

Análisis del Problema Geotécnico en la Orilla del Río Magdalena en el Municipio de San Pablo, Departamento de Bolívar

Andrés Fabian Fiallo Mármol

Trabajo de grado para optar el título de Magíster en Geotecnia

Director:

Ing. M.SC. Hebenly Celis Leguizamo

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas

Escuela de Ingeniería Civil

Bucaramanga

2022

Contenido

	Pág.
Introducción	17
1. Objetivos.....	18
1.1 Objetivo general.....	18
1.2 Objetivos específicos	18
2. Marco Teórico.....	19
2.1 Morfología de los ríos Sinuosos	19
2.1.1 Alteración de la Morfología de un Río Sinuoso	20
2.1.2 Erosión de las márgenes.....	20
2.1.3 Procesos físicos del flujo de curvas	21
2.2 Socavación	22
2.2.1 Factores que influyen en la Socavación.....	22
2.2.2 Socavación general	23
2.2.3 Socavación local	24
3. Descripción de la Zona General del Proyecto.....	25
3.1 Localización.....	25
3.2 Topografía.....	27
3.3 Geología del sector	29

ANÁLISIS DEL PROBLEMA GEOTÉCNICO	3
3.3.1 Evolución tectónica.....	31
3.3.2 Geomorfología	32
3.3.3 Geomorfología del área de San Pablo.....	32
3.3.3.1. Unidades geomorfológicas del área de San Pablo	33
3.3.4 Litología.....	34
3.3.4.1 Formación real (t _{mr}).....	35
3.3.4.2 Depósitos antiguos del río Magdalena (Qa11).	35
3.3.4.3. Depósitos recientes del río Magdalena (Qa12).....	35
3.3.4.4 Depósitos del río Cimitarra (Qa13).	35
3.3.5 Litología local del río.....	36
3.2 Morfología del río.....	39
3.3 Dinámica del río Magdalena en el municipio de San Pablo	40
4. Caracterización Geotécnica del Área en Estudio.....	41
4.1 Trabajos de campo	41
4.1.1 Visita de Inspección.....	42
4.1.2 Levantamiento Topográfico.....	42
4.1.3 Localización de sondeos y exploraciones del subsuelo con ensayos estándar de penetración SPT.....	43
4.1.4 Ensayos de laboratorio.....	56
4.2 Perfil stratigráfico.....	58
5. Análisis Hidráulico y De Socavación	60
5.1 Batimetría.....	60
5.2 Caudales del río Magdalena en el municipio de San Pablo, Bolívar	64

ANÁLISIS DEL PROBLEMA GEOTÉCNICO	4
5.3 Clasificación del Cauce.....	71
5.4 Caudal de análisis	74
5.5 Análisis hidráulico	76
5.5.1 Calibración del modelo	77
5.5.2 Idealización del modelo	82
5.5.3 Caudal de diseño	83
5.5.4 Modelo hidráulico del río Magdalena sector de San Pablo	83
5.6 Análisis de socavación.....	90
5.6.1 Socavación general	90
6. Análisis Geotécnico	107
6.1 Parámetros Utilizados para el Modelo Geotécnico.....	107
6.2 Modelación Geotécnica de Estabilidad.....	109
6.2.1 Modelo No. 1 Estabilidad inicial actual sin obras, estática	110
6.2.2 Modelo No. 2 Estabilidad inicial actual sin obras, seudo - estática.....	112
6.2.3 Resultados modelación inicial, condiciones estática y seudo estática.....	113
6.2.4 Modelo No. 3 Estabilidad inicial actual sin obras socavado, estática	114
6.2.5 Modelo No. 4 Estabilidad inicial sin obras socavado, seudo -estática	115
6.2.6 Resultados modelación sección socavada, condiciones estática y seudo estática	116
6.2.7 Análisis de alternativas para el control de socavación y estabilidad	117
6.2.8 Modelo alternativa 1, análisis de estabilidad en condición estática	117
6.2.9 Modelo alternativa 1, análisis de estabilidad en condición seudo-estático.....	120
6.2.10 Resultados modelación alternativa 1, condiciones estática y seudo estática	123
6.2.11 Modelo alternativa 2, análisis de estabilidad en condición estática	124

6.2.12 Modelo alternativa 2, análisis de estabilidad en condición pseudo-estático.....	126
6.2.13 Resultados modelación alternativa 2, condiciones estática y pseudo estática	128
6.3 Análisis de Amenaza.....	128
7. Conclusiones.....	133
Referencias Bibliográficas	135

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. <i>Parámetros de un Meandro</i>	20
Figura 2. <i>Profundización del lecho en la curva de un río</i>	21
Figura 3. <i>Localización general del proyecto.</i>	26
Figura 4. <i>Tipos de cuencas- río Magdalena</i>	29
Figura 5. <i>Plano geológico</i>	38
Figura 6. <i>Topografía del sector</i>	42
Figura 7. <i>Localización de los sondeos - planta</i>	43
Figura 8. <i>Proceso erosivo y de inestabilidad acentuado en la margen izquierda del Río Magdalena</i>	46
Figura 9. <i>Perfil crítico A-A'</i>	47
Figura 10. <i>Correlaciones sondeo 2, corrección de N, ángulo de fricción.</i>	48
Figura 11. <i>Correlaciones sondeo 2, resistencia al corte no drenado, peso unitario.</i>	49
Figura 12. <i>Correlaciones sondeo 6, corrección de N, ángulo de fricción.</i>	50
Figura 13. <i>Correlaciones sondeo 6, resistencia al corte no drenado, peso unitario.</i>	50
Figura 14. <i>Correlaciones sondeo 9, corrección de n, ángulo de fricción.</i>	52
Figura 15. <i>Correlaciones sondeo 9, resistencia al corte no drenado, peso unitario.</i>	52
Figura 16. <i>Correlaciones sondeo 10, corrección de n, ángulo de fricción.</i>	53
Figura 17. <i>Correlaciones sondeo 10, resistencia al corte no drenado, peso unitario.</i>	54

Figura 18. <i>Correlaciones Sondeo 12, corrección de n, angulo de fricción.</i>	55
Figura 19. <i>Correlaciones sondeo 12, resistencia al corte no drenado, peso unitario.</i>	55
Figura 20. <i>Perfil estratigráfico</i>	59
Figura 21. <i>Batimetría sobre el río Magdalena en San Pablo, Bolívar</i>	61
Figura 22. <i>Secciones transversales río Magdalena abscisa K 4+500-K 8+266.77</i>	62
Figura 23. <i>Secciones transversales río Magdalena abscisa K 0+000-K4+000</i>	63
Figura 24. <i>Sección transversal crítica río Magdalena abscisa K 5+500</i>	64
Figura 25. <i>Localización estaciones</i>	66
Figura 26. <i>Cuenca río Magdalena-Puerto Berrio</i>	69
Figura 27. <i>Cuenca río Magdalena-Barrancabermeja</i>	70
Figura 28. <i>Río Magdalena, San Pablo, Bolívar</i>	71
Figura 29. <i>Trazado río Magdalena</i>	72
Figura 30. <i>Vistas longitudinales, transversales y en planta de los principales tipos de corriente</i> 73	
Figura 31. <i>Caudales máximos de diseño para diferentes periodos de retorno</i>	76
Figura 32. <i>Sección transversal en un puente</i>	81
Figura 33. <i>Modelo hidráulico HEC-RAS</i>	84
Figura 34. <i>Variables tenidas en cuenta en la socavación</i>	91
Figura 35. <i>Perfil de Socavación para un Tr de 10 años</i>	101
Figura 36. <i>Perfil de socavación para un Tr de 100 años</i>	106
Figura 37. <i>Perfil estratigráfico. Sección analizada</i>	108
Figura 38. <i>Parámetros geotécnicos. Sección analizada</i>	108
Figura 39. <i>Análisis de estabilidad inicial, condición estático sección original</i>	111
Figura 40. <i>Factores de seguridad estáticos, análisis de sensibilidad nivel de agua.</i>	111

Figura 41. <i>Análisis de estabilidad inicial, condición pseudo-estático sección original</i>	112
Figura 42. <i>Factores de seguridad pseudo-estáticos, análisis de sensibilidad nivel de agua</i>	113
Figura 43. <i>Análisis estático sección inicial socavada</i>	114
Figura 44. <i>Factores de seguridad estáticos sección socavada, análisis de sensibilidad nivel de agua</i>	115
Figura 45. <i>Análisis pseudo estático sección inicial socavada</i>	115
Figura 46. <i>Factores de seguridad pseudo estáticos sección socavada, análisis de sensibilidad nivel de agua</i>	116
Figura 47. <i>Análisis alternativa 1, condición estática</i>	118
Figura 48. <i>Factores de seguridad estáticos, análisis de sensibilidad nivel de agua</i>	118
Figura 49. <i>Factores de seguridad estáticos, espaciamiento entre pilotes</i>	119
Figura 50. <i>Factores de seguridad estáticos, esfuerzo cortante del pilote</i>	120
Figura 51. <i>Análisis alternativa 1, condición pseudo-estática</i>	121
Figura 52. <i>Factores de seguridad pseudo estáticos, análisis de sensibilidad nivel de agua</i>	121
Figura 53. <i>Factores de seguridad pseudo estáticos, espaciamiento entre pilotes</i>	122
Figura 54. <i>Factores de seguridad pseudo estáticos, esfuerzo cortante del pilote</i>	123
Figura 55. <i>Análisis alternativa 2, condición estática</i>	124
Figura 56. <i>Factores de seguridad estáticos, análisis de sensibilidad nivel de agua</i>	125
Figura 57. <i>Factores de seguridad estáticos, esfuerzo cortante del pilote</i>	125
Figura 58. <i>Análisis alternativa 2, condición pseudo-estática</i>	126
Figura 59. <i>Factores de seguridad pseudo estáticos, análisis de sensibilidad nivel de agua</i>	127
Figura 60. <i>Factores de seguridad pseudo estáticos, esfuerzo cortante del pilote</i>	127
Figura 61. <i>Sección K 3+000</i>	130

Figura 62. *Sección K 4+000* 130

Figura 63. *Sección K 5+000* 131

Figura 64. *Sección K6+000* 132

Figura 65. *Plano de zonificación de amenaza* 133

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. <i>Pendientes hidráulicas a lo largo del río Magdalena</i>	28
Tabla 2. <i>Localización de sondeos - coordenadas</i>	44
Tabla 3. <i>Resultado SPT</i>	45
Tabla 4. <i>Corrección de N-SPT por energía y confinamiento, sondeo 2</i>	47
Tabla 5. <i>Corrección de N-SPT por energía y confinamiento, sondeo 6</i>	49
Tabla 6. <i>Corrección de N-SPT por energía y confinamiento, sondeo 9</i>	51
Tabla 7. <i>Corrección de N-SPT por energía y confinamiento, sondeo 10</i>	53
Tabla 8. <i>Corrección de N-SPT por energía y confinamiento, sondeo 12</i>	54
Tabla 9. <i>Ensayos de laboratorio</i>	56
Tabla 10. <i>Perfil estratigráfico</i>	59
Tabla 11. <i>Caudales del río Magdalena en el municipio de San Pablo, Bolívar</i>	65
Tabla 12. <i>Localización - Estación Puerto Berrio</i>	67
Tabla 13. <i>Localización - Estación San Pablo</i>	68
Tabla 14. <i>Localización - Estación Barrancabermeja</i>	68
Tabla 15. <i>Distancias y caudales máximos a diferentes períodos de retorno</i>	74
Tabla 16. <i>Caudales máximos a diferentes períodos de retorno</i>	75
Tabla 17. <i>Variaciones de rugosidad para las corrientes</i>	80
Tabla 18. <i>Coefficientes de contracción y expansión</i>	81

ANÁLISIS DEL PROBLEMA GEOTÉCNICO	11
Tabla 19. <i>Caudal de diseño para el río Magdalena en el sector de San Pablo</i>	83
Tabla 20. <i>Resultados modelo hidráulico para un período de retorno de 10 años</i>	86
Tabla 21. <i>Resultados modelo hidráulico para un período de retorno de 100 años</i>	88
Tabla 22. <i>Valores de coeficiente de concentración del cauce μ</i>	93
Tabla 23. <i>Valores de coeficientes x,y,z</i>	93
Tabla 24. <i>Valores de β</i>	94
Tabla 25. <i>Valores de ψ</i>	95
Tabla 26. <i>Socavación general en la sección del sitio en estudio para un Tr de 10 años</i>	95
Tabla 27. <i>Socavación general en la sección del sitio en estudio para un Tr de 100 años</i>	101
Tabla 28. <i>Factores de seguridad básica y mínimos directos</i>	110
Tabla 29. <i>Resultados modelación inicial, condiciones estática y seudo estática</i>	113
Tabla 30. <i>Resultados modelación sección socavada, condiciones estática y seudo estática</i>	116
Tabla 31. <i>Resultados modelación alternativa 1, condiciones estática y seudo estática</i>	123
Tabla 32. <i>Resultados modelación alternativa 2, condiciones estática y seudo estática</i>	128

Lista de Apéndices

Pág.

