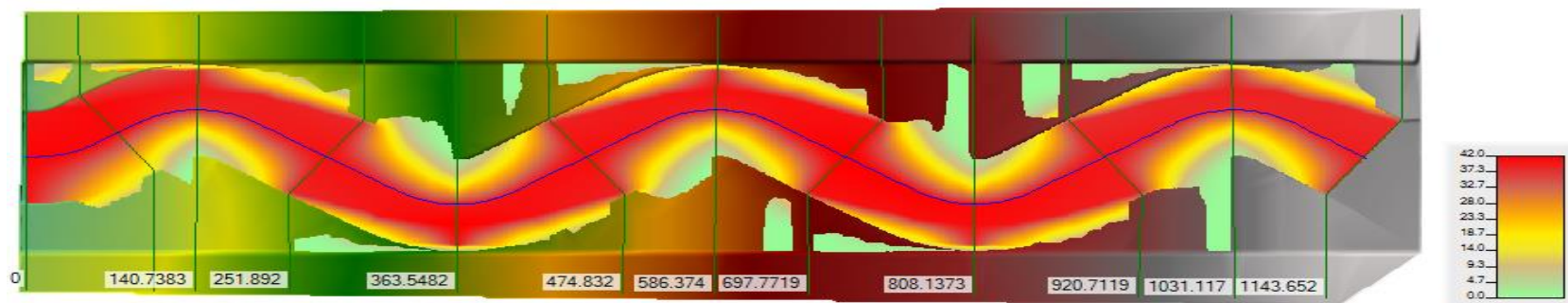


Figura 102. Potencia de la corriente RAS Mapper TR 2.33 años - tercer canal

Tomado de: Propio

En la siguiente figura se evidencia la potencia de la corriente para un periodo de retorno de 100 años. Los mayores valores se presentan en la zona central donde se ubica el cauce sinuoso. Los menores valores se encuentran en la zona lateral del canal valle hacia cada costado de los taludes. En las zonas planas del canal valle se evidencian datos de potencias intermedias. Así mismo, se evidencia que en el canal valle se presenta mayor expansión de los datos de potencia, debido al rango a que el rango en que se encuentran es mucho menor que del canal dominante.

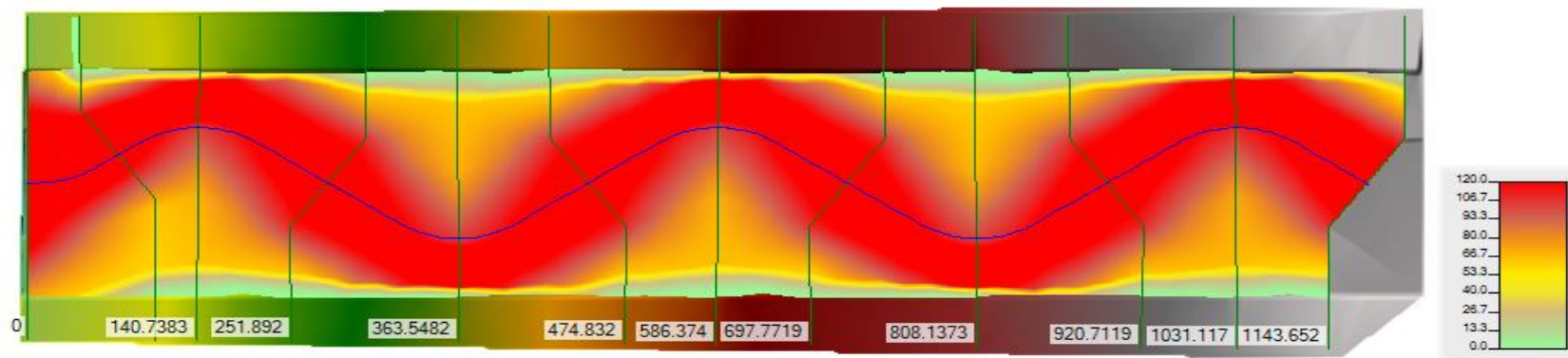


Figura 103. Potencia de la corriente RAS Mapper TR 100 años - tercer canal

Tomado de: Propio

A continuación, se muestra la verificación de cumplimiento de los resultados de fuerza tractiva, velocidad y borde libre, de acuerdo a los valores de referencia recomendados y el borde libre calculado en la hoja de diseño del presente proyecto de grado. En los resultados se puede apreciar que la fuerza tractiva del canal y la velocidad del flujo en los dos periodos de retorno no cumple, ya que los resultados están por encima de los valores de referencia. En las secciones transversales ubicadas en el centro de las curvas y que son lineales, el borde libre cumple con el valor de referencia tomado de las hojas de diseño.

Tabla 35. Verificación de resultados modelación hidráulica TR 100 años – tercer canal

A continuación se presentan los valores de referencia recomendados:

FUERZA TRACTIVA REFERENCIA (N/m ²)	
CANAL DOMINANTE (n=0.018)	10
CANAL CRECIENTE (n=0.035)	20

VELOCIDAD REFERENCIA (m/s)	
CANAL DOMINANTE (n=0.018)	2
CANAL CRECIENTE (n=0.035)	3

BORDE LIBRE CALCULADO (m)	0.64
---------------------------	------

SECCIÓN TRANSVERSAL	PERFIL	FUERZA TRACTIVA TOTAL	VERIFICACIÓN	VELOCIDAD TOTAL	VERIFICACIÓN	BORDE LIBRE	VERIFICACIÓN
		(N/m ²)		(m/s)		(m)	
1143.652	TR_100	32.76	CUMPLE	3.26	NO CUMPLE	0.61	NO CUMPLE
1031.117	TR_100	34.74	CUMPLE	3.38	NO CUMPLE	0.56	NO CUMPLE
920.7119	TR_100	32.34	CUMPLE	3.24	NO CUMPLE	1.02	CUMPLE
808.1373	TR_100	33.48	CUMPLE	3.33	NO CUMPLE	0.49	NO CUMPLE
697.7719	TR_100	32.42	CUMPLE	3.24	NO CUMPLE	1.05	CUMPLE
586.374	TR_100	33.44	CUMPLE	3.33	NO CUMPLE	0.74	CUMPLE
474.832	TR_100	32.44	CUMPLE	3.24	NO CUMPLE	0.05	NO CUMPLE
363.5482	TR_100	33.8	CUMPLE	3.34	NO CUMPLE	0.49	NO CUMPLE
251.892	TR_100	32.84	CUMPLE	3.26	NO CUMPLE	1.07	CUMPLE
140.7383	TR_100	33.5	CUMPLE	3.33	NO CUMPLE	0.49	NO CUMPLE
73.65467	TR_100	32.13	CUMPLE	3.23	NO CUMPLE	0.9	CUMPLE
0	TR_100	33.98	CUMPLE	3.35	NO CUMPLE	0.52	NO CUMPLE

Fuente: Propio

Tabla 36. Verificación de resultados modelación hidráulica TR 2.33 años – tercer canal

SECCIÓN TRANSVERSAL	PERFIL	FUERZA TRACTIVA TOTAL	VERIFICACIÓN	VELOCIDAD TOTAL	VERIFICACIÓN
		(N/m ²)		(m/s)	
1143.652	Tr_2.33	18.24	NO CUMPLE	2.12	NO CUMPLE
1031.117	Tr_2.33	18.05	NO CUMPLE	2.11	NO CUMPLE
920.7119	Tr_2.33	18.44	NO CUMPLE	2.13	NO CUMPLE
808.1373	Tr_2.33	18.68	NO CUMPLE	2.14	NO CUMPLE
697.7719	Tr_2.33	19.12	NO CUMPLE	2.16	NO CUMPLE
586.374	Tr_2.33	18.49	NO CUMPLE	2.13	NO CUMPLE
474.832	Tr_2.33	18.65	NO CUMPLE	2.14	NO CUMPLE
363.5482	Tr_2.33	19.11	NO CUMPLE	2.16	NO CUMPLE
251.892	Tr_2.33	18.51	NO CUMPLE	2.13	NO CUMPLE
140.7383	Tr_2.33	18.32	NO CUMPLE	2.12	NO CUMPLE
73.65467	Tr_2.33	18.85	NO CUMPLE	2.15	NO CUMPLE
0	Tr_2.33	18.9	NO CUMPLE	2.15	NO CUMPLE