Glosario

Socavación: una corriente de agua que se desplaza en su cauce o en una zona de inundación tiene una cierta capacidad de suspender y arrastrar partículas sólidas que constituyen el lecho sobre el que ocurre el flujo. Este movimiento de material sólido en corrientes aluviales es un fenómeno complejo que depende de diversos factores, tales como la configuración geológica y topográfica del cauce, las características hidráulicas de la corriente, esto es lo que produce la socavación (Badillo & Rodriguez).

Caudal: medida del flujo de agua en un punto dado. Es frecuente el uso de diversas unidades de medida dependiendo del tipo de caudal que se mida. El caudal de un río puede ser expresado en metros cúbicos por segundo, mientras que en un sondeo suele ser más conveniente expresarlo en litros por segundo (Cortes, 2004).

Cauce: tramo de un canal fluvial cuyo gradiente y corte transversal se han ajustado para llevar exclusivamente el caudal y la carga de sedimentos que es aportada normalmente desde su tramo inmediatamente superior (Cortes, 2004).

Meandro: curva descrita por el curso de un río, cuya sinuosidad es pronunciada. Se forman con mayor facilidad en ríos de llanuras aluviales con pendiente escasa, dado que los sedimentos suelen depositarse en la parte convexa del meandro, mientras que en la cóncava, debido a la fuerza centrífuga, predomina la erosión y el retroceso de la orilla (Strahler, 2013).

Rugosidad: la toma de muestras es una operación delicada e importante; delicada porque no es fácil cortar y subir una porción de terreno situado a una gran profundidad, en las mejores condiciones posibles; importante porque son las muestras las que van a permitir estudiar en el

laboratorio el terreno y determinar la carga resistente. Para esto sería necesario que la muestra represente al suelo tal como éste se encuentra en su estado natural, inmerso en el terreno; pero esto casi es imposible, ya que la misma extracción altera, a menudo de una forma importante, las características de la muestra, en particular su compacidad.

Corriente: muestra representativa del suelo que conserva las mismas condiciones que tenía en el sitio.

Resumen

Título: Análisis del problema geotécnico en la orilla del río Magdalena en el municipio de San Pablo, departamento de Bolívar*

Autor: Andrés Fabián Fiallo Mármol**

Palabras Clave: Socavación, cauce, río.

Descripción:

Se analizó la margen del principal afluente de Colombia, río Magdalena a la altura del paso por el Municipio de San Pablo, Bolívar, la cual viene siendo erosionada por el flujo de la corriente de agua, este efecto dinámico del caudal sobre una parte de la orilla ha originado un proceso de deterioro en forma continua, afectando a las construcciones adyacente, se realizó para esto un análisis hidráulico de caudales para diferentes periodos de retorno, velocidades del flujo, socavación por transporte de partículas, de acuerdo al cambio de sección y perfil topográfico.

Se realizó una búsqueda y recopilación de información, ensayos de campo, ensayos de laboratorio y estudios previos realizados en el área, para establecer el tipo de perfil geotécnico presente, se realizaron modelos hidráulicos en el software Hec-Ras y modelos geotécnicos en software Slide de Rocscience, para el análisis del perfil geotécnico y presiones de agua, se identificaron problemas de erosión, socavación e inestabilidad de la margen. Para esto se proponen dos alternativas de mitigación a los problemas identificados que aquejan la comunidad del municipio de San Pablo, modelados por medio del software Slide.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela De Ingeniería Civil. Maestría en Geotecnia. Director: MSc. Hebenly Celis Leguizamo

Abstract

Title: Analysis of the geotechnical problem on the banks of the Magdalena River in the municipality of San Pablo, department of Bolívar*

Author: Andrés Fabián Fiallo Mármol **

Keywords:

Descripción

The margin of the main tributary of Colombia, Magdalena River at the height of the passage through the Municipality of San Pablo, Bolívar, which is being eroded by the flow of the water flow, this dynamic effect of the flow on a part of the shore has caused a deterioration process continuously, affecting the adjacent buildings, was carried out for this a hydraulic flow analysis for different periods of return, flow velocities, scouring by transport of particles, according to the change of section and profile topographic.

We conducted a search and collection of information, field trials, laboratory tests and previous studies in the area, to establish the type of geotechnical profile present, hydraulic models were made in the software Hec-Ras and geotechnical models in software Slide Rocscience, for the analysis of the geotechnical profile and water pressures, problems of erosion, scour and instability of the Marge are identified. For this purpose, Slide modeling of alternative modeling was carried out to mitigate the problems of erosion and instability identified that afflict the community of the municipality of San Pablo.

* Trabajo de grado

** Faculty of Physical-Mechanical Engineering. School Of Civil Engineering. MSc in Geotechnics. Director: MSc. Hebenly Celis Leguizamo

Introducción

El casco urbano del municipio de San Pablo, está ubicado directamente sobre la orilla izquierda del río Magdalena y debido a los fenómenos naturales del río, la orilla ha venido sufriendo procesos de erosión y socavación, (CORMAGDALENA, 2014) originando un proceso de deterioro en forma continúa afectando a las construcciones adyacentes y generando alarma en los pobladores y comerciantes que tienen asiento en esta zona de la municipalidad.

Para la realización de este proyecto inicialmente se realizó una consulta bibliográfica donde se recopiló toda la información necesaria para dar solución al problema, se ejecutaron ensayos de campo y laboratorio que permitieron dar una caracterización más acertada del suelo y de esa forma poder plantear las diferentes soluciones.

Este proyecto busca determinar el comportamiento de estabilidad de los suelos que conforman la orilla izquierda del río Magdalena y plantear alternativas de solución para un tramo de talud en la orilla del río Magdalena.

1. Objetivos**1.1 Objetivo general**

Diagnosticar el comportamiento de estabilidad de los suelos que conforman la orilla y proponer alternativas de solución para un tramo de talud en la orilla del río Magdalena en el sector del muelle del Municipio de San Pablo, Bolívar.

1.2 Objetivos específicos

Recolección y actualización de la información disponible de la zona a intervenir.

Caracterización geológica y geotécnica del perfil del talud.

Estimar la socavación que se pueda generar en el cauce del río Magdalena en el sector del Muelle del municipio de San Pablo.

Análisis y modelamiento de la orilla del talud.

Propuesta y alternativas y diseño de solución.

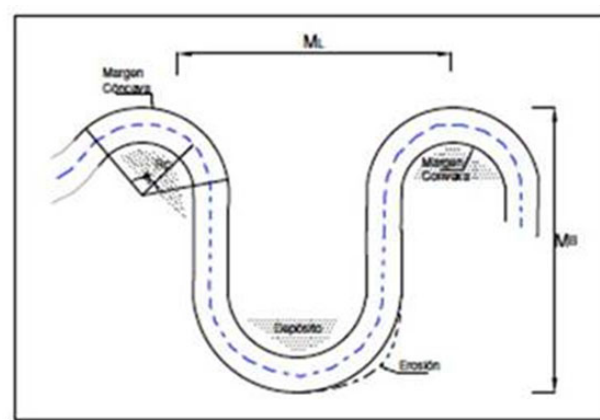
2. Marco Teórico

Dentro de las medidas de prevención para evitar problemas de erosión y socavación de las orillas, el principal objetivo es la protección del cauce con el de evitar que la fuerza dinámica de las corrientes de agua, realicen el desprendimiento de las partículas que conforman el suelo y evitar el arrastre y sedimentación en las zonas bajas.

Los ríos aluviales son sistemas físicos en permanente evolución, por lo que sus características varían constantemente a través del tiempo y de un lugar a otro a lo largo de un mismo curso. En general propensos a desarrollar patrones de alineamiento en planta del tipo meandriforme y exhiben marcadas tendencias a experimentar procesos de erosión de márgenes y migraciones laterales del curso.

2.1 Morfología de los ríos Sinuosos

La sinuosidad de un cauce es el mecanismo natural por el cual un río ajusta a su pendiente un equilibrio dinámico en los procesos de erosión, transporte y sedimentación que constituyen la configuración y geométrica del cauce. La Figura muestra un esquema con los parámetros principales de un meandro. La movilidad de los meandros puede clasificarse en dos categorías: a) la migración hacia aguas abajo de todo el meandro y b) la expansión de la curvatura del meandro, su estrangulamiento y finalmente el corte del mismo. El desarrollo de meandros incrementa la longitud del río y por consiguiente disminuye la pendiente.

Figura 1.*Parámetros de un Meandro*

Nota: Cárdenas, Oscar. (2012). Universidad del Valle

2.1.1 Alteración de la Morfología de un Río Sinuoso

Los ríos sinuosos pueden ver alterada su morfología por diferentes causas entre las que se pueden incluir las que son naturales y características propias del sitio del análisis, como las provocadas por la interacción del hombre, algunas causas naturales son las siguientes:

- Confinamiento geológico: influye principalmente en las formas y tamaños de las curvas.
- Corte de meandros: ocurre generalmente durante una avenida y es función de la curvatura, la rugosidad, la vegetación, la geometría del cauce mismo y la magnitud de la avenida.
- Reducción de velocidad del flujo a causa del incremento de la sinuosidad.

2.1.2 Erosión de las márgenes

La erosión de las orillas constituye dos procesos, la erosión por fricción y la falla de la banca. La primera es causada directamente por el esfuerzo cortante en la superficie de la banca, y

la segunda se debe al mecanismo de falla del material del talud iniciada en la pata del mismo, que también está determinado por el cizallamiento. El tiempo de la falla se relaciona con muchos procesos hidrológicos, tales como presión de poros, nivel freático, la densidad de la vegetación y las avenidas.

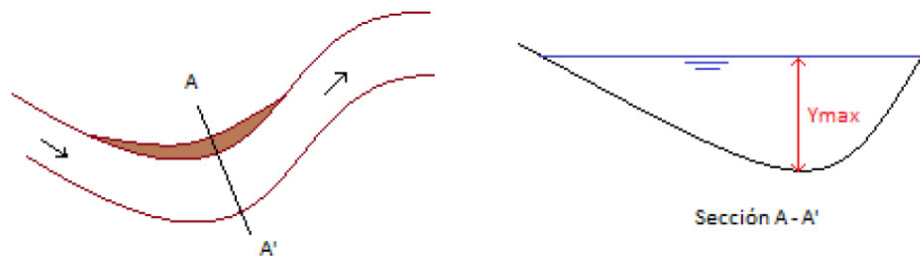
2.1.3 Procesos físicos del flujo de curvas

Debido a la fuerza centrífuga, en la parte externa de una curva el flujo presenta sobreelevación, lo cual conlleva a que se presente una diferencia de presiones en la sección; este fenómeno hace que se originen corrientes secundarias desde la parte superior hacia el fondo en una misma sección transversal. Estas corrientes superficiales son dirigidas hacia los bancos externos mientras que las corrientes de fondo son dirigidas hacia los bancos internos. Como consecuencia de este proceso la sección de curva de un río presenta una pendiente transversal típica Figura 2.

Esta sobreelevación del flujo ocasiona un movimiento helicoidal en respuesta a dicha corriente secundaria que se establece en dirección perpendicular al sentido del escurrimiento principal.

Figura 2.

Profundización del lecho en la curva de un río



Nota: Cárdenas, Oscar. (2012). Universidad del Valle

2.2 Socavación

La socavación es un tipo de erosión hídrica que hace referencia a la pérdida del material del lecho y márgenes de un cauce, debido a la capacidad de transporte asociada a un evento hidrológico. La reducción de este nivel respecto a un nivel de referencia es denominada profundidad de socavación. La profundidad de socavación alcanzada depende del tipo y tamaño de las partículas que conforman el lecho y la magnitud y duración del evento hidrológico.

La socavación depende de muchos factores, que pueden agruparse en dos grupos principales: los factores geomorfológicos y los factores de transporte.

Además, la socavación puede clasificarse en dos tipos según su naturaleza: socavación general y socavación local.

2.2.1 Factores que influyen en la Socavación

Los factores geomorfológicos hacen referencia a las características de la cuenca y el río analizado. Dentro de las características de la cuenca se incluyen los factores climáticos y los usos y tipos de suelos, elementos de primera importancia para determinar las tasas de erosión y transporte, en el sitio de interés.

Las características de mayor interés son la pendiente, la geometría de la sección transversal, su forma en planta, las características del material del lecho y las condiciones de borde del canal.

La caracterización del material del lecho incluye la distribución del sedimento, la gradación, la estratificación de capas en el lecho y la presencia de materiales cohesivos.

Los sedimentos no cohesivos son aquellos cuyo movimiento depende solamente de las propiedades de las partículas que los componen y de la posición relativa entre las mismas.

Dentro de este grupo se encuentran las arenas y gravas. Los sedimentos cohesivos, por el contrario, son aquellos cuyo movimiento inicial depende de la compleja interacción físico-química entre las partículas coloidales y los efectos de la presión de poros. La socavación en lechos de material cohesivo es un fenómeno mucho más complejo y no puede ser evaluado según las características del tamaño de la partícula.

Otra característica importante son los controles geológicos, pues determinan los límites probables de erosión.

Los factores de transporte se relacionan con el transporte tanto de agua como de sedimentos. Las características del flujo, como la velocidad, duración, caudal y frecuencia, así como las tasas de transporte y tipo de sedimento transportado durante tales eventos, son necesarias para estimar la profundidad de socavación.

2.2.2 Socavación general

La socavación general es aquella disminución en el nivel base del lecho del cauce como consecuencia de aumento en la velocidad y el esfuerzo cortante del flujo en el lecho, que pone en movimiento las partículas de fondo y de las márgenes que se encuentran en equilibrio, indistintamente de la presencia o no de cualquier estructura antropogénica.

Los procesos fluviales y geomorfológicos que dan lugar a la socavación general ocurren en un amplio rango de escalas espacio-temporales.

Dentro de la socavación general se incluyen los procesos de degradación naturales como incisión del lecho, migración lateral, cambios en las formas del lecho y socavación en confluencias.

En términos de escala espacial, inestabilidades dentro de la cuenca pueden influir en los procesos que contribuyen a la socavación general. Por ejemplo, cambios en los usos del suelo pueden afectar la disponibilidad de sedimentos que transporta un río y por consiguiente afectar directamente las tasas de socavación de algún tramo en particular.

Los cambios ocasionados por la socavación general a diferentes escalas espaciales son proporcionales a la escala temporal en que ocurren, es decir, cambios en los patrones de drenaje y perfiles longitudinales en una cuenca varían en escalas de tiempo geológicas. A escala de tramo, el alineamiento de un cauce puede variar desde años a siglos, cambios en la sección transversal pueden ocurrir de días a años, y cambios a escalas locales, como las formas del lecho, pueden variar incluso a escala horaria.

Los cambios a largo plazo son consecuencia de una degradación progresiva y cuasipermanente debida a cambios hidrológicos y/o geomorfológicos a escala de cuenca, por ejemplo, cambio climático, disminución del nivel base o construcción de una presa. A corto plazo, la socavación general se desarrolla durante una creciente o crecientes continuos durante un espacio temporal corto.

La socavación es un fenómeno complejo que para la comprensión del problema y su solución requiere un análisis cualitativo inicial, enfocado en entender los procesos físicos a escala de cuenca, de tramo y de sección.

2.2.3 Socavación local

Contrario a la socavación general, la socavación local es el descenso abrupto en el lecho fluvial, generado por la remoción del material de fondo debido a algún elemento físico componente de alguna obra dentro del cauce o alguna singularidad natural que se encuentre

interpuesta dentro de la corriente. Dada la complejidad del movimiento del fluido causante de la socavación localizada, su análisis se deriva en teorías diferentes y en ocasiones contradictorias, dependiendo de las condiciones que se hayan tenido en cuenta para su definición.

Este tipo de socavación ha sido más estudiado que la socavación general, pues los análisis de socavación se realizan, en su mayoría, para conocer el diseño de cimentaciones de obras que están en contacto directo con el cauce (puentes, espolones, estribos, pilas, etc.), ya que son obras de importancia en la subestimación de la socavación podría conllevar a la destrucción total de la estructura, o la sobreestimación llevaría a adoptar profundidades de cimentación que hacen extremadamente costosa la obra.

Sea cual sea el tipo de socavación estudiado, determinar la magnitud de la profundidad de socavación es complicado por la naturaleza cíclica del proceso erosivo. La erosión puede alcanzar su máximo valor durante una creciente, y volverse difícilmente visible tras el paso de la misma al rellenarse con sedimento los “huecos” erosionados.

3. Descripción de la Zona General del Proyecto

3.1 Localización

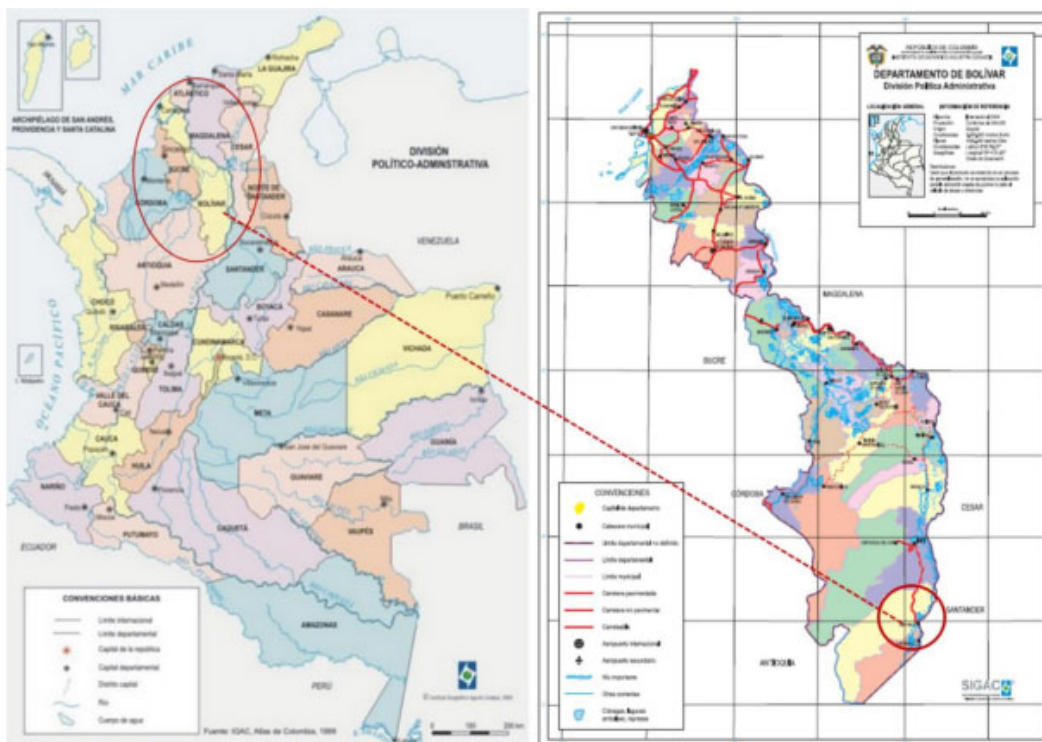
El área estudiada se encuentra ubicada en el Municipio de San Pablo, Bolívar, comprendida entre el río Magdalena y su orilla izquierda aguas abajo, en las siguientes coordenadas geográficas: 7°28'23.96" latitud Norte y 73°54'50.95" longitud Oeste. Limita al Este con el departamento de Santander, al Norte con el municipio de Simití y Santa Rosa,

Bolívar, al Sur con el municipio de Cantagallo, Bolívar y al Oeste con el departamento de Antioquia. La extensión total del municipio es de 2086 Km², y la altitud de la cabecera municipal es de 75 msnm.

La principal vía de acceso al municipio es fluvial por el río Magdalena, y por carretera se comunica con Simití y Santa Rosa en el departamento de Bolívar.

Figura 3.

Localización general del proyecto.



Nota: Imágenes tomadas de la página web del Instituto Geográfico Agustín Codazzi – IGAC

El proyecto consiste en la realización del estudio de las características geológicas, geomorfológicas y geotécnicas del río Magdalena, la solución del problema de erosión de la orilla del río Magdalena, en la zona urbana del municipio de San Pablo y diseño de las obras propuestas.

3.2 Topografía

El río Magdalena en el municipio de San Pablo, Bolívar, es sinuoso, trezado y con gran cantidad de Islas.

La cuenca del río Magdalena está conformada por tres sectores:

- Cuenca alta: Se extiende desde su nacimiento hasta la ciudad de Neiva; debido a las grandes pendientes, el río en este sector es torrencioso, con transporte de sedimentos de gran tamaño.
- Cuenca media: Comienza en la ciudad de Neiva y se extiende hasta el municipio de Puerto Wilches. En este sector tiene el río adquiere la configuración trezada con grandes porcentajes de cimentación, formación y destrucción de brazos y de islas.
- Cuenca baja: Comienza en el municipio de Puerto Wilches y se extiende hasta la ciudad de Barranquilla. En este sector el río trata de ser inicialmente sinuoso, ligeramente trezado y anaramificado y finalmente toma una morfología meándrica Ver Tabla 1.

Tabla 1.*Pendientes hidráulicas a lo largo del río Magdalena*

Cuenca	Sector	Pendiente (Cm/Km)
Alta	Nacimiento – Neiva	>50
Media	Girardot – Honda	30
	Honda – Puerto Inmarco	25
	Puerto Inmarco – Peñas Negras	30
	Peñas Negras – Puerto Wilches	25
Baja	Puerto Wilches – Gamarra	20
	Gamarra – El Banco	13
	El Banco – Magangué	7
	Magangué – Calamar	5
	Calamar – Barranquilla	<5

Nota: Geotecnología S.A.S. 2010

Figura 4.

Tipos de cuencas- río Magdalena



Nota: Google Earth

3.3 Geología del sector

El sector Noroeste de la cuenca del Valle Medio del Magdalena se encuentra dominado por un sistema de fallas de dirección Noreste-Suroeste y pliegues de carácter regional. Se

muestra un modelo de pliegues y fallas más acentuado en el Cretáceo que en el Terciario, en el cual los movimientos tectónicos no fueron tan marcados y el rasgo más predominante es un monoclinal buzando hacia el oriente afectado por una serie de fallas de carácter normal.

Los movimientos tectónicos que dieron origen a las cordilleras Central y Oriental son los responsables de dicho modelo. Al observar las estructuras a nivel regional se puede encontrar un predominio del fallamiento en dirección Noreste-Suroeste, y de tipo normal. Las estructuras inversas también juegan un papel importante y las fallas transversales comúnmente se encuentran enmarcadas dentro de esta tendencia regional y son posiblemente el resultado del refuerzo secundario transmitido a las capas adyacentes.

La depresión del Magdalena medio es de carácter tectónico. Está limitada por fallas regionales de tipo inverso. Al occidente se encuentran las Fallas Mulato - Getudo - Casabe y la Falla de Cimitarra. Estas dos fallas guardan entre sí un relativo paralelismo y tienen un rumbo NNE. La primera afecta tanto a rocas Ígneas y Metamórficas como también a rocas sedimentarias Terciarias que ocupan la zona occidental de la cuenca del Magdalena. La Falla Cimitarra afecta parte del Cretáceo y del Terciario basal con dirección Noreste-Suroeste y se extiende desde el sector de la Rompida, hacia el sur del pozo La Cristalina 2, definido como una falla normal con buzamiento al Noroeste.

En la margen oriental, la depresión del Magdalena está limitada por la flexura-Falla de Chucurí, la cual pone en Contacto las unidades Cretácicas, al oriente, con las Terciarias al occidente.

Entre la estructura de Chucurí y el río Magdalena se desarrollan las Fallas Salinas, Arrugas y la Falla de Infantas. Además, se desarrollan numerosos lineamientos rectilíneos con rumbo NNE, los cuales son conspicuos al norte de la localidad de Badillo. Entre las Fallas de

Cimitarra y Salinas se desarrolla un amplio pliegue de tipo sinclinal, el cual afecta hasta la unidad sedimentaria denominada Grupo Real, sobre la cual, y en posición horizontal, yace la Unidad Mesa.

3.3.1 Evolución tectónica

El Valle Medio del Magdalena ha sido afectado por eventos tectónicos distensivos que comprenden un lapso prolongado con algunas interrupciones entre el Triásico Tardío y el Cretáceo Superior, y eventos tectónicos comprensivos, que se inician en el Paleoceno y se extiende hasta la actualidad. Durante el Mioceno Medio a Tardío irrumpe una fase de compresión mayor y los sedimentos hasta entonces depositados son plegados y fallados. Las paleofallas normales del Zócalo formadas en la fase distensiva son activadas como fallas inversas durante el Mioceno y Plioceno. Durante el Mioceno Tardío y el Plio-Pleistoceno se deposita la última secuencia molásica representada por el Grupo Real, Grupo Mesa y depósitos recientes.

La zona de San Pablo se encuentra influenciada por un sistema de fallas oblicuas al río Magdalena, relacionadas con el borde occidental de la Cordillera Oriental. Se trata de un conjunto de fallas directas todas ellas con labios orientales hundidos. Existen evidencias de movimiento de estas fallas durante el Terciario (Julivert, 1961). Estas fallas conocidas como fallas de Cantagallo y falla de Cimitarra, produjeron los yacimientos petroleros, en explotación por parte de Ecopetrol.