Fuente: Propio

Capítulo VIII

Conclusiones

1. Se calculó y propuso la relación del caudal entre el periodo de retorno (TR) de 100 años y (TR) 2.33 años, por medio de cálculos de análisis de distribución de frecuencias teniendo en cuenta como dato base un caudal a un periodo de retorno de 100 años y datos limnigráficos de medición de caudales referencia de dos estaciones hidrológicas del río Bogotá y río Frío. Se estableció finalmente que el caudal del canal dominante a un periodo de retorno de 2.33 años, equivale a un 36% del caudal del canal valle a un periodo de retorno de 100 años. Lo anterior, con el fin de calcular los caudales a un periodo de retorno de 2.33 años, teniendo en cuenta el valor del caudal del canal valle a un periodo de retorno de 100 años.
2. De igual forma, dentro del proyecto de grado se detalla el procedimiento de operación de la hoja de diseño de cauces aluviales, con el fin de permitirle al usuario la utilización adecuada de esta herramienta, teniendo en cuenta los datos de entrada de acuerdo a las recomendaciones dadas con anterioridad y el orden de operación de la botones de cálculo del diámetro de la partícula y del cálculo de los parámetros hidráulicos y geométricos del canal dominante y valle. Así mismo, se relacionan y explican las secciones que hacen parte de la hoja de diseño tanto de los cálculos del canal dominante como del canal valle.
3. De acuerdo a los cálculos realizados por medio de la hoja de diseño, se pudo obtener las fichas técnicas y curvas de caracterización, que permiten a los diseñadores con los datos del caudal a un periodo de retorno (TR) de 100 años y la pendiente de diseño, determinar de forma ágil y práctica el ancho inferior del canal dominante y el ancho superior del canal valle, con el fin de establecer las dimensiones para el diseño geométrico y sinuoso de cauces aluviales. Es así que el objetivo principal de las curvas de caracterización es que se obtenga una sección compuesta que cumpla con los valores admisibles de velocidad y esfuerzo cortante.
4. Para cada uno de los diseños de canales, se realizó el diseño geométrico y sinuoso que permite a través de la longitud de la llanura, el índice de sinuosidad, la longitud del

río, la amplitud de onda en el valle, la amplitud de onda para el diseño y el radio de curvatura, calcular parámetros geométricos como el ángulo de deflexión de la onda, número de ondas, hipotenusa, longitud de onda, longitud hidráulica de la onda, entre otros, con el fin de trasladarlos como atributos de dibujo y diseño en el software Autocad Civil 3D.

5. Se realizó la modelación hidráulica en estado permanente, de los tres (3) canales artificiales diseñados mediante las fichas técnicas de diseño para evaluar el comportamiento hidráulico de los diseños realizados, tanto por flujo uniforme como por el método de la fuerza tractiva, con el fin de efectuar el análisis de borde libre, velocidades y esfuerzos cortantes.

Como conclusión de la modelación hidráulica realizada, se pudo determinar que las dimensiones geométricas de todos los canales calculados por medio de la hoja de diseño, coinciden aproximadamente con la modelación realizada por el método de flujo uniforme. De igual forma, se evidenció que por el método de la fuerza tractiva, el segundo y tercer canal diseñados cumplen con las dimensiones hidráulicas y geométricas para transitar los caudales de diseño tanto en el canal dominante como en el canal valle. Así mismo, se verificó que el diámetro de la partícula propuesto en la hoja de diseño coincidiera con la verificación del modelo hidráulico, evidenciándose que en algunos casos se recomienda aumentar el tamaño de la partícula en el lecho del fondo de los canales, con el fin de considerar estable el diseño. En el caso del primer canal diseñado con taludes 1:1 el módulo de diseño de canales estables del HEC-RAS no permite diseñar canales con taludes menores a 1:1.73, por lo cual no se pudo verificar exactamente este canal con las dimensiones establecidas inicialmente por el método de la fuerza tractiva utilizando dicho módulo.

6. En la realización de la geometría para los modelos hidráulicos de verificación de los resultados, se puede concluir específicamente, que el Radio de Curvatura (R_c) debe ser mayor a la mitad de la base superior del canal dominante. Si no se cumple dicha condición se puede presentar un traslapo entre las curvas del offset del alineamiento del eje sinuoso y el software utilizado no realizará ningún procesamiento sobre la superficie.

7. De acuerdo a las modelaciones hidráulicas realizadas y según los valores de referencia de velocidad máxima, esfuerzo cortante máximo permisible y borde libre para cada uno de los canales se puede concluir lo siguiente: En el primer canal para ambos periodos de retorno se cumple la velocidad, esfuerzo cortante y borde libre. Para el segundo y tercer canal únicamente se cumplen los resultados de esfuerzos cortantes y borde libre en el canal valle para un periodo de retorno de 100 años. Los valores de velocidades máximas permisibles y esfuerzos cortantes en el canal dominante no se cumplen, para lo cual se le recomienda al diseñador modificar la pendiente de diseño y la geometría del canal. Opcionalmente se puede indicar que es necesario recubrir los taludes con el tamaño del material obtenido en el diseño por fuerza tractiva.
8. Se evidenció en cada una de las modelaciones hidráulicas realizadas referentes a los tres canales diseñados, que los valores de fuerza tractiva y velocidad ascienden considerablemente cuando la geometría de las secciones transversales y su pendiente aumenta, pues se observó por ejemplo en el primer canal el cumplimiento de estos parámetros con respecto a los valores de referencia, pues al obtener los resultados del tercer canal se identificó que este canal al ser muy ancho y tener una pendiente muy pronunciada (0.018 m/m) los valores de dichos parámetros eran muy altos, por lo cual no cumplió con los valores de referencia propuestos.
9. Las modelaciones hidráulicas para los tres canales fueron realizadas por flujo subcrítico, con el fin de obtener velocidades bajas, pues los diseños fueron establecidos con pendientes de valle entre un rango de 0% y 2%. Se verificó que las profundidades de la lámina del agua de cada uno de los canales modelados con régimen subcrítico, son mayores que las que se presentan en el flujo supercrítico.
10. De acuerdo a los resultados obtenidos, se evidenció que los parámetros de velocidad, esfuerzos cortantes y potencia de la corriente, tienden a tener un mismo comportamiento, observándose en las gráficas que en el cauce sinuoso tienen más variación los resultados de estos parámetros. Por consiguiente, en el canal valle no tienden a tener tanta variación estos resultados, por lo que se puede concluir que en

los cauces sinuosos hay más variación de estos parámetros respecto a cauces con bajos factores de sinuosidad o rectos.

11. Según el análisis espacial de la mapificación de cada uno de los parámetros obtenidos, profundidad hidráulica, velocidad, fuerza tractiva y potencia de la corriente, se observó para el caso del cauce sinuoso que los mayores valores se concentran en la unión, zona central y externa de las curvas, y los menores valores se ubican en la zona cercana a los taludes del canal dominante. Igualmente se observó para el canal valle, que los mayores valores se presentan de la misma manera en la zona donde pasa el canal dominante y los menores valores se concentran en las zonas de llanura entre curvas hacia el costado de los taludes del canal valle. Así mismo, al definirse condiciones de frontera en los canales, se evidenció que en las zonas de remanso estos parámetros tienden a disminuir y en las zonas de elevación tienden a aumentar.
12. Finalmente, se concluye que el presente trabajo de grado con la obtención de las herramientas computacionales desarrolladas, permitirá a los diferentes profesionales que laboran en proyectos hidráulicos, efectuar de forma práctica la caracterización y diseño de cauces sinuosos.

Capítulo IX

Bibliografía

1. Ceballos, J.D. (2011, octubre). Modelación hidráulica y morfodinámica de cauces sinuosos. Aplicación a la quebrada La Marinilla (tesis de maestría). Maestría en Ingeniería – Recursos Hidráulicos. Universidad Nacional de Colombia.
2. Dirección de estudios de proyectos hidráulicos multisectoriales, (2010). *Manual: Criterios de diseños de obras hidráulicas para la formulación de proyectos hidráulicos multisectoriales y de afinamiento hídrico*. Recuperado de <http://www.ana.gob.pe/media/389716/manual-diseños-1.pdf> el 03 de mayo de 2018 (03/05/2018).
3. Parias H.D. (1995). Fórmulas practicas para el diseño de canals sin revestir en terrenos aluviales. *Artículo Instituto de Recursos Hídricos. Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías, Universidad Nacional de Santiago del Estero (Argentina)*, pp. 58-59.
4. Parias H.D., (2000). Formula racional de la relación ancho-profundidad para cauces aluviales estables. *Artículo Instituto de Recursos Hídricos. Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías, Universidad Nacional de Santiago del Estero (Argentina)*, pp. 1-3.
5. Parias H.D., Brea J.D., Cazeneuve R., (2005). Geometría hidráulica de ríos de llanura. Enfoques analíticos considerando la influencia de las márgenes. Ríos 2005: Principios y aplicaciones en hidráulica de ríos. *Artículo Instituto de Recursos Hídricos. Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías, Universidad Nacional de Santiago del Estero (Argentina)*, pp. 1-5.
6. Ramonell C., (1997). Geomorfología de cauces aluviales. *Artículo Guía Didáctica. Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas, Universidad Nacional Litoral (Argentina)*, pp. 2-5.

7. Rocha, A. (2008). *Hidráulica de tuberías y canales*. Recuperado de <http://apiperu.com.pe/Presentaciones/hidraulica/8-HIDRAULICA/B-LibroHidraulicadeTyC/Capitulo%206.PDF> el 04 de abril de 2018 (04/04/2018).
8. Rodríguez, P. (2008). *Hidráulica de canales*. Recuperado de https://es.slideshare.net/CarlosPajuelo/hidraulica-de-canales-pedro-rodriguez?from_action=save el 26 de noviembre de 2018 (26/11/2018).
9. Rojo J.D., (2013). Expresiones para el cálculo de los eventos para el periodo de retorno T y de los respectivos errores estándar de estimación requeridos para la determinación de los intervalos de confianza de los estimados de los valores esperados. pp. 1-39.
10. Sánchez R., (2008). Distribuciones estadísticas. *Artículo Departamento de Geología, Universidad de Salamanca (España)*, pp. 6-8.
11. Sánchez R., (2013). Cálculos estadísticos en hidrología. *Artículo Departamento de Geología, Universidad de Salamanca (España)*, pp. 4-8.
12. Universidad del Cauca (Colombia). (2003). *Geomorfología Fluvial, parte I*. Recuperado de <https://es.slideshare.net/farstico/geomorfologa-fluvial> el 06 de febrero de 2018 (06/02/2018).
13. Ven Te Chow. (1994). *Hidráulica de canales abiertos*. Bogotá D.C: Editorial McGRAW-HILL.
14. Velasco F., Aguilar W., (2016). Apuntes herramientas computaciones para el diseño y modelación de cauces. *Escuela Colombiana de Ingeniería*, pp. 6-9.
15. Water Resources Technical. (1987). *Design of Small Dams*. United States department of the interior: Editorial Water Resources Technical.

Anexo 1. Cálculo de caudal TR 2.33 años por la distribución de Gumbel ($S_x = Q$)

No.	CAUDAL TR 100 AÑOS (m ³ /s)	α	u	PROBABILIDAD (F _x)	PROBABILIDAD DE SUPERAR	PROBABILIDAD DE SER INFERIOR	CAUDAL TR 2.33 AÑOS (m ³ /s) - GUMBEL
1	1	0.862	0.527	0.561	0.429	0.571	0.672
2	2	1.723	1.055	0.561	0.429	0.571	1.343
3	3	2.585	1.582	0.561	0.429	0.571	2.015
4	4	3.446	2.110	0.561	0.429	0.571	2.687
5	5	4.308	2.637	0.561	0.429	0.571	3.358
6	6	5.169	3.165	0.561	0.429	0.571	4.030
7	7	6.031	3.692	0.561	0.429	0.571	4.702
8	8	6.892	4.220	0.561	0.429	0.571	5.373
9	9	7.754	4.747	0.561	0.429	0.571	6.045
10	10	8.615	5.274	0.561	0.429	0.571	6.717
11	20	17.231	10.549	0.561	0.429	0.571	13.433
12	30	25.846	15.823	0.561	0.429	0.571	20.150
13	40	34.462	21.098	0.561	0.429	0.571	26.866
14	50	43.077	26.372	0.561	0.429	0.571	33.583
15	60	51.693	31.646	0.561	0.429	0.571	40.299
16	70	60.308	36.921	0.561	0.429	0.571	47.016
17	80	68.924	42.195	0.561	0.429	0.571	53.733
18	90	77.539	47.470	0.561	0.429	0.571	60.449
19	100	86.155	52.744	0.561	0.429	0.571	67.166
20	200	172.310	105.488	0.561	0.429	0.571	134.331
21	300	258.465	158.232	0.561	0.429	0.571	201.497
22	400	344.620	210.976	0.561	0.429	0.571	268.663
23	500	430.775	263.720	0.561	0.429	0.571	335.828
24	600	516.929	316.464	0.561	0.429	0.571	402.994
25	700	603.084	369.208	0.561	0.429	0.571	470.160
26	800	689.239	421.952	0.561	0.429	0.571	537.325
27	900	775.394	474.696	0.561	0.429	0.571	604.491
28	1000	861.549	527.440	0.561	0.429	0.571	671.656

Anexo 2. Cálculo de caudal TR 2.33 años por la distribución Normal ($S_x = Q$)

KT=ZT	CAUDAL TR 2.33 AÑOS (m3/s) XT	CAUDAL TR 2.33 AÑOS (m3/s) - NORMAL	ERROR ESTÁNDAR (SE) (m3/s)	BANDAS DE CONFIANZA PARA EL CAUDAL ESTIMADO	
				LÍMITE INFERIOR	LÍMITE SUPERIOR
0.18	1.180	0.180	0.143	0.901	1.459
	2.360	0.360	0.285	1.801	2.919
	3.540	0.540	0.428	2.702	4.378
	4.720	0.720	0.570	3.602	5.838
	5.900	0.900	0.713	4.503	7.297
	7.080	1.080	0.855	5.403	8.757
	8.260	1.260	0.998	6.304	10.216
	9.440	1.440	1.140	7.205	11.675
	10.620	1.620	1.283	8.105	13.135
	11.800	1.800	1.426	9.006	14.594
	23.600	3.600	2.851	18.012	29.188
	35.400	5.400	4.277	27.017	43.783
	47.200	7.200	5.702	36.023	58.377
	59.000	9.000	7.128	45.029	72.971
	70.800	10.800	8.554	54.035	87.565
	82.600	12.600	9.979	63.040	102.160
	94.400	14.400	11.405	72.046	116.754
	106.200	16.200	12.831	81.052	131.348
	118.000	18.000	14.256	90.058	145.942
	236.000	36.000	28.512	180.116	291.884
	354.000	54.000	42.769	270.173	437.827
	472.000	72.000	57.025	360.231	583.769
	590.000	90.000	71.281	450.289	729.711
	708.000	108.000	85.537	540.347	875.653
	826.000	126.000	99.794	630.405	1021.595
	944.000	144.000	114.050	720.462	1167.538
	1062.000	162.000	128.306	810.520	1313.480
1180.000	180.000	142.562	900.578	1459.422	

Anexo 3. Cálculo de caudal TR 2.33 años por la distribución Log Normal ($S_x = Q$)

KT	CAUDAL TR 2.33 AÑOS (m ³ /s) X - LOG NORMAL	ERROR ESTÁNDAR (SE) (m ³ /s)	BANDAS DE CONFIANZA PARA EL CAUDAL ESTIMADO	
			LÍMITE INFERIOR	LÍMITE SUPERIOR
-0.179	0.82	0.11	0.61	1.037
-0.219	1.56	0.86	-0.13	3.251
-0.195	2.42	4.46	-6.33	11.163
-0.168	3.33	14.45	-24.99	31.645
-0.146	4.27	36.08	-66.45	74.992
-0.128	5.23	76.33	-144.37	154.829
-0.114	6.20	143.82	-275.69	288.099
-0.103	7.18	248.92	-480.70	495.056
-0.093	8.16	403.63	-782.95	799.272
-0.085	9.15	621.68	-1209.34	1227.633
-0.046	19.08	10514.18	-20588.72	20626.874
-0.032	29.05	54404.98	-106604.70	106662.808
-0.024	39.04	173968.11	-340938.45	341016.535
-0.019	49.03	427833.64	-838504.91	838602.977
-0.016	59.03	891591.63	-1747460.56	1747578.620
-0.014	69.02	1657794.33	-3249207.87	3249345.917
-0.012	79.02	2835957.72	-5558398.10	5558556.144
-0.011	89.02	4552562.44	-8922933.37	8923111.409
-0.010	99.02	6951054.65	-13623968.10	13624166.135
-0.005	199.01	112129146.37	-219772927.88	219773325.897
-0.003	299.01	569268946.45	-1115766836.03	1115767434.039
-0.002	399.00	1801788545.87	-3531505150.90	3531505948.910
-0.002	499.00	4402797979.12	-8629483540.06	8629484538.070
-0.002	599.00	9135102892.96	-17904801071.20	17904802269.202
-0.001	699.00	16931206645.51	-33185164326.20	33185165724.203
-0.001	799.00	28893311673.24	-56630890080.55	56630891678.555
-0.001	899.00	46293320454.05	-90734907190.94	90734908988.940
-0.001	999.00	70572836223.02	-138322757998.11	138322759996.118

Anexo 4. Cálculo de caudal TR 2.33 años por la distribución Gumbel (GEV Tipo I) ($S_x = Q$)