3.3.2 Geomorfología

El Valle del Magdalena está conformado por la llanura aluvial, la denominada planicie aluvial de Piedemonte y el paisaje de colinas.

La llanura aluvial comprende formas variadas como orillares, diques, bacines y varios niveles de terrazas. La planicie aluvial de Piedemonte está constituida por abanicos que se desprenden de las cordilleras y que muestran un relieve que varía desde ligeramente plano hasta inclinado.

La zona de colinas bordea los flancos de las dos cordilleras o alternan con el paisaje plano. Son formaciones de relieve ondulado o quebrado que se ha desarrollado generalmente sobre materiales Terciarios y han sido modeladas profundamente por fenómenos erosivos.

Algunas colinas fueron inicialmente terrazas altas o abanicos que por fenómenos de disección alcanzaron las formas que hoy presentan.

La parte central de la depresión consistió de un relieve plano, horizontal, conformado por estratos del Grupo Mesa, el cual representa la última unidad sedimentaria del Terciario no modificada por el plegamiento sinclinal de las unidades estratigráficamente infrayacentes a ella.

3.3.3 Geomorfología del área de San Pablo

La geomorfología del área de San Pablo es el resultado de los siguientes agentes:

- Afloramientos de roca del Terciario en las colinas de los departamentos de Bolívar y de Santander y en el sector al sur de Cantagallo y al norte de San Pablo.
- La acción de las fallas geológicas de Cimitarra y de Cantagallo. Estas fallas geológicas son responsables de los afloramientos de rocas cerca de los sectores urbanos de Cantagallo y de San Pablo.

- El cauce actual y reciente del río Magdalena al oriente de los sectores urbanos mencionados.
- El cauce antiguo del río Magdalena al occidente de Cantagallo, el cual sirve de cauce actual del río Cimitarra entre el caño de La Rompida y San Pablo.
- La divagación del río Cimitarra.
- La acción antrópica sobre el río Magdalena.

3.3.3.1. Unidades geomorfológicas del área de San Pablo

- **Colinas de Bolívar:** Las colinas de Bolívar están localizadas al noroccidente del valle del río Cimitarra. Se pueden clasificar como colinas erosionales cuyo relieve se debe al modelado de la erosión por agentes erosivos, principalmente el agua. El patrón de drenaje es dendrítico a subdendrítico.
- **Colinas de San Pablo:** Corresponde a una serie de mesas y colinas cuyo relieve es producido por la erosión. Las colinas son onduladas y sus alturas no superan los 30 metros.

La morfodinámica está controlada principalmente por la erosión extendida de tipo laminar y cárcavas en sectores, sin que se presente remoción en masa, considerándose geotécnicamente estables. Corresponden al sitio del muelle y al sector urbano de San Pablo.

El sector es atravesado por corrientes de agua, las cuales forman valles en franjas de relieve semiplano con taludes laterales de fuerte pendiente.

- **Isla de Cantagallo:** La Isla de Cantagallo es un cuerpo alargado emplazado en dirección sur-norte, siendo más ancha hacia el sur y con una saliente alargada en su extremo norte; su origen es la presencia de afloramientos de rocas del Terciario al sur del sector urbano de Cantagallo.

Estos afloramientos impidieron que la isla fuera invadida por el río Magdalena. El río Magdalena antiguamente tenía su cauce al occidente de la isla y actualmente pasa al oriente. No existen pases actuales de agua entre los dos cauces y el drenaje principal de la isla es hacia el río Cimitarra. Igualmente dentro de la isla propiamente dicha no hay cuerpos de agua importantes ni ciénagas.

La isla actúa como una barrera natural entre los dos cauces.

- **Valle trenzas y ciénagas del río Magdalena:** El río Magdalena es un cauce trenzado en el cual predominan las islas anchas y alargadas, formando un sistema casi anaramificado; predomina un tipo de morfología plana a semi-plana; estas islas se dan como resultado de las diferentes direcciones que puede tomar el cauce del río y por consecuente la fuente de depósito, a través de los años. Algunas de estas islas se han consolidado por acción de las obras de protección construidas por Ecopetrol.

- **Valle y ciénaga del río Cimitarra:** Al sur-occidente de San pablo aparece un valle ancho, el cual corresponde a un cauce antiguo del río Magdalena desde el caño de la Rompida hasta San Pablo. Este valle está compuesto por una gran cantidad de ciénagas, las cuales se encuentran alineadas de acuerdo al cauce antiguo del río Magdalena, que circuló por el sector. Sobre este valle divaga en forma errática el río Cimitarra. Los depósitos de suelos corresponden a materiales sedimentados por el antiguo río Magdalena y depósitos lacustres de las ciénagas actuales. Ecológicamente funciona como un sistema independiente del río Magdalena pero con un aporte importante de agua de éste por el caño de La Rompida.

3.3.4 Litología

El área de trabajo puede clasificarse en las siguientes unidades.

3.3.4.1 Formación real (t_{mr}). Consta de un conglomerado basal, seguido de areniscas compactas con intercalaciones de arcillas grises y rojas, algunos niveles contienen troncos de árboles silicificados. Se observan mantos de lignitos y en la parte superior las areniscas contienen materiales volcánicos. El manto más superficial corresponde a arcillas limosas, color rojo.

3.3.4.2 Depósitos antiguos del río Magdalena (Q_{a1}). Estos depósitos corresponden a islas formadas por el sistema de trenzas del río Magdalena y consisten principalmente en depósitos de limos arenosos blandos, y arenas limosas color café oscuro a negro. Se pueden observar sectores de transición de arcillas blandas húmedas color negro. Presenta un alto grado de humedad en depósitos poco consolidados.

3.3.4.3. Depósitos recientes del río Magdalena (Q_{a2}). Esta zona fue identificada en fotografías aéreas tomadas por Ecopetrol en 1950 y consisten de brazos antiguos del río Magdalena alrededor de las islas. Estos brazos se rellenaron con limos arenosos y arenas muy similares a los materiales que conforman las islas.

3.3.4.4 Depósitos del río Cimitarra (Q_{a3}). El río Cimitarra es un río meándrico, el cual ha divagado en un ancho de varios kilómetros formando ciénagas. Estas ciénagas están formadas por depósitos de limos blandos y arenas limosas sueltas, con alto grado de humedad, correspondiente a material depositado por la corriente.

3.3.5 Litología local del río

En la orilla del Río Magdalena, en el sector urbano de San Pablo afloran los suelos residuales de la formación Real (Tmr) de edad Terciario. La Formación Real está compuesta por intercalaciones de conglomerados, areniscas y arcillas. El manto más superficial corresponde a arcillas limosas, color rojo.

Los suelos que afloran en la orilla derecha del río Magdalena, corresponden a arcillas, limos arenosos y arenas limosas de colores rojo y marrón, consolidadas y en estado relativamente duro. Sin embargo, desde el punto de vista de estabilidad no se pueden considerar como roca.

La Formación o Grupo Real está integrada por areniscas de grano fino a medio, de color crema-amarillo. Se presentan en estratos delgados de 0,1 a 0,3 m de espesor. Areniscas conglomeráticas y/o conglomerados finos. Arcillolitas de color crema, parcialmente oxidadas.

Las anteriores unidades están fuertemente confinadas y presentan alta resistencia a los procesos erosivos, conforman taludes altos, verticales y muy estables.

Las argilitas, tanto del Grupo Real como de la Formación Mesa, en estado húmedo presentan alto grado de cohesión, lo cual hace que sean resistentes a la desintegración especialmente por socavación.

El material de depósito antiguo, que presenta estratificación, está integrado por tres niveles:

- Hacia la base y suprayacente a las unidades Real y/o Mesa aflora un nivel de arcillas de color gris, con alto grado de compactación, desarrollando superficies bien definidas de estratificación. Este nivel arcilloso se encuentra en posición horizontal y presenta alta resistencia

a los procesos de erosión, especialmente a la socavación; forma taludes verticales, los cuales presentan mínimo desplazamiento lateral de la orilla del río. Constituye orillas permanentes.

- Sobre el nivel anteriormente descrito yacen arcillas arenosas, las cuales también han adquirido un alto grado de compactación. Se encuentran en capas de 0.8 a 1.0 m de espesor. Conforman taludes verticales, son de color gris, parcialmente oxidadas. Presentan remanentes de raíces y elementos vegetales. Este nivel, intermedio en el talud, es más susceptible a la erosión que el nivel infrayacente, pero mucho menos que el suprayacente. Por cambios de humedad adquiere discontinuidades, las cuales delimitan bloques que por acción de la corriente se desestabilizan y caen. La orilla del río sobre este nivel sufre desplazamientos laterales.

Finalmente, hacia la parte superior del perfil del depósito estratificado, aflora un nivel constituido por arenas cuarzosas, sueltas o débilmente compactadas, de máxima susceptibilidad a la erosión por socavación.

Cuando el agua del río se pone en contacto con el nivel arenoso produce una intensa erosión y el talud retrocede rápidamente.

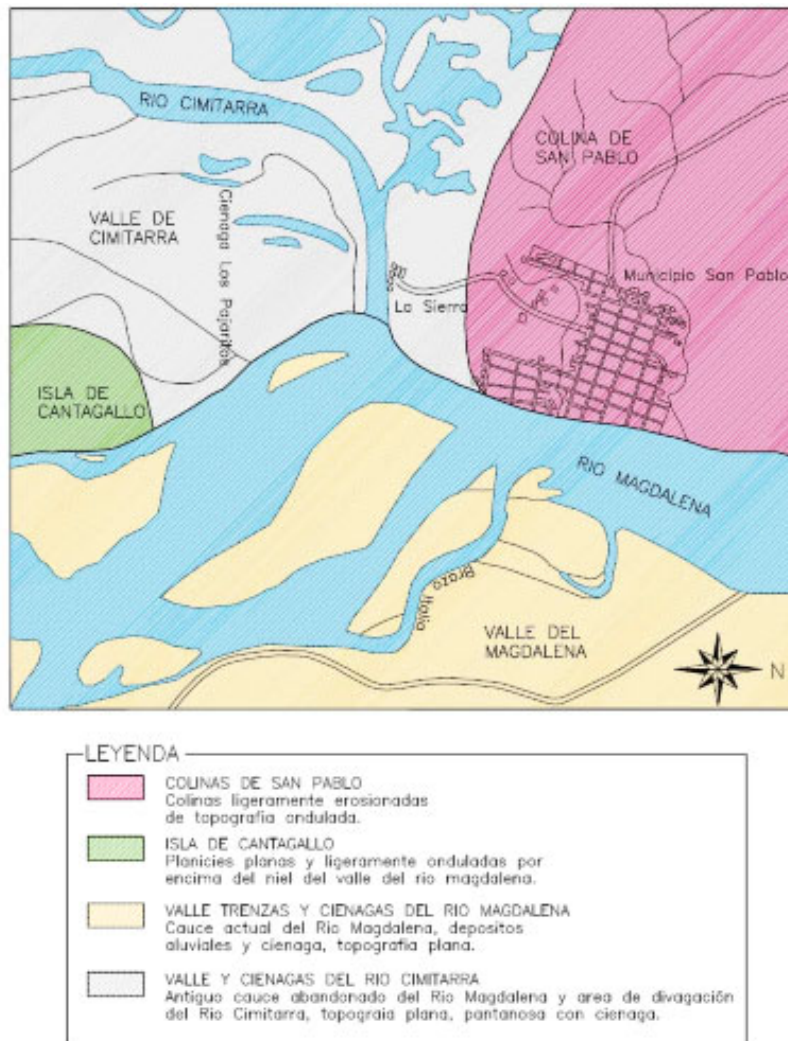
Como resultado de las diferentes resistencias a la erosión en los niveles del depósito estratificado se genera un talud escalonado, siendo cada vez más anchos los escalones sobre los niveles arcillosos.

Como conclusión los suelos de la orilla del río en San Pablo son relativamente resistentes a la erosión, pero las velocidades de la corriente son superiores a 5.0 metros por segundo. La velocidad de la corriente es tan fuerte que, a pesar de la resistencia de la erosión a los suelos, se está produciendo una erosión progresiva con avance de la orilla de hasta 50 centímetros por año.

Las gradas que se forman en el fondo del río frente a San Pablo y que se pueden observar en las batimetrías corresponden a las superficies de erosión de la formación Real indicadas anteriormente.

Figura 5.

Plano geológico



Nota: Imágenes tomadas de Geotecnología S.A.S. (2010). Diseño de las obras de control de erosión en la orilla del río Magdalena sector urbano de San Pablo – Bolívar.