KT	CAUDAL TR 2.33 AÑOS (m3/s) X	ERROR ESTÁNDAR (SE) (m3/s)	BANDAS DE CONFIANZA PARA EL CAUDAL ESTIMADO	
			LÍMITE INFERIOR	LÍMITE SUPERIOR
0.00112531	1.001	1.001	-0.960	2.962
	2.002	2.001	-1.920	5.925
	3.003	3.002	-2.880	8.887
	4.005	4.003	-3.841	11.850
	5.006	5.003	-4.801	14.812
	6.007	6.004	-5.761	17.774
	7.008	7.004	-6.721	20.737
	8.009	8.005	-7.681	23.699
	9.010	9.006	-8.641	26.661
	10.011	10.006	-9.601	29.624
	20.023	20.013	-19.203	59.248
	30.034	30.019	-28.804	88.871
	40.045	40.026	-38.405	118.495
	50.056	50.032	-48.007	148.119
	60.068	60.038	-57.608	177.743
	70.079	70.045	-67.209	207.367
	80.090	80.051	-76.811	236.991
	90.101	90.058	-86.412	266.614
	100.113	100.064	-96.013	296.238
	200.225	200.128	-192.026	592.476
	300.338	300.192	-288.040	888.715
	400.450	400.257	-384.053	1184.953
	500.563	500.321	-480.066	1481.191
	600.675	600.385	-576.079	1777.429
	700.788	700.449	-672.092	2073.668
800.900	800.513	-768.105	2369.906	
901.013	900.577	-864.119	2666.144	
1001.125	1000.641	-960.132	2962.382	

Anexo 5. Cálculo de caudal TR 2.33 años por la distribución de Gumbel (Sx = 2Q)

9	CAUDAL TR 100 AÑOS (m3/s)	COEFICIENTE DE VARIACIÓN	COEFICIENTE DE ASIMETRÍA	α	u	PROBABILIDAD (Fx)	PROBABILIDAD DE SUPERAR	PROBABILIDAD DE SER INFERIOR	CAUDAL TR 2.33 AÑOS (m3/s) - GUMBEL
1	1	2	0.002657313	1.723	0.055	0.561	0.429	0.571	0.343
2	2	2	0.002657313	3.446	0.110	0.561	0.429	0.571	0.687
3	3	2	0.002657313	5.169	0.165	0.561	0.429	0.571	1.030
4	4	2	0.002657313	6.892	0.220	0.561	0.429	0.571	1.373
5	5	2	0.002657313	8.615	0.274	0.561	0.429	0.571	1.717
6	6	2	0.002657313	10.339	0.329	0.561	0.429	0.571	2.060
7	7	2	0.002657313	12.062	0.384	0.561	0.429	0.571	2.403
8	8	2	0.002657313	13.785	0.439	0.561	0.429	0.571	2.747
9	9	2	0.002657313	15.508	0.494	0.561	0.429	0.571	3.090
10	10	2	0.002657313	17.231	0.549	0.561	0.429	0.571	3.433
11	20	2	0.002657313	34.462	1.098	0.561	0.429	0.571	6.866
12	30	2	0.002657313	51.693	1.646	0.561	0.429	0.571	10.299
13	40	2	0.002657313	68.924	2.195	0.561	0.429	0.571	13.733
14	50	2	0.002657313	86.155	2.744	0.561	0.429	0.571	17.166
15	60	2	0.002657313	103.386	3.293	0.561	0.429	0.571	20.599
16	70	2	0.002657313	120.617	3.842	0.561	0.429	0.571	24.032
17	80	2	0.002657313	137.848	4.390	0.561	0.429	0.571	27.465
18	90	2	0.002657313	155.079	4.939	0.561	0.429	0.571	30.898
19	100	2	0.002657313	172.310	5.488	0.561	0.429	0.571	34.331
20	200	2	0.002657313	344.620	10.976	0.561	0.429	0.571	68.663
21	300	2	0.002657313	516.929	16.464	0.561	0.429	0.571	102.994
22	400	2	0.002657313	689.239	21.952	0.561	0.429	0.571	137.325
23	500	2	0.002657313	861.549	27.440	0.561	0.429	0.571	171.656
24	600	2	0.002657313	1033.859	32.928	0.561	0.429	0.571	205.988
25	700	2	0.002657313	1206.169	38.416	0.561	0.429	0.571	240.319
26	800	2	0.002657313	1378.479	43.905	0.561	0.429	0.571	274.650
27	900	2	0.002657313	1550.788	49.393	0.561	0.429	0.571	308.982
28	1000	2	0.002657313	1723.098	54.881	0.561	0.429	0.571	343.313

* Los datos de media aritmética se tomó igual que el caudal definido en TR 100 años y la desviación estándar como dos veces el caudal.

μy	0.5485
σy	1.1607

Anexo 6. Cálculo de caudal TR 2.33 años por la distribución Normal ($S_x = 2Q$)

KT=ZT	CAUDAL TR 2.33 AÑOS (m3/s) XT	CAUDAL TR 2.33 AÑOS (m3/s) - NORMAL	ERROR ESTÁNDAR (SE) (m3/s)	BANDAS DE CONFIANZA PARA EL CAUDAL ESTIMADO	
				LÍMITE INFERIOR	LÍMITE SUPERIOR
0.18	1.360	0.360	0.285	0.801	1.919
	2.720	0.720	0.570	1.602	3.838
	4.080	1.080	0.855	2.403	5.757
	5.440	1.440	1.140	3.205	7.675
	6.800	1.800	1.426	4.006	9.594
	8.160	2.160	1.711	4.807	11.513
	9.520	2.520	1.996	5.608	13.432
	10.880	2.880	2.281	6.409	15.351
	12.240	3.240	2.566	7.210	17.270
	13.600	3.600	2.851	8.012	19.188
	27.200	7.200	5.702	16.023	38.377
	40.800	10.800	8.554	24.035	57.565
	54.400	14.400	11.405	32.046	76.754
	68.000	18.000	14.256	40.058	95.942
	81.600	21.600	17.107	48.069	115.131
	95.200	25.200	19.959	56.081	134.319
	108.800	28.800	22.810	64.092	153.508
	122.400	32.400	25.661	72.104	172.696
	136.000	36.000	28.512	80.116	191.884
	272.000	72.000	57.025	160.231	383.769
408.000	108.000	85.537	240.347	575.653	
544.000	144.000	114.050	320.462	767.538	
680.000	180.000	142.562	400.578	959.422	
816.000	216.000	171.075	480.694	1151.306	
952.000	252.000	199.587	560.809	1343.191	
1088.000	288.000	228.100	640.925	1535.075	
1224.000	324.000	256.612	721.040	1726.960	
1360.000	360.000	285.125	801.156	1918.844	

Anexo 7. Cálculo de caudal TR 2.33 años por la distribución Log Normal ($S_x = 2Q$)

KT	CAUDAL TR 2.33 AÑOS (m3/s) - LOG NORMAL	ERROR ESTÁNDAR (SE) (m3/s)	BANDAS DE CONFIANZA PARA EL CAUDAL ESTIMADO	
			LÍMITE INFERIOR	LÍMITE SUPERIOR
-0.219	0.56	0.86	-1.13	2.251
-0.219	1.12	1.72	-2.25	4.501
-0.219	1.69	2.58	-3.38	6.752
-0.219	2.25	3.45	-4.51	9.003
-0.219	2.81	4.31	-5.63	11.253
-0.219	3.37	5.17	-6.76	13.504
-0.219	3.93	6.03	-7.89	15.755
-0.219	4.50	6.89	-9.01	18.005
-0.219	5.06	7.75	-10.14	20.256
-0.219	5.62	8.62	-11.27	22.507
-0.219	11.24	17.23	-22.54	45.014
-0.219	16.86	25.85	-33.80	67.521
-0.219	22.48	34.46	-45.07	90.027
-0.219	28.10	43.08	-56.34	112.534
-0.219	33.72	51.70	-67.61	135.041
-0.219	39.34	60.31	-78.88	157.548
-0.219	44.96	68.93	-90.14	180.055
-0.219	50.57	77.54	-101.41	202.562
-0.219	56.19	86.16	-112.68	225.069
-0.219	112.39	172.32	-225.36	450.137
-0.219	168.58	258.48	-338.04	675.206
-0.219	224.78	344.64	-450.72	900.275
-0.219	280.97	430.80	-563.41	1125.343
-0.219	337.16	516.96	-676.09	1350.412
-0.219	393.36	603.12	-788.77	1575.480
-0.219	449.55	689.29	-901.45	1800.549
-0.219	505.74	775.45	-1014.13	2025.618
-0.219	561.94	861.61	-1126.81	2250.686

Anexo 8. Cálculo de caudal TR 2.33 años por la distribución Gumbel (GEV Tipo I) ($S_x = 2Q$)