3.2 Morfología del río

Los procesos de erosión - sedimentación del río Magdalena son función de la energía de la corriente y de la resistencia del material sobre el cual escurre el flujo. El comportamiento litoestructural de la cuenca del río Magdalena, corresponde a una secuencia sedimentaria estratificada en posición sub-horizontal, denominada Formación Mesa; Sobre este material el río empezó a entallar su cauce, en parte por procesos erosivos y en parte por procesos tectónicos, originándose la cuenca de sedimentación que progresivamente fue colmatándose, inicialmente por material de origen lagunar, pasando luego a material lagunar-aluvial y finalmente aluvial. Los procesos erosivos del río, ahora, hacen que éste entalle su cauce sobre la serie de depósitos estratificados.

La capacidad erosiva del río disminuye a medida que profundiza su cauce al encontrar, progresivamente material más resistente, lo cual hace que su energía se concentre sobre los niveles superiores o más erodables en donde amplía su cauce con facilidad, mientras que su profundidad o entallamiento vertical queda restringida por la presencia de unidades arcillosas masivas estratificadas de alta resistencia a la desintegración y erosión por socavación. El proceso erosivo del río, sobre los tres niveles de los depósitos estratificados de diferente resistencia a la erosión, origina taludes escalonados, los cuales en un principio conforman las orillas del río.

El río progresivamente arrastra arenas y sedimentos finos y los distribuye y reacomoda sobre su lecho y orillas iniciales de acuerdo con la variación de la energía de la corriente, formando así depósitos de barras de arena laterales y de fondo, las cuales ocasional y temporalmente pueden conformar las orillas del río; estas orillas son continuamente modificadas con los cambios de energía de la corriente. En épocas de aguas mínimas y medias, la corriente se

distribuye irregularmente sobre los depósitos del lecho, conformando láminas de agua de espesores muy reducidos.

En épocas en donde el agua sube hasta la base del nivel arenoso de los depósitos estratificados, produce una fuerte y concentrada erosión por socavación originando un retroceso de la orilla en este nivel, ampliando el ancho superior del cauce. En épocas de máximas avenidas el agua sobrepasa la altura de las orillas y ocurre, por consiguiente, el desbordamiento.

3.3 Dinámica del río Magdalena en el municipio de San Pablo

Históricamente el sector urbano del municipio de San Pablo ha actuado como control geológico del río Magdalena. El cauce principal del río Magdalena se encuentra en la orilla derecha del río junto al sector urbano del municipio de Puerto Wilches y recorre la orilla derecha en forma semiparalela al río hasta el sitio de Curumutas; en este sitio el río Magdalena es controlado geológicamente y es desviado en forma diagonal hacia la orilla izquierda justo en dirección al sector urbano del municipio de San Pablo; esta corriente ataca en forma frontal el sector urbano.

Adicionalmente, existe otra corriente del río Magdalena de menor caudal que la principal, la cual es alimentada por el caudal del río Cimitarra y las aguas provenientes del caño de la Rompida; esta corriente pasa frente al municipio de San Pablo en forma paralela a la orilla reuniéndose con la corriente principal del río Magdalena frente al sector urbano de San Pablo.

Estas dos corrientes reunidas forman un thalweg profundo frente a la orilla en San Pablo; este thalweg y las corrientes generadas por este son las responsables de la erosión de los suelos en la orilla del río.

4. Caracterización Geotécnica del Área en Estudio

Se realizó la caracterización geotécnica del área en estudio, realizando trabajos de campo, laboratorio e interpretación de resultados, donde se definió, la topografía, perfil estratigráfico y propiedades mecánicas de los estratos encontrados, de igual manera se realizó un reconocimiento de campo para identificar la problemática presente, puntos críticos y problemas antrópicos que puedan tener influencia en la dinámica presente actualmente sobre la margen afectada.

4.1 Trabajos de campo

Los trabajos de campo se realizaron en tres fases:

- 1- Visita de inspección
- 2- Levantamiento Topográfico
- 3- Localización de sondeos y Exploraciones del subsuelo con ensayos estándar de penetración SPT
- 4- Procesamiento de muestras (se realiza descripción de las muestras recuperadas de los ensayos de exploración al igual que ensayos de caracterización y propiedades mecánicas).
- 5- Procesamiento de información, se procesa la información de campo N spt, aplicando la corrección por energía y confinamiento, para realizar correlaciones de parámetros.
- 6- Definición del modelo geotécnico

4.1.1 Visita de Inspección

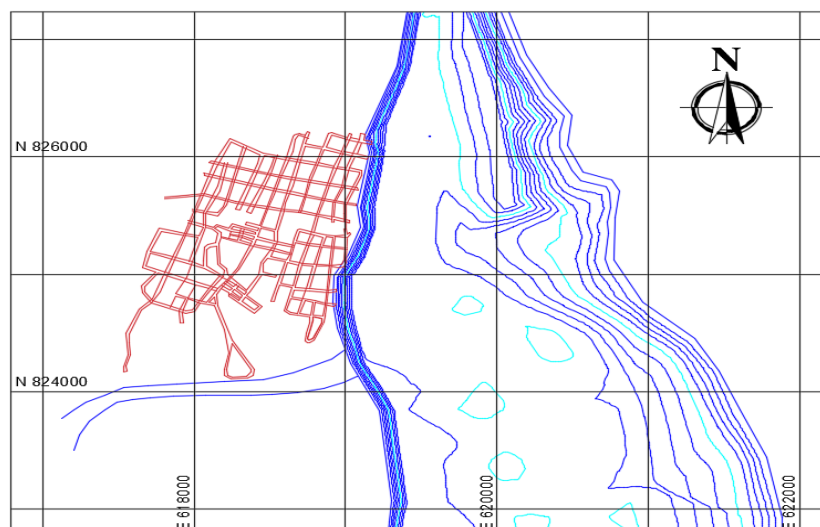
Se realizó una visita al área en estudio, se inspeccionó toda el área, se identificó que el río Magdalena en el sector de San Pablo, está ocasionando erosión, socavación y problemas de inestabilidad sobre la margen izquierda, lugar donde se encuentra localizado el casco urbano de la población de San Pablo, ocasionando afectación que hacen más visibles con los cambios en el nivel del río principalmente sobre la margen occidental del afluente.

4.1.2 Levantamiento Topográfico

Se realizó un levantamiento de topografía donde se utilizó una estación topográfica y un sistema de levantamiento de nueve de puntos para las márgenes del río como complemento de las batimetrías que se realizaron al río, se estableció una superficie con curvas de nivel con precisión cada 1 metro en una longitud de más de 3 kilómetros de río, abarcando todo el margen donde se localiza el pueblo.

Figura 6.

Topografía del sector



4.1.3 Localización de sondeos y exploraciones del subsuelo con ensayos estándar de penetración SPT

Se localizaron 12 sondeos distribuidos en el área de influencia, realizados en dos etapas, inicialmente se hicieron 4 sondeos en la primera etapa y como complemento para establecer nuestro perfil y modelo geotécnico se realizan 8 sondeos adicionales.

Exploraciones realizadas de acuerdo con la metodología y normas colombianas vigentes, para el ensayo estándar de penetración SPT, ensayo de percusión con recuperación de muestra cada 0,5m y profundidades máximas de exploración en un rango de 5 y 8 metros.

Figura 7.

Localización de los sondeos - planta

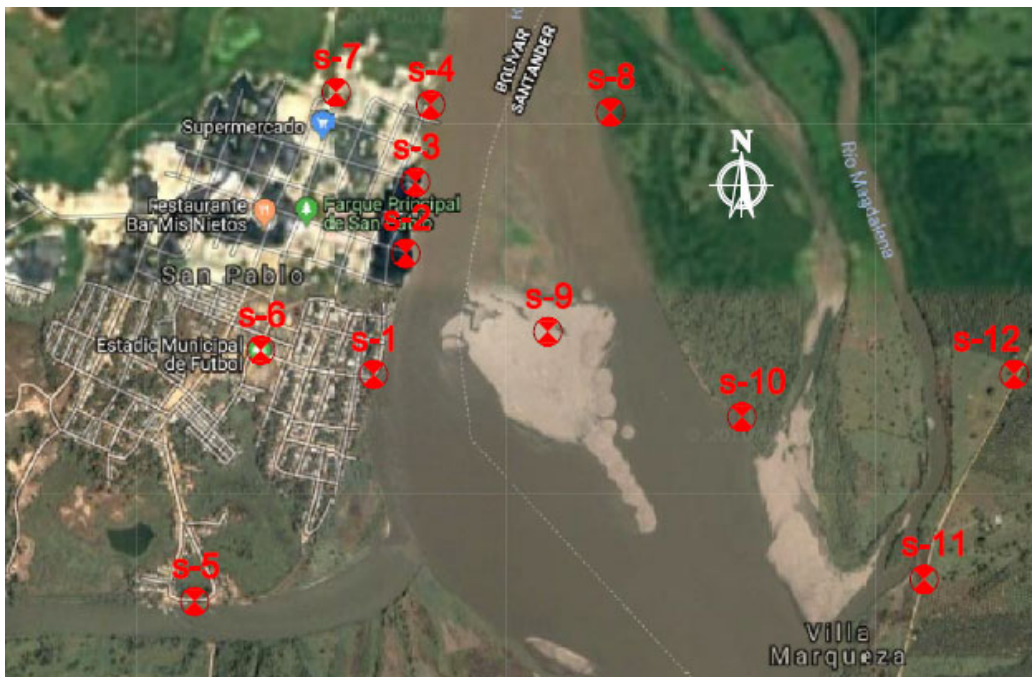


Tabla 2.*Localización de sondeos - coordenadas*

N° Sondeo	Norte	Este	Profundidad (m)
S-1	825071,2596	618987,5263	8
S-2	825568,5699	619092,4256	8
S-3	825859,3083	619116,5074	7
S-4	826176,1771	619161,4134	6
S-5	824112,496	618309,5192	5
S-6	825145,3774	618524,8889	5
S-7	826207,0142	618775,5539	5
S-8	826184,2626	619891,5116	5
S-9	825281,8917	619685,3769	8
S-10	824976,836	620490,4795	6,5
S-11	824357,3102	621264,5068	5
S-12	825207,2937	621586,1548	5,5

A partir de las exploraciones de campo con recuperación de muestra realizada por el método SPT, se obtienen los siguientes resultados.

Tabla 3.

Resultado SPT

Profundidad	N° muestra	N SPT- S1	N SPT- S2	N SPT- S3	N SPT- S4	N SPT- S5	N SPT- S6	N SPT- S7	N SPT- S8	N SPT- S9	N SPT- S10	N SPT- S11	N SPT- S12
0,0 a 0,5	m1	21	5	6	12	9	7	7	10	5	10	5	12
0,5 a 1,0	m2	14	10	3	15	8	9	7	12	6	9	9	12
1,0 a 1,5	m3	17	10	6	16	8	9	8	10	8	10	11	13
1,5 a 2,0	m4	7	11	16	17	12	11	10	9	8	11	11	10
2,0 a 2,5	m5	5	10	22	18	12	10	10	9	9	11	12	10
2,5 a 3,0	m6	4	12	21	9	31	9	12	12	10	12	14	11
3,0 a 3,5	m6	10	9	20	16	33	9	29	13	6	10	12	11
3,5 a 4,0	m8	10	11	17	21	27	24	27	15	6	9	10	11
4,0 a 4,5	m9	10	22	13	23	22	29	22	12	9	10	13	24
4,5 a 5,0	m10	75	13	21	31	23	30	25	12	6	9	15	28
5,0 a 5,5	m11	27	27	19	38	-	-	-	-	9	10	-	31
5,5 a 6,0	m12	9	9	9	36	-	-	-	-	9	11	-	-
6,0 a 6,5	m13	13	13	13	-	-	-	-	-	8	27	-	-
6,5 a 7,0	m14	29	29	29	-	-	-	-	-	27	-	-	-
7,0 a 7,5	m15	33	33	-	-	-	-	-	-	28	-	-	-
7,5 a 8,0	m16	-	-	-	-	-	-	-	-	27	-	-	-

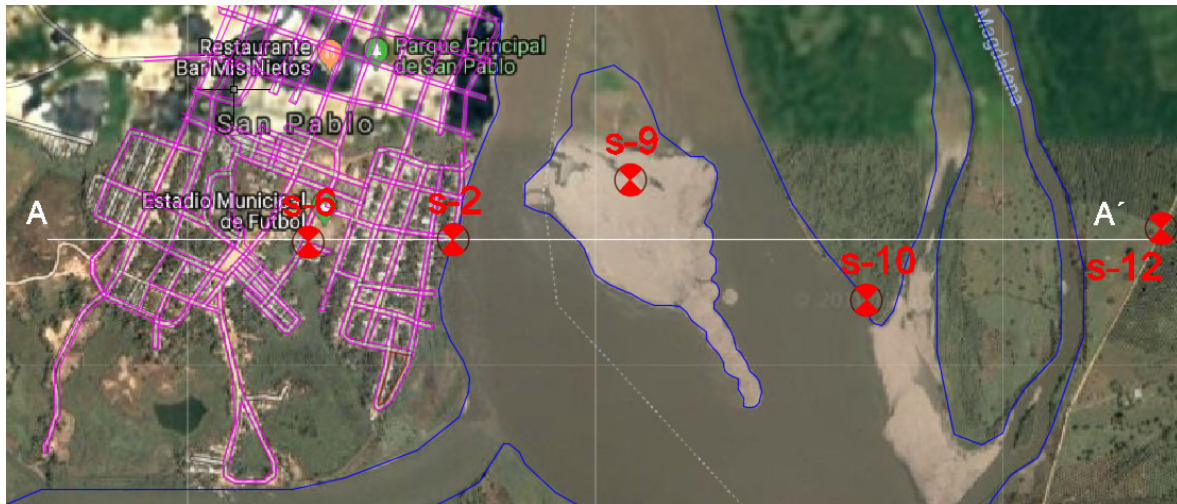
De acuerdo con la inspeccion realizada en la visita de campo, se pudo evidenciar un proceso erosivo y de inestabilidad acentuado en la margen izquierda del río Magdalena con el sector de la calle 12 con carrera 2, sector crítico.