KT	CAUDAL TR 2.33 AÑOS (m3/s) X	CAUDAL TR 2.33 AÑOS (m3/s) - GUMBEL (GEV TIPO I)	ERROR ESTÁNDAR (SE) (m3/s)	BANDAS DE CONFIANZA PARA EL CAUDAL ESTIMADO	
				LÍMITE INFERIOR	LÍMITE SUPERIOR
0.00112531	1.002	0.002	0.283	0.448	1.557
	2.005	0.005	0.566	0.895	3.114
	3.007	0.007	0.849	1.343	4.671
	4.009	0.009	1.132	1.790	6.228
	5.011	0.011	1.415	2.238	7.785
	6.014	0.014	1.698	2.685	9.342
	7.016	0.016	1.981	3.133	10.899
	8.018	0.018	2.264	3.580	12.456
	9.020	0.020	2.547	4.028	14.013
	10.023	0.023	2.830	4.475	15.570
	20.045	0.045	5.660	8.950	31.140
	30.068	0.068	8.491	13.426	46.709
	40.090	0.090	11.321	17.901	62.279
	50.113	0.113	14.151	22.376	77.849
	60.135	0.135	16.981	26.851	93.419
	70.158	0.158	19.812	31.327	108.988
	80.180	0.180	22.642	35.802	124.558
	90.203	0.203	25.472	40.277	140.128
	100.225	0.225	28.302	44.752	155.698
	200.450	0.450	56.605	89.505	311.396
300.675	0.675	84.907	134.257	467.093	
400.900	0.900	113.210	179.009	622.791	
501.125	1.125	141.512	223.762	778.489	
601.350	1.350	169.814	268.514	934.187	
701.575	1.575	198.117	313.266	1089.885	
801.800	1.800	226.419	358.019	1245.582	
902.026	2.026	254.722	402.771	1401.280	
1002.251	2.251	283.024	447.523	1556.978	

Anexo 9. Cálculo de caudal TR 2.33 años por la distribución Pearson tipo III ($S_x = 2Q$)

KT	CAUDAL TR 2.33 AÑOS (m3/s) X	CAUDAL TR 2.33 AÑOS (m3/s) - PERSON TIPO III	W	ERROR ESTÁNDAR (SE) (m3/s)	BANDAS DE CONFIANZA PARA EL CAUDAL ESTIMADO	
					LÍMITE INFERIOR	LÍMITE SUPERIOR
0.17957139	1.359	0.359	-0.161	0.306	0.759	1.959
0.17957139	2.718	0.718	-0.161	0.613	1.518	3.919
0.17957139	4.077	1.077	-0.161	0.919	2.277	5.878
0.17957139	5.437	1.437	-0.161	1.225	3.035	7.838
0.17957139	6.796	1.796	-0.161	1.531	3.794	9.797
0.17957139	8.155	2.155	-0.161	1.838	4.553	11.757
0.17957139	9.514	2.514	-0.161	2.144	5.312	13.716
0.17957139	10.873	2.873	-0.161	2.450	6.071	15.675
0.17957139	12.232	3.232	-0.161	2.756	6.830	17.635
0.17957139	13.591	3.591	-0.161	3.063	7.589	19.594
0.17957139	27.183	7.183	-0.161	6.125	15.177	39.189
0.17957139	40.774	10.774	-0.161	9.188	22.766	58.783
0.17957139	54.366	14.366	-0.161	12.251	30.354	78.377
0.17957139	67.957	17.957	-0.161	15.313	37.943	97.972
0.17957139	81.549	21.549	-0.161	18.376	45.531	117.566
0.17957139	95.140	25.140	-0.161	21.439	53.120	137.160
0.17957139	108.731	28.731	-0.161	24.502	60.708	156.755
0.17957139	122.323	32.323	-0.161	27.564	68.297	176.349
0.17957139	135.914	35.914	-0.161	30.627	75.885	195.943
0.17957139	271.829	71.829	-0.161	61.254	151.771	391.886
0.17957139	407.743	107.743	-0.161	91.881	227.656	587.829
0.17957139	543.657	143.657	-0.161	122.508	303.542	783.773
0.17957139	679.571	179.571	-0.161	153.135	379.427	979.716
0.17957139	815.486	215.486	-0.161	183.762	455.312	1175.659
0.17957139	951.400	251.400	-0.161	214.389	531.198	1371.602
0.17957139	1087.314	287.314	-0.161	245.016	607.083	1567.545
0.17957139	1223.229	323.229	-0.161	275.643	682.969	1763.488
0.17957139	1359.143	359.143	-0.161	306.270	758.854	1959.432

Anexo 10. Análisis de caudales máximos – Estación Puente Adobe (Río Bogotá)

ANALISIS DE CAUDALES MAXIMOS - ESTACION PUENTE ADOBE																				
i (Orden)	DATOS (Xi) MAYOR A MENOR	Yi =Log Xi	weibull P (X>Xo)	Yi-Yo)^2	Yi PUNTOS	VR AJUST GUMBEL	W	Z	VR AJUST NORMAL	(Xi-XP)^3	KT(P)	VR AJUST PEARSON	(Yi-Yp)^3	KT(LP)	YT LOG PEARSON	VR AJUST LOG-PEARSON	KT L-NORMAL	VR AJUST L-NORMAL	VARIABLE reducida EV3	VR AJUST EV3
1	10.00	2.30	0.06	5.23	2.80	10.20	2.38	1.57	8.12	321.30	1.77	8.77	7.97	1.10	2.36	10.56	1.60	8.23	2.83	8.89
2	9.42	2.24	0.12	2.44	2.08	7.97	2.07	1.19	6.92	246.16	1.20	6.95	7.27	0.97	2.12	8.34	0.90	5.99	2.14	7.06
3	6.20	1.83	0.18	1.26	1.64	6.61	1.86	0.93	6.10	28.46	0.84	5.82	3.51	0.86	1.91	6.76	0.53	4.83	1.73	5.90
4	5.81	1.76	0.24	0.64	1.32	5.62	1.70	0.72	5.44	18.89	0.58	4.99	3.08	0.75	1.71	5.53	0.29	4.06	1.45	5.04
5	4.45	1.49	0.29	0.29	1.05	4.81	1.56	0.54	4.87	2.18	0.37	4.32	1.67	0.65	1.51	4.53	0.11	3.49	1.22	4.33
6	3.28	1.19	0.35	0.10	0.83	4.12	1.44	0.38	4.35	0.00	0.19	3.74	0.69	0.54	1.31	3.69	-0.03	3.04	1.04	3.73
7	2.63	0.97	0.41	0.01	0.63	3.51	1.33	0.22	3.86	-0.14	0.03	3.23	0.29	0.42	1.10	2.99	-0.15	2.67	0.89	3.19
8	2.14	0.76	0.47	0.00	0.45	2.96	1.23	0.07	3.38	-1.03	-0.12	2.77	0.09	0.30	0.87	2.39	-0.25	2.36	0.75	2.70
9	1.31	0.27	0.53	0.05	0.28	2.43	1.23	-0.07	2.92	-6.21	-0.26	2.33	0.00	0.18	0.63	1.88	-0.34	2.09	0.64	2.25
10	1.24	0.22	0.59	0.16	0.12	1.93	1.33	-0.22	2.44	-6.93	-0.39	1.92	0.00	0.04	0.37	1.45	-0.41	1.84	0.53	1.83
11	1.17	0.16	0.65	0.31	-0.04	1.44	1.44	-0.38	1.95	-7.77	-0.51	1.52	0.00	-0.12	0.08	1.08	-0.48	1.62	0.44	1.42
12	1.04	0.04	0.71	0.51	-0.20	0.94	1.56	-0.54	1.43	-9.43	-0.64	1.13	-0.02	-0.30	-0.26	0.77	-0.55	1.41	0.35	1.03
13	1.00	-0.01	0.76	0.78	-0.37	0.42	1.70	-0.72	0.86	-10.01	-0.76	0.73	-0.03	-0.52	-0.67	0.51	-0.61	1.21	0.27	0.64
14	0.68	-0.39	0.82	1.14	-0.55	-0.14	1.86	-0.93	0.20	-15.16	-0.89	0.31	-0.34	-0.79	-1.18	0.31	-0.67	1.02	0.19	0.25
15	0.02	-3.86	0.88	1.63	-0.76	-0.78	2.07	-1.19	-0.62	-30.63	-1.04	-0.15	-72.43	-1.17	-1.88	0.15	-0.73	0.82	0.13	-0.16
16	0.02	-4.07	0.94	2.42	-1.04	-1.65	2.38	-1.57	-1.82	-30.75	-1.22	-0.73	-84.01	-1.80	-3.05	0.05	-0.80	0.60	0.06	-0.60
SUMA	50.4	4.88		16.99						498.94			-132.2651							

Anexo 11. Prueba de Chi Cuadrado – Estación Puente Adobe (Río Bogotá)

PRUEBA DE CHI CUADRADO																		
MAXIMO	GUMBEL			NORMAL			PEARSON			LOG-PEARSON			LOG-NORMAL			EV3		
(Y)	Yc	(Y-Yc) ²	(Y-Yc) ² /Yc	Yc	(Y-Yc) ²	(Y-Yc) ² /Yc	Yc	(Y-Yc) ²	(Y-Yc) ² /Yc	Yc	(Y-Yc) ²	(Y-Yc) ² /Yc	Yc	(Y-Yc) ²	(Y-Yc) ² /Yc	Yc	(Y-Yc) ²	(Y-Yc) ² /Yc
10	10.20	0.04	0.00	8.12	3.53	0.43	8.77	1.50	0.17	10.56	0.31	0.03	8.23	3.14	0.38	8.89	1.23	0.14
9	7.97	2.10	0.26	6.92	6.23	0.90	6.95	6.10	0.88	8.34	1.17	0.14	5.99	11.72	1.95	7.06	5.58	0.79
6	6.61	0.17	0.03	6.10	0.01	0.00	5.82	0.14	0.02	6.76	0.31	0.05	4.83	1.89	0.39	5.90	0.09	0.02
6	5.62	0.04	0.01	5.44	0.14	0.03	4.99	0.68	0.14	5.53	0.08	0.01	4.06	3.08	0.76	5.04	0.60	0.12
4	4.81	0.13	0.03	4.87	0.18	0.04	4.32	0.02	0.00	4.53	0.01	0.00	3.49	0.92	0.26	4.33	0.01	0.00
3	4.12	0.71	0.17	4.35	1.13	0.26	3.74	0.21	0.06	3.69	0.17	0.05	3.04	0.06	0.02	3.73	0.20	0.05
3	3.51	0.79	0.22	3.86	1.51	0.39	3.23	0.36	0.11	2.99	0.13	0.04	2.67	0.00	0.00	3.19	0.31	0.10
2	2.96	0.67	0.23	3.38	1.55	0.46	2.77	0.39	0.14	2.39	0.06	0.03	2.36	0.05	0.02	2.70	0.32	0.12
1	2.43	1.26	0.52	2.92	2.57	0.88	2.33	1.04	0.45	1.88	0.33	0.17	2.09	0.60	0.29	2.25	0.88	0.39
1	1.93	0.47	0.24	2.44	1.44	0.59	1.92	0.46	0.24	1.45	0.04	0.03	1.84	0.36	0.19	1.83	0.34	0.19
1	1.44	0.07	0.05	1.95	0.61	0.31	1.52	0.13	0.08	1.08	0.01	0.01	1.62	0.20	0.12	1.42	0.06	0.04
1	0.94	0.01	0.01	1.43	0.16	0.11	1.13	0.01	0.01	0.77	0.07	0.09	1.41	0.14	0.10	1.03	0.00	0.00
1	0.42	0.33	0.78	0.86	0.02	0.02	0.73	0.07	0.10	0.51	0.23	0.45	1.21	0.05	0.04	0.64	0.13	0.20
1	-0.14	0.66	-4.83	0.20	0.23	1.14	0.31	0.13	0.43	0.31	0.13	0.43	1.02	0.12	0.12	0.25	0.18	0.72
0	-0.78	0.65	-0.83	-0.62	0.41	-0.66	-0.15	0.03	-0.20	0.15	0.02	0.11	0.82	0.64	0.78	-0.16	0.03	-0.20
0	-1.65	2.77	-1.68	-1.82	3.38	-1.86	-0.73	0.55	-0.76	0.05	0.00	0.02	0.60	0.34	0.56	-0.60	0.38	-0.64
SUMA			-4.79			3.04			1.87			1.67			5.99			2.04

Anexo 12. Frecuencia de caudales máximos – Estación Puente Adobe (Río Bogotá)

Promedio	3.15	0.31
Desv. Estandar	3.18	1.87
Coef Asimetría	1.186	-1.550
Coef Curtosis	3.40	
No Datos	16	
Valor Máximo	9.999	
Valor Mínimo	0.017	
CONSTANTES		
VARIABLES		
DISTRIB. GUMBEL		
Sn	1.0306	
Yn (media)	0.5154	
a (Sn/Sd)	0.3244	
Xf (u)	1.6	
DISTRIBUCION	PEARSON	LOG-PEARSON
Coef Asimetría	1.186	-1.550
LOG NORMAL		
Coef. Variacion Cv (Sd/x)	1.01	6.11
GENERAL VALORES EXTREMOS EVIII		
Coef Asimetría*	1.186	
1/A^	0.71	
A^ (ver nota)	1.41	
B(alpha)	1.53	
alpha(A)	0.14	
B^	3.58	
C^	-1.27	

FRECUENCIA DE CAUDALES MAXIMOS - ESTACION PUENTE ADOBE																
PERIODO	FRECUENCIA	VARIABLE	VARIABLE			KT	KT	YT	KT	VALOR ESPERADO PARA CADA DISTRIBUCION PARA CADA Tr						
RETORNO	PE	REDUCIDA	REDUCIDA	W	Z	PEARSON	LOG	LOG-	LOG	NORMAL	GUMBEL	PEARSON	LOG- PEAR	LOG-NOR	EV3	
(años)		GVEIII	Y (Gumbel)				PEARSON	PEARSON	NORMAL	Q (m3/s)	Q (m3/s)	Q (m3/s)	Q (m3/s)	Q (m3/s)	Q (m3/s)	
1.01	0.99	0.01	-1.53	3.04	-2.33	-1.48	-3.38	-6.00	-0.89	-4.3	-3.2	-1.5	0.0	0.3	-1.1	
1.11	0.90	0.10	-0.84	2.15	-1.29	-1.09	-1.33	-2.17	-0.75	-0.9	-1.0	-0.3	0.1	0.8	-0.3	
1.25	0.80	0.22	-0.48	1.79	-0.84	-0.84	-0.68	-0.96	-0.65	0.5	0.1	0.5	0.4	1.1	0.4	
1.33	0.75	0.29	-0.33	1.67	-0.68	-0.73	-0.47	-0.57	-0.60	1.0	0.5	0.8	0.6	1.3	0.7	
2	0.50	0.69	0.37	1.18	0.00	-0.19	0.24	0.76	-0.29	3.1	2.7	2.5	2.1	2.2	2.5	
2.33	0.43	0.85	0.58	1.30	0.18	-0.02	0.39	1.03	-0.18	3.7	3.3	3.1	2.8	2.6	3.0	
3.33	0.30	1.20	1.03	1.55	0.52	0.35	0.63	1.49	0.09	4.8	4.7	4.3	4.4	3.4	4.3	
5	0.20	1.61	1.50	1.79	0.84	0.73	0.82	1.83	0.42	5.8	6.2	5.5	6.2	4.5	5.5	
10	0.10	2.30	2.25	2.15	1.28	1.33	1.01	2.19	1.05	7.2	8.5	7.4	8.9	6.5	7.5	
20	0.05	3.00	2.97	2.45	1.65	1.90	1.12	2.40	1.78	8.4	10.7	9.2	11.0	8.8	9.3	
30	0.03	3.40	3.38	2.61	1.83	2.22	1.17	2.48	2.25	9.0	12.0	10.2	11.9	10.3	10.3	
40	0.03	3.69	3.68	2.72	1.96	2.45	1.19	2.53	2.62	9.4	12.9	10.9	12.5	11.5	11.0	
45	0.02	3.81	3.80	2.76	2.01	2.54	1.20	2.54	2.77	9.5	13.3	11.2	12.7	11.9	11.3	
50	0.02	3.91	3.90	2.80	2.05	2.62	1.21	2.56	2.91	9.7	13.6	11.5	12.9	12.4	11.5	
55	0.02	4.01	4.00	2.83	2.09	2.69	1.21	2.57	3.04	9.8	13.9	11.7	13.0	12.8	11.7	
60	0.02	4.09	4.09	2.86	2.13	2.76	1.22	2.58	3.16	9.9	14.2	11.9	13.2	13.2	11.9	
65	0.02	4.17	4.17	2.89	2.16	2.82	1.22	2.59	3.27	10.0	14.4	12.1	13.3	13.5	12.1	
70	0.01	4.25	4.24	2.91	2.19	2.88	1.23	2.59	3.38	10.1	14.6	12.3	13.4	13.9	12.3	
75	0.01	4.32	4.31	2.94	2.22	2.93	1.23	2.60	3.48	10.2	14.8	12.5	13.5	14.2	12.4	
80	0.01	4.38	4.38	2.96	2.24	2.98	1.23	2.61	3.57	10.3	15.0	12.6	13.5	14.5	12.6	
85	0.01	4.44	4.44	2.98	2.27	3.03	1.24	2.61	3.66	10.3	15.2	12.8	13.6	14.8	12.7	
90	0.01	4.50	4.49	3.00	2.29	3.07	1.24	2.62	3.75	10.4	15.4	12.9	13.7	15.1	12.8	
95	0.01	4.55	4.55	3.02	2.31	3.11	1.24	2.62	3.83	10.5	15.6	13.0	13.7	15.3	13.0	
100	0.01	4.61	4.60	3.03	2.33	3.15	1.24	2.62	3.91	10.5	15.7	13.2	13.8	15.6	13.1	
										3.04	-4.79	1.87	1.67	5.99	2.04	

Anexo 13. Análisis de caudales máximos – Estación Puente Virginia (Río Frío)