Figura 8.

Proceso erosivo y de inestabilidad acentuado en la margen izquierda del Río Magdalena



Se establece el perfil A-A' crítico de acuerdo con la visita de campo, análisis hidráulicos, definiendo el perfil y sondeo de influencia.

Figura 9.*Perfil crítico A-A'*

Se realizó corrección de $N - SPT$, por energía y confinamiento, al igual que se procesaron los datos en el software libre Novo SPT, para establecer correlación de parámetro mecánicos del perfil.

Tabla 4.*Corrección de N-SPT por energía y confinamiento, sondeo 2*

PROF	N	N60	CN	C	N160
0,5	5	4	1,7	0,75	7
1	10	8	1,69	0,75	14
1,5	10	8	1,63	0,75	13
2	11	8	1,58	0,75	13
2,5	10	8	1,53	0,75	12
3	12	9	1,48	0,75	13
3,5	9	7	1,44	0,75	10

PROF	N	N60	CN	C	N160
4	11	9	1,39	0,79	13
4,5	22	18	1,36	0,83	24
5	13	11	1,32	0,86	15
5,5	12	11	1,28	0,88	14
6	27	24	1,15	0,9	28
6,5	29	27	1,13	0,92	31
7	29	27	1,11	0,93	30
7,5	33	31	1,09	0,94	34
8	32	30	1,08	0,95	32

Figura 10.

Correlaciones sondeo 2, corrección de N, ángulo de fricción.

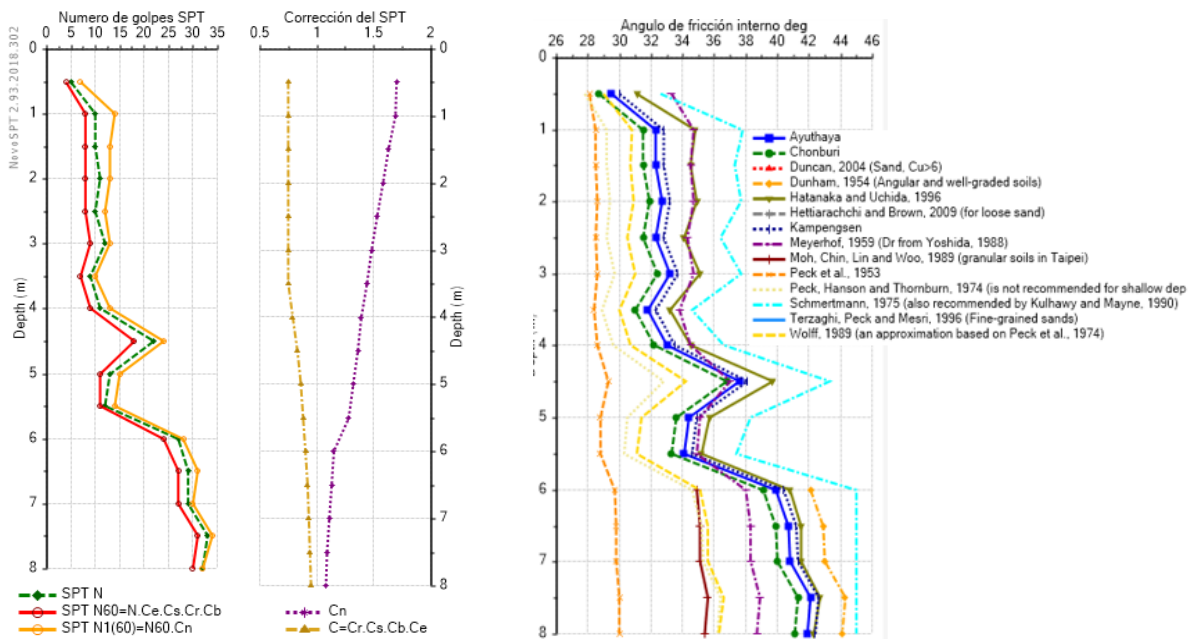


Figura 11.

Correlaciones sondeo 2, resistencia al corte no drenado, peso unitario.

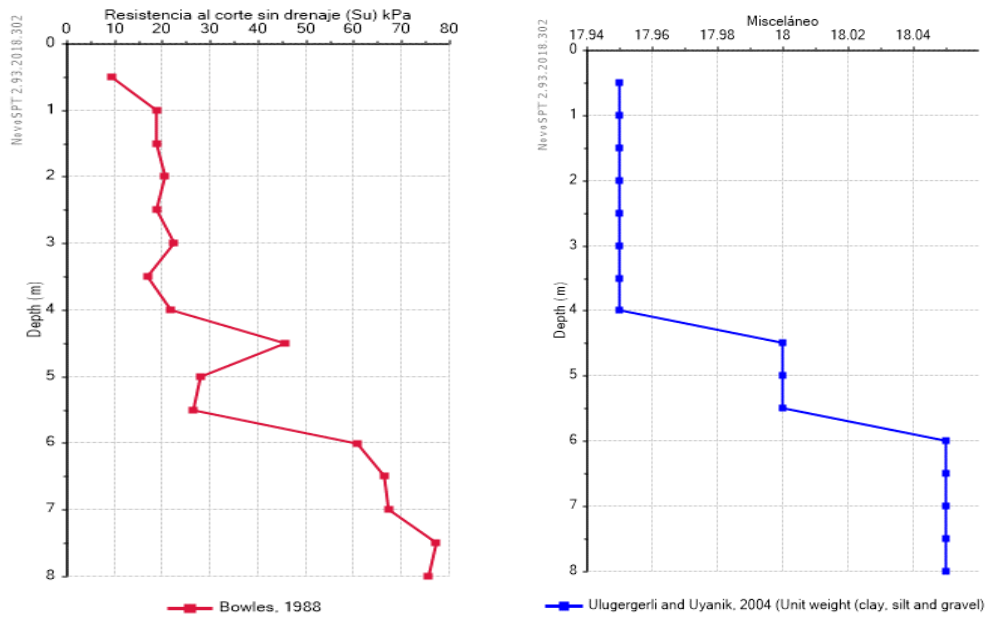


Tabla 5.

Corrección de N-SPT por energía y confinamiento, sondeo 6

PROF	N	N60	CN	C	N160
0,5	7	5	1,7	0,75	9
1	12	9	1,69	0,75	15
1,5	9	7	1,63	0,75	11
2	11	8	1,58	0,75	13
2,5	10	8	1,53	0,75	12
3	12	9	1,48	0,75	13
3,5	25	19	1,44	0,75	27
4	24	19	1,39	0,79	26
4,5	29	24	1,21	0,83	29
5	36	31	1,19	0,86	37

Figura 12.

Correlaciones sondeo 6, corrección de N, ángulo de fricción.

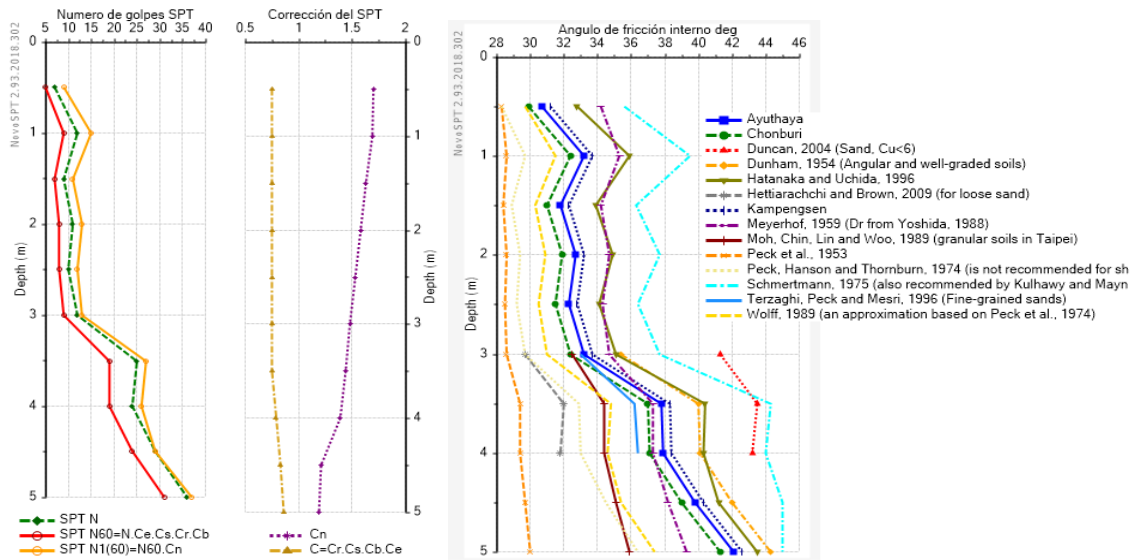


Figura 13.

Correlaciones sondeo 6, resistencia al corte no drenado, peso unitario.

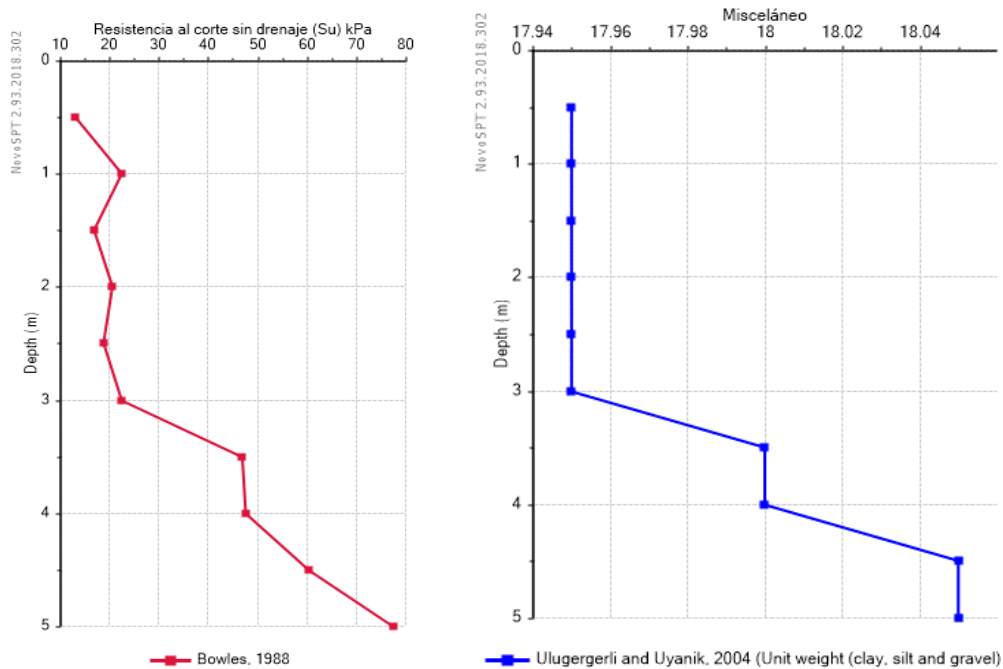


Tabla 6.*Corrección de N-SPT por energía y confinamiento, sondeo 9*

PROF	N	N60	CN	C	N160
0.5	5	4	1.7	0.75	7
1	6	4	1.69	0.75	7
1.5	10	8	1.63	0.75	13
2	10	8	1.58	0.75	13
2.5	9	7	1.53	0.75	11
3	13	10	1.48	0.75	15
3.5	12	9	1.44	0.75	13
4	14	11	1.39	0.79	15
4.5	13	11	1.36	0.83	15
5	12	10	1.32	0.86	13
5.5	12	11	1.28	0.88	14
6	20	18	1.25	0.9	22
6.5	24	22	1.21	0.92	27
7	25	23	1.18	0.93	27
7.5	26	24	1.09	0.94	26
8	36	34	1.07	0.95	36

Figura 14.

Correlaciones sondeo 9, corrección de n, ángulo de fricción.

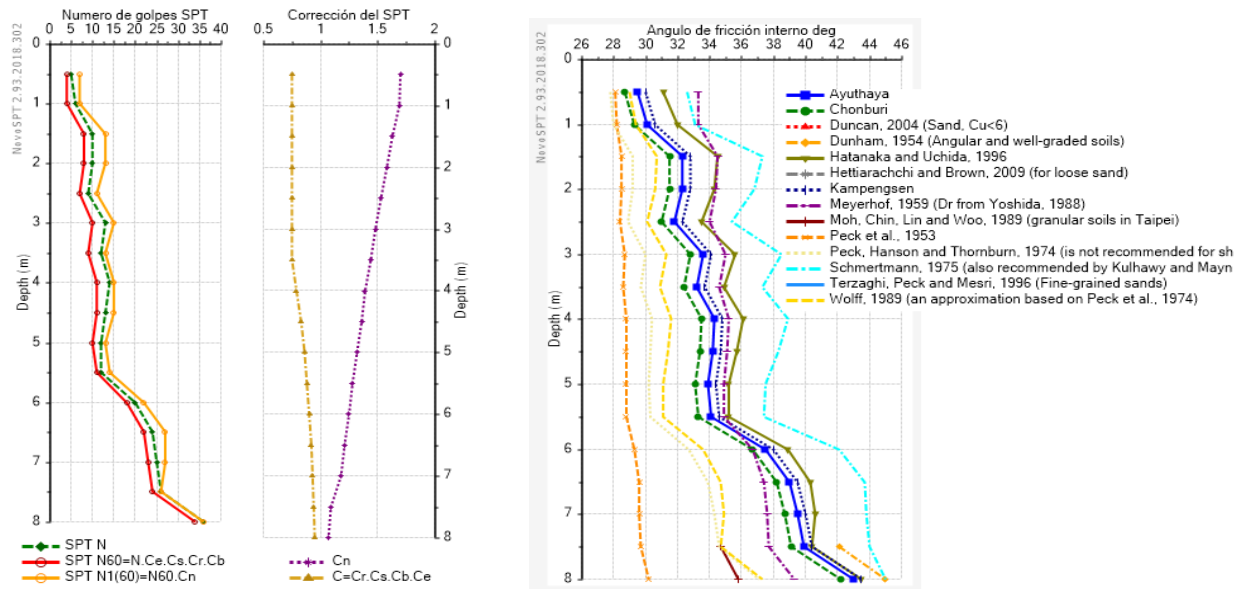


Figura 15.

Correlaciones sondeo 9, resistencia al corte no drenado, peso unitario.

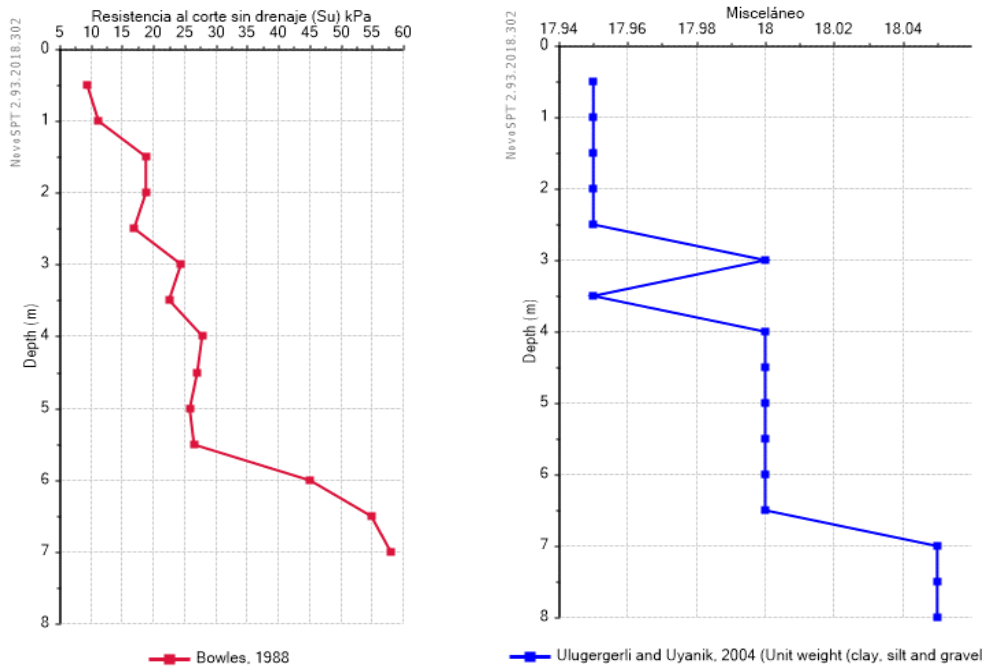


Tabla 7.

Corrección de N-SPT por energía y confinamiento, sondeo 10

PROF	N	N60	CN	C	N160
0.5	10	8	1.7	0.75	14
1	9	7	1.69	0.75	12
1.5	10	8	1.63	0.75	13
2	11	8	1.58	0.75	13
2.5	11	8	1.53	0.75	12
3	12	9	1.48	0.75	13
3.5	10	8	1.44	0.75	12
4	9	7	1.39	0.79	10
4.5	10	8	1.36	0.83	11
5	9	8	1.32	0.86	11
5.5	23	20	1.28	0.88	26
6	25	23	1.24	0.9	29
6.5	27	25	1.13	0.92	28

Figura 16.

Correlaciones sondeo 10, corrección de n, ángulo de fricción.

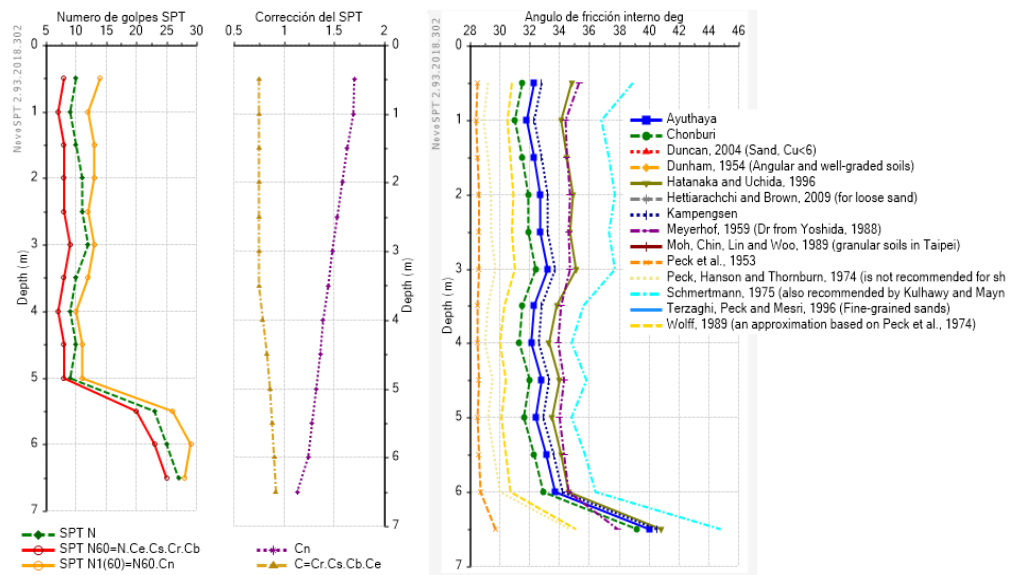


Figura 17.

Correlaciones sondeo 10, resistencia al corte no drenado, peso unitario.

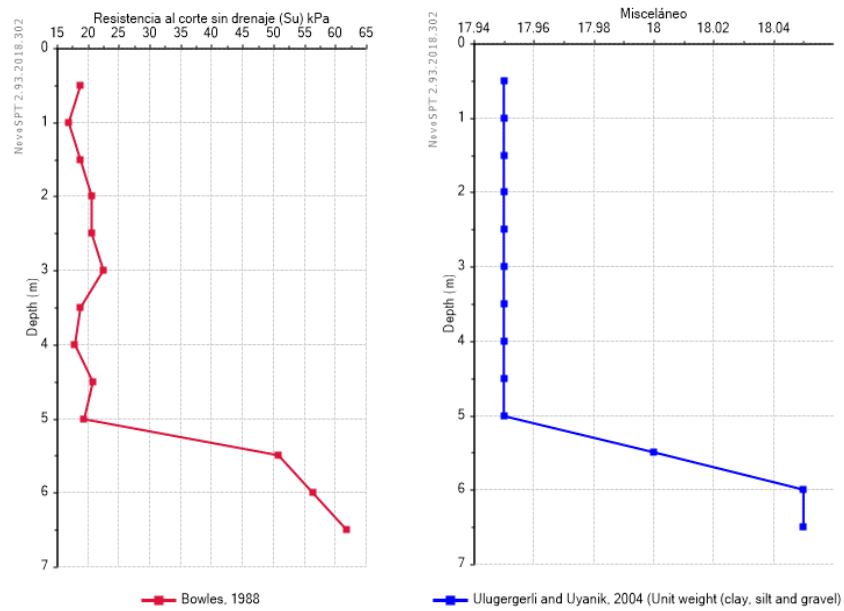


Tabla 8.

Corrección de N-SPT por energía y confinamiento, sondeo 12

PROF	N	N60	CN	C	N160
0.5	12	9	1.7	0.75	15
1	12	9	1.69	0.75	15
1.5	13	10	1.63	0.75	16
2	10	8	1.58	0.75	13
2.5	10	8	1.53	0.75	12
3	11	8	1.48	0.75	12
3.5	11	8	1.44	0.75	12
4	22	17	1.39	0.79	24
4.5	24	20	1.35	0.83	27
5	25	22	1.3	0.86	29
5.5	27	24	1.21	0.88	29

Figura 18.

Correlaciones Sondeo 12, corrección de n, ángulo de fricción.

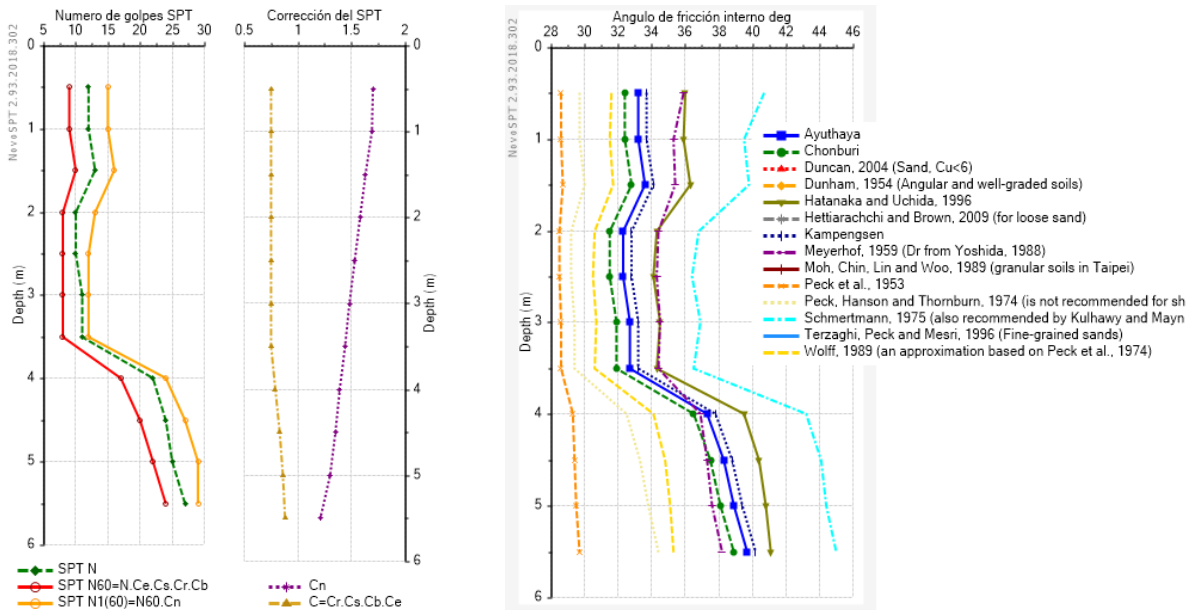
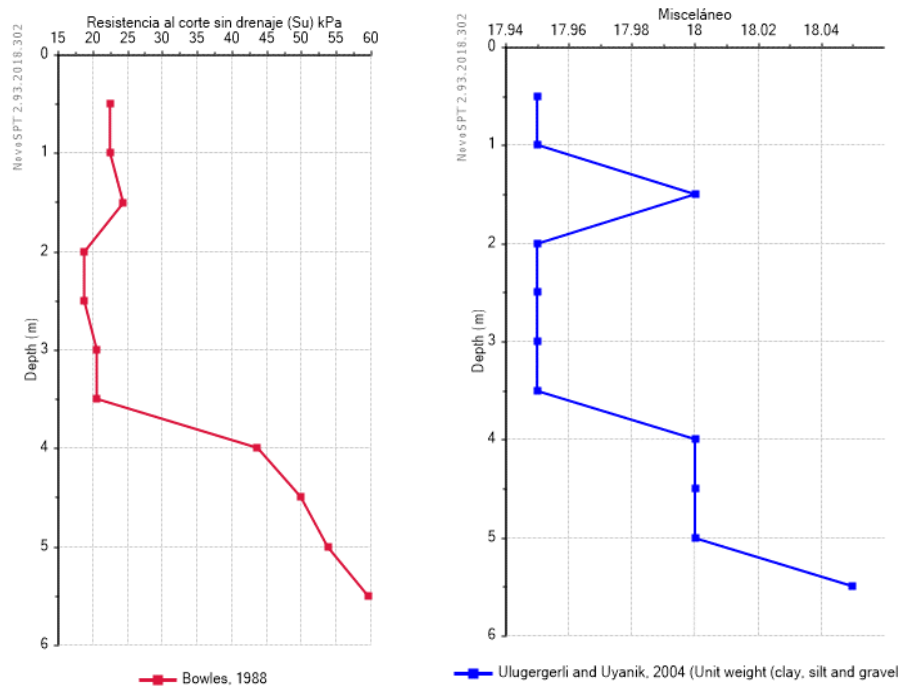


Figura 19.