ANALISIS DE CAUDALES MAXIMOS - ESTACION PUENTE VIRGINIA																				
i (Orden)	DATOS (Xi)	Yi =Log Xi	weibull P (X>Xo)	Yi-Yo)^2	Yi PUNTOS	VR AJUST GUMBEL	W	Z	VR AJUST NORMAL	(Xi-XP)^3	KT(P)	VR AJUST PEARSON	(Yi-Yp)^3	KT(LP)	YT LOG PEARSON	VR AJUST LOG-PEARSON	KT L-NORMAL	VR AJUST L-NORMAL	VARIABLE reducida EV3	VR AJUST EV3
1	48.60	3.88	0.04	7.73	3.31	46.66	2.58	1.80	38.57	27464.34	2.13	42.25	1.55	1.65	3.81	44.98	2.22	43.21	3.33	42.52
2	44.48	3.80	0.07	4.28	2.60	39.43	2.30	1.47	34.80	17677.60	1.60	36.34	1.22	1.38	3.63	37.76	1.55	35.78	2.64	36.75
3	27.74	3.32	0.11	2.70	2.18	35.12	2.11	1.24	32.30	807.21	1.28	32.72	0.21	1.20	3.51	33.47	1.18	31.57	2.23	33.13
4	27.42	3.31	0.14	1.79	1.87	32.00	1.97	1.07	30.36	726.82	1.04	30.05	0.20	1.05	3.41	30.39	0.91	28.64	1.95	30.42
5	26.76	3.29	0.18	1.19	1.63	29.52	1.86	0.92	28.71	577.39	0.85	27.91	0.18	0.92	3.33	27.96	0.71	26.38	1.72	28.22
6	26.00	3.26	0.21	0.79	1.42	27.45	1.76	0.79	27.27	433.63	0.69	26.11	0.15	0.81	3.26	25.94	0.55	24.54	1.54	26.35
7	24.70	3.21	0.25	0.51	1.25	25.66	1.67	0.67	25.96	246.61	0.55	24.53	0.11	0.70	3.19	24.21	0.41	22.98	1.39	24.71
8	24.50	3.20	0.29	0.31	1.09	24.07	1.58	0.57	24.75	223.76	0.42	23.12	0.11	0.61	3.12	22.69	0.29	21.62	1.25	23.23
9	24.30	3.19	0.32	0.17	0.95	22.63	1.51	0.46	23.60	202.37	0.31	21.84	0.10	0.51	3.06	21.32	0.18	20.42	1.13	21.89
10	21.64	3.07	0.36	0.08	0.82	21.31	1.44	0.37	22.51	33.23	0.20	20.66	0.04	0.42	3.00	20.08	0.08	19.34	1.03	20.64
11	21.64	3.07	0.39	0.03	0.70	20.07	1.37	0.27	21.46	33.23	0.10	19.55	0.04	0.33	2.94	18.94	-0.01	18.34	0.93	19.47
12	20.42	3.02	0.43	0.00	0.58	18.91	1.30	0.18	20.44	7.89	0.01	18.51	0.02	0.24	2.88	17.87	-0.09	17.43	0.85	18.37
13	19.16	2.95	0.46	0.00	0.47	17.80	1.24	0.09	19.43	0.39	-0.08	17.51	0.01	0.15	2.83	16.87	-0.17	16.57	0.77	17.32
14	18.74	2.93	0.50	0.03	0.37	16.74	1.18	0.00	18.43	0.03	-0.17	16.56	0.01	0.06	2.77	15.93	-0.24	15.76	0.69	16.32
15	15.81	2.76	0.54	0.07	0.26	15.71	1.24	-0.09	17.43	-17.92	-0.25	15.63	0.00	-0.02	2.71	15.02	-0.31	14.99	0.62	15.35
16	15.61	2.75	0.57	0.14	0.17	14.70	1.30	-0.18	16.42	-22.35	-0.33	14.73	0.00	-0.12	2.65	14.15	-0.37	14.25	0.56	14.41
17	12.03	2.49	0.61	0.22	0.07	13.71	1.37	-0.27	15.40	-262.02	-0.41	13.84	-0.01	-0.21	2.59	13.31	-0.44	13.54	0.50	13.49
18	10.26	2.33	0.64	0.32	-0.03	12.72	1.44	-0.37	14.34	-545.14	-0.49	12.96	-0.06	-0.31	2.52	12.49	-0.50	12.84	0.44	12.58
19	10.17	2.32	0.68	0.44	-0.13	11.73	1.51	-0.46	13.25	-562.74	-0.57	12.08	-0.07	-0.41	2.46	11.68	-0.56	12.16	0.39	11.69
20	9.64	2.27	0.71	0.58	-0.23	10.73	1.58	-0.57	12.11	-678.92	-0.65	11.19	-0.10	-0.52	2.39	10.88	-0.62	11.49	0.34	10.80
21	8.61	2.15	0.75	0.74	-0.33	9.70	1.67	-0.67	10.90	-947.26	-0.73	10.28	-0.19	-0.63	2.31	10.08	-0.68	10.81	0.29	9.91
22	7.82	2.06	0.79	0.93	-0.43	8.63	1.76	-0.79	9.59	-1194.05	-0.81	9.35	-0.30	-0.76	2.23	9.27	-0.74	10.12	0.24	9.02
23	7.82	2.06	0.82	1.16	-0.54	7.50	1.86	-0.92	8.14	-1194.05	-0.90	8.38	-0.30	-0.90	2.13	8.44	-0.81	9.42	0.20	8.10
24	7.29	1.99	0.86	1.44	-0.67	6.26	1.97	-1.07	6.50	-1381.73	-0.99	7.33	-0.40	-1.07	2.03	7.58	-0.87	8.67	0.15	7.15
25	6.73	1.91	0.89	1.79	-0.80	4.86	2.11	-1.24	4.55	-1601.20	-1.10	6.17	-0.55	-1.27	1.89	6.65	-0.95	7.87	0.11	6.15
26	6.58	1.88	0.93	2.26	-0.97	3.17	2.30	-1.47	2.06	-1664.43	-1.22	4.82	-0.60	-1.53	1.72	5.60	-1.03	6.94	0.07	5.06
27	3.11	1.13	0.96	3.02	-1.20	0.80	2.58	-1.80	-1.71	-3597.75	-1.38	3.03	-4.04	-1.94	1.45	4.28	-1.14	5.75	0.04	3.80
SUMA	497.6	73.59		32.70						34764.92			-2.6458							

Anexo 14. Prueba de Chi Cuadrado – Estación Puente Virginia (Río Frío)