Correlaciones sondeo 12, resistencia al corte no drenado, peso unitario



4.1.4 Ensayos de laboratorio

Se realizaron ensayos de caracterización, humedad, límite líquido, límite plástico, granulometría, clasificación SUCS, al igual que ensayos de resistencia mecánica, corte directo CD y compresión inconfiada, a las muestras de los sondeos 2,6,9,10 y 12.

Tabla 9.*Ensayos de laboratorio*

Sondeo	Muestra	Humedad	L.Líquido	L.Plástico	G.Metría	Cor Di	Compre I
s-2	m2	x	x	x	x	x	-
s-2	m11	x	x	x	x	-	x
s-2	m15	x	x	x	x	x	-
s-6	m3	x	x	x	x	x	-
s-6	m6	x	x	x	x	-	x
s-6	m10	x	x	x	x	-	-
s-9	m1	x	x	x	x	x	
s-9	m13	x	x	x	x	-	x
s-9	m16	x	x	x	x	x	-
s-10	m2	x	x	x	x	-	-
s-10	m7	x	x	x	x	x	-
s-10	m14	x	x	x	x	-	x
s-12	m2	x	x	x	x	x	-
s-12	m8	x	x	x	x	-	x
s-12	m9	x	x	x	x	-	x

Sondeo	Muestra	Cohesión	A. Fricción
S-2	M2	3	35
S-2	M15	12	36
S-6	M3	3,3	33
S-9	M1	2,7	30
S-9	M16	10,9	37
S-10	M7	3,1	32,8
S-12	M2	4,7	34

Sondeo	Muestra	qu	Cu
S-2	M11	13,2	6,6
S-6	M6	5,6	2,8
S-9	M13	12,3	6,15
S-10	M14	4,8	2,4
S-12	M8	8,3	4,15
S-12	M9	11,4	5,7

Sondeo	Muestra	%Fino	L.Liquido	L.Plástico	I.Plástico	S.U.C.S
S-2	M2	14,9	24,7	15,3	9,4	SC
S-2	M11	46,9	24,8	26,5	8,3	SM
S-2	M15	25,3	25,2	15,6	9,6	GC
S-6	M3	44,2	34,6	29,4	5,2	SM
S-6	M6	63,9	45,2	21,5	23,7	CL
S-6	M10	37,9	24,7	20,8	13,9	SC
S-9	M1	48,7	32,1	19,5	12,6	SC
S-9	M13	21,7	25,4	15,3	10,1	SC
S-9	M16	83,5	41,1	27,6	13,5	ML

Sondeo	Muestra	%Fino	L.Liquido	L.Plástico	I.Plástico	S.U.C.S
S-10	M2	55,2	28,6	17,3	11,3	CL
S-10	M7	15,4	19,8	16,1	3,7	SC
S-10	M14	26,7	27,8	13,6	14,2	GC
S-12	M2	21,7	25,2	22,1	3,1	SM
S-12	M8	22,6	24,1	14,5	9,6	GC
S-12	M9	25,4	24,7	16,4	8,3	GC

Material	Ángulo De Fricción	Cohesión (KN/M ²)	Peso Unitario (KN/M ³)
1	35	3	18
2	35	8	19
3	37	12	19

4.2 Perfil estratigráfico

Se estableció el perfil estratigráfico para el corte A-A', perfil crítico identificado en visita de campo, donde se observaron los mayores problemas de inestabilidad y erosión. Se analizó la información de 5 sondeos que se encuentran localizados sobre su alineamiento, al igual que los resultados de los ensayos de campo N-spt, correlaciones y ensayos de laboratorio realizados a las muestras semi alteradas recuperadas de las exploraciones, para lo que se estableció en el siguiente perfil.

Figura 20.

Perfil estratigráfico

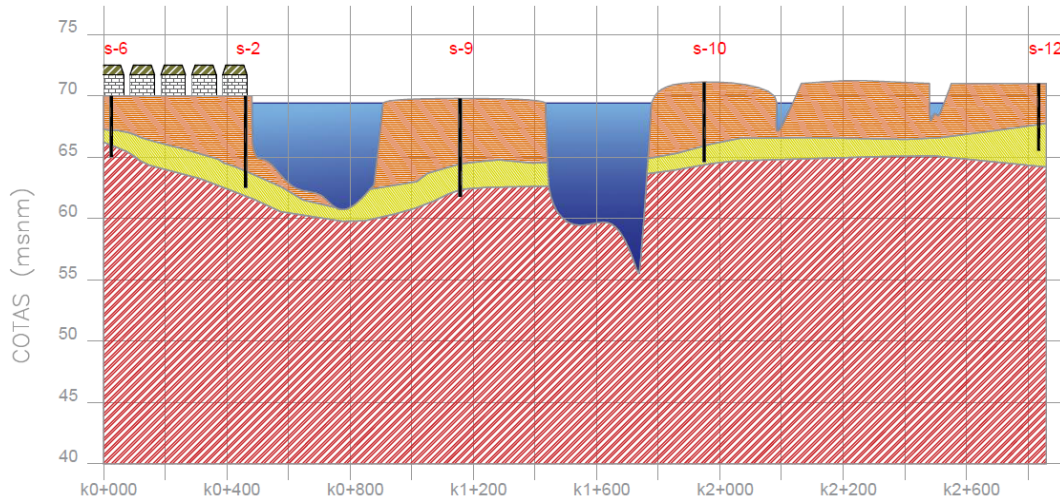


Tabla 10.

Perfil estratigráfico

Descripción	Espesor	SUCS
Suelo orgánico compuesto por limo arenoso, color marrón y negro, con materia orgánica y raíces, suelto, húmedo, permeable y poco resistente.	0,5 metros	ML
Suelo aluvial perteneciente a la formación Real, compuesto por arena arcillo limosas, color marrón claro, algo plástica, densa, resistente y saturada, con presencia de gravas redondeadas finas.	3 A 6 metros	SM-SC
Suelo aluvial perteneciente a la formación Real, compuesto por arena arcillosa gravosa, color rojo amarillo marrón, algo plástica, densa, resistente y saturada, presencia de gravas redondeadas, finas a gruesas.	2 A 4 metros	SC
Suelo aluvial perteneciente a la formación Real, compuesto por gravas medias a gruesas, subredondeadas, en matriz arcillosa, plásticas, color rojo, saturadas, algo permeables, matriz dura y resistente.	>10 metros	GC

La presencia de material granular indica que en la zona existió una corriente de gran energía que permitió el depósito de material grueso, lo que implica una evidencia de altas corrientes, y posibles inundaciones del Magdalena.

5. Análisis Hidráulico y De Socavación

Se realizó el análisis hidráulico y de socavación, utilizando el software HET-RAS, los modelos realizados consideran la topografía del área en estudio, las batimetrías del río Magdalena en el municipio de San Pablo-Bolívar, al igual que los datos de hidráulicos y caudales obtenidos de estudios previos realizados al río Magdalena, los cuales son de dominio público por ser este el afluente más importante de Colombia. Se hizo un análisis con el fin de realizar el modelo hidráulico del río Magdalena en el sector en estudio, para obtener de él los parámetros hidráulicos específicos, cotas de inundación, velocidad lateral, de fondo, tamaño de partículas y cotas de socavación, información necesaria construir los modelos geotécnicos.

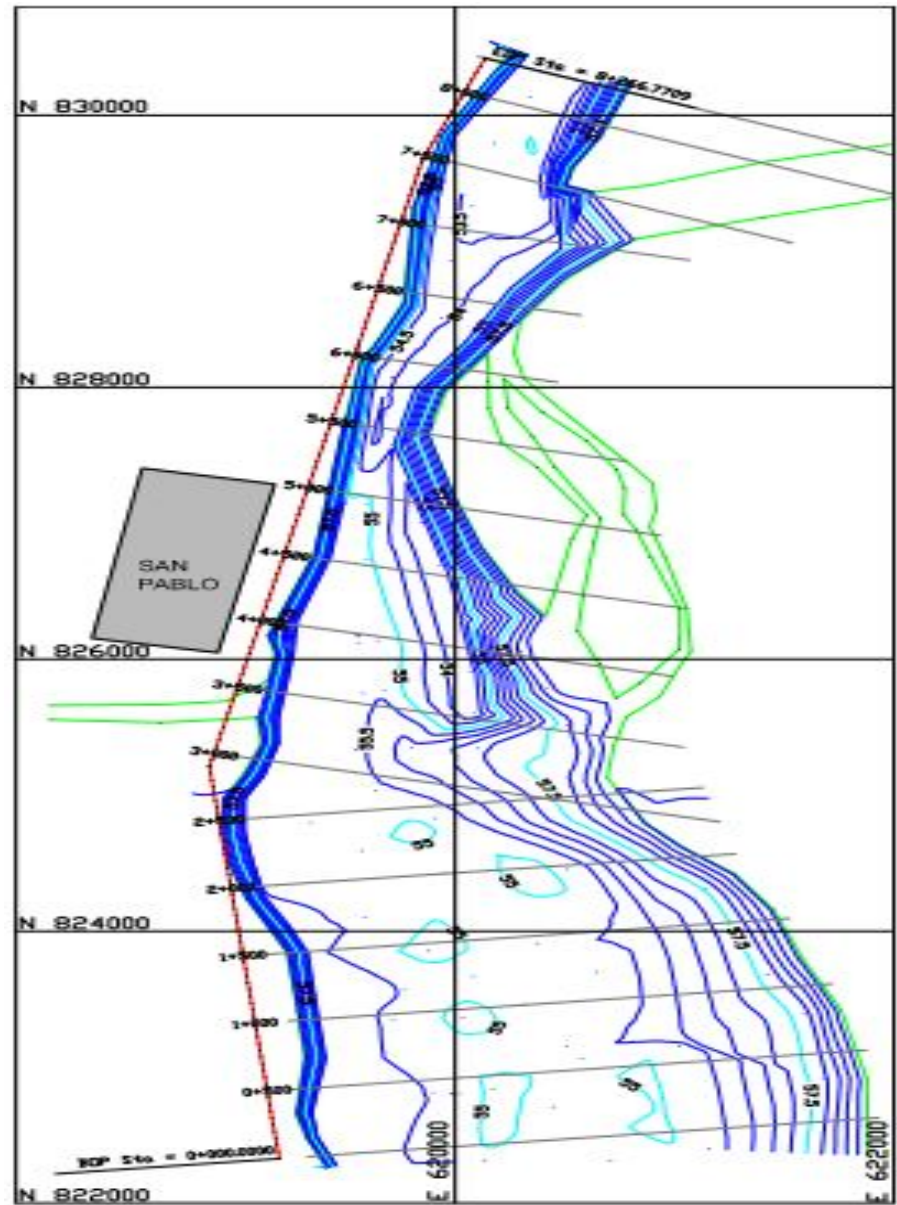
5.1 Batimetría

Se analizaron 18 secciones transversales a lo largo del Río Magdalena en el municipio de San Pablo Bolívar, donde se evidencia la variación de la profundidad del río y las áreas de posible socavación junto al muelle del pueblo.

Se hizo una inspección detallada de cada una de las secciones con el fin de elegir