PRUEBA DE CHI CUADRADO																		
MAXIMO	GUMBEL			NORMAL			PEARSON			LOG-PEARSON			LOG-NORMAL			EV3		
(Y)	Yc	(Y-Yc) ²	(Y-Yc) ² /Yc	Yc	(Y-Yc) ²	(Y-Yc) ² /Yc	Yc	(Y-Yc) ²	(Y-Yc) ² /Yc	Yc	(Y-Yc) ²	(Y-Yc) ² /Yc	Yc	(Y-Yc) ²	(Y-Yc) ² /Yc	Yc	(Y-Yc) ²	(Y-Yc) ² /Yc
49	46.66	3.78	0.08	38.57	100.56	2.61	42.25	40.30	0.95	44.98	13.11	0.29	43.21	29.02	0.67	42.52	36.94	0.87
44	39.43	25.48	0.65	34.80	93.68	2.69	36.34	66.32	1.83	37.76	45.10	1.19	35.78	75.74	2.12	36.75	59.72	1.63
28	35.12	54.45	1.55	32.30	20.83	0.64	32.72	24.76	0.76	33.47	32.89	0.98	31.57	14.68	0.46	33.13	29.05	0.88
27	32.00	20.94	0.65	30.36	8.61	0.28	30.05	6.92	0.23	30.39	8.80	0.29	28.64	1.48	0.05	30.42	9.00	0.30
27	29.52	7.65	0.26	28.71	3.84	0.13	27.91	1.34	0.05	27.96	1.44	0.05	26.38	0.14	0.01	28.22	2.15	0.08
26	27.45	2.12	0.08	27.27	1.62	0.06	26.11	0.01	0.00	25.94	0.00	0.00	24.54	2.13	0.09	26.35	0.12	0.00
25	25.66	0.93	0.04	25.96	1.59	0.06	24.53	0.03	0.00	24.21	0.24	0.01	22.98	2.96	0.13	24.71	0.00	0.00
25	24.07	0.18	0.01	24.75	0.06	0.00	23.12	1.90	0.08	22.69	3.28	0.14	21.62	8.27	0.38	23.23	1.60	0.07
24	22.63	2.78	0.12	23.60	0.48	0.02	21.84	6.05	0.28	21.32	8.85	0.42	20.42	15.04	0.74	21.89	5.83	0.27
22	21.31	0.11	0.01	22.51	0.76	0.03	20.66	0.97	0.05	20.08	2.44	0.12	19.34	5.32	0.28	20.64	1.01	0.05
22	20.07	2.47	0.12	21.46	0.03	0.00	19.55	4.38	0.22	18.94	7.32	0.39	18.34	10.89	0.59	19.47	4.71	0.24
20	18.91	2.28	0.12	20.44	0.00	0.00	18.51	3.66	0.20	17.87	6.48	0.36	17.43	8.96	0.51	18.37	4.20	0.23
19	17.80	1.85	0.10	19.43	0.07	0.00	17.51	2.71	0.15	16.87	5.22	0.31	16.57	6.72	0.41	17.32	3.37	0.19
19	16.74	4.02	0.24	18.43	0.10	0.01	16.56	4.77	0.29	15.93	7.92	0.50	15.76	8.89	0.56	16.32	5.88	0.36
16	15.71	0.01	0.00	17.43	2.62	0.15	15.63	0.03	0.00	15.02	0.62	0.04	14.99	0.67	0.04	15.35	0.22	0.01
16	14.70	0.83	0.06	16.42	0.66	0.04	14.73	0.78	0.05	14.15	2.13	0.15	14.25	1.85	0.13	14.41	1.45	0.10
12	13.71	2.81	0.21	15.40	11.33	0.74	13.84	3.27	0.24	13.31	1.64	0.12	13.54	2.28	0.17	13.49	2.12	0.16
10	12.72	6.05	0.48	14.34	16.68	1.16	12.96	7.27	0.56	12.49	4.97	0.40	12.84	6.68	0.52	12.58	5.40	0.43
10	11.73	2.43	0.21	13.25	9.49	0.72	12.08	3.62	0.30	11.68	2.28	0.19	12.16	3.96	0.33	11.69	2.30	0.20
10	10.73	1.19	0.11	12.11	6.11	0.50	11.19	2.40	0.21	10.88	1.54	0.14	11.49	3.41	0.30	10.80	1.35	0.13
9	9.70	1.20	0.12	10.90	5.24	0.48	10.28	2.81	0.27	10.08	2.17	0.22	10.81	4.84	0.45	9.91	1.70	0.17
8	8.63	0.66	0.08	9.59	3.13	0.33	9.35	2.35	0.25	9.27	2.11	0.23	10.12	5.30	0.52	9.02	1.43	0.16
8	7.50	0.11	0.01	8.14	0.10	0.01	8.38	0.31	0.04	8.44	0.39	0.05	9.42	2.55	0.27	8.10	0.08	0.01
7	6.26	1.06	0.17	6.50	0.62	0.10	7.33	0.00	0.00	7.58	0.08	0.01	8.67	1.91	0.22	7.15	0.02	0.00
7	4.86	3.50	0.72	4.55	4.73	1.04	6.17	0.31	0.05	6.65	0.01	0.00	7.87	1.29	0.16	6.15	0.34	0.05
7	3.17	11.64	3.68	2.06	20.43	9.93	4.82	3.10	0.64	5.60	0.96	0.17	6.94	0.13	0.02	5.06	2.30	0.45
3	0.80	5.32	6.66	-1.71	23.23	-13.55	3.03	0.01	0.00	4.28	1.37	0.32	5.75	6.98	1.21	3.80	0.48	0.13
SUMA			16.52			8.19			7.71			7.10			11.34			7.16

Anexo 15. Frecuencia de caudales máximos – Estación Puente Virginia (Río Frío)

|Promedio	18.43	2.73
Desv. Estandar	11.17	0.65
Coef Asimetría	1.036	-0.391
Coef Curtosis	4.21	
No Datos	27	
Valor Máximo	48.6	
Valor Mínimo	3.106	
CONSTANTES		
VARIABLES		
DISTRIB. GUMBEL		
Sn	1.1005	
Yn (media)	0.5332	
a (Sn/Sd)	0.0985	
Xf (u)	13.0	
DISTRIBUCION	PEARSON	LOG-PEARSON
Coef Asimetría	1.036	-0.391
LOG NORMAL		
Coef. Variacion		
Cv (Sd/x)	0.61	0.24
GENERAL VALORES EXTREMOS EVIII		
Coef Asimetría*	1.035	
1/A^	0.65	
A^ (ver nota)	1.53	
B(alpha)	1.67	
alpha(A)	0.17	
B^	20.28	
C^	1.66	

FRECUCENCIA DE CAUDALES MAXIMOS - ESTACION PUENTE VIRGINIA																
PERIODO	FRECUENCIA	VARIABLE	VARIABLE			KT	KT	YT	KT	VALOR ESPERADO PARA CADA DISTRIBUCION PARA CADA Tr						
RETORNO	PE	REDUCIDA	REDUCIDA	W	Z	PEARSON	LOG	LOG-	LOG	NORMAL	GUMBEL	PEARSON	LOG-PEAR	LOG-NOR	EV3	
(años)		GVEIII	Y (Gumbel)			PEARSON	PEARSON	PEARSON	NORMAL	Q (m3/s)	Q (m3/s)	Q (m3/s)	Q (m3/s)	Q (m3/s)	Q (m3/s)	
1.01	0.99	0.01	-1.53	3.04	-2.33	-1.58	-2.62	1.01	-1.27	-7.6	-2.5	0.8	2.8	4.3	2.6	
1.11	0.90	0.10	-0.84	2.15	-1.29	-1.12	-1.32	1.86	-0.96	4.1	4.5	5.9	6.4	7.7	5.9	
1.25	0.80	0.22	-0.48	1.79	-0.84	-0.85	-0.82	2.19	-0.77	9.0	8.2	9.0	8.9	9.8	8.7	
1.33	0.75	0.29	-0.33	1.67	-0.68	-0.73	-0.64	2.31	-0.69	10.8	9.6	10.2	10.0	10.8	9.9	
2	0.50	0.69	0.37	1.18	0.00	-0.17	0.06	2.77	-0.24	18.4	16.7	16.6	15.9	15.8	16.3	
2.33	0.43	0.85	0.58	1.30	0.18	0.01	0.24	2.88	-0.09	20.4	18.9	18.5	17.9	17.4	18.4	
3.33	0.30	1.20	1.03	1.55	0.52	0.37	0.57	3.10	0.24	24.3	23.5	22.6	22.1	21.1	22.7	
5	0.20	1.61	1.50	1.79	0.84	0.75	0.85	3.28	0.61	27.8	28.2	26.8	26.7	25.2	27.1	
10	0.10	2.30	2.25	2.15	1.28	1.34	1.23	3.53	1.24	32.7	35.9	33.3	34.2	32.3	33.8	
20	0.05	3.00	2.97	2.45	1.65	1.88	1.53	3.73	1.89	36.8	43.2	39.4	41.5	39.6	39.8	
30	0.03	3.40	3.38	2.61	1.83	2.18	1.67	3.82	2.29	38.9	47.4	42.8	45.7	44.0	43.1	
40	0.03	3.69	3.68	2.72	1.96	2.40	1.77	3.88	2.57	40.3	50.3	45.2	48.7	47.2	45.3	
45	0.02	3.81	3.80	2.76	2.01	2.48	1.81	3.91	2.69	40.9	51.5	46.2	49.9	48.5	46.2	
50	0.02	3.91	3.90	2.80	2.05	2.56	1.84	3.93	2.80	41.4	52.6	47.0	50.9	49.7	47.0	
55	0.02	4.01	4.00	2.83	2.09	2.63	1.87	3.95	2.90	41.8	53.6	47.8	51.9	50.8	47.8	
60	0.02	4.09	4.09	2.86	2.13	2.69	1.89	3.97	2.99	42.2	54.5	48.5	52.8	51.8	48.4	
65	0.02	4.17	4.17	2.89	2.16	2.75	1.92	3.98	3.07	42.6	55.3	49.1	53.6	52.8	49.0	
70	0.01	4.25	4.24	2.91	2.19	2.80	1.94	4.00	3.15	42.9	56.1	49.7	54.4	53.6	49.5	
75	0.01	4.32	4.31	2.94	2.22	2.85	1.96	4.01	3.23	43.2	56.8	50.3	55.1	54.5	50.1	
80	0.01	4.38	4.38	2.96	2.24	2.90	1.98	4.02	3.29	43.5	57.4	50.8	55.7	55.2	50.5	
85	0.01	4.44	4.44	2.98	2.27	2.94	1.99	4.03	3.36	43.7	58.1	51.3	56.4	56.0	51.0	
90	0.01	4.50	4.49	3.00	2.29	2.98	2.01	4.04	3.42	44.0	58.6	51.7	56.9	56.6	51.4	
95	0.01	4.55	4.55	3.02	2.31	3.02	2.02	4.05	3.48	44.2	59.2	52.1	57.5	57.3	51.8	
100	0.01	4.61	4.60	3.03	2.33	3.05	2.04	4.06	3.54	44.4	59.7	52.6	58.0	57.9	52.1	
PRUEBA CHI CUADRADO										8.19	16.52	7.71	7.10	11.34	7.16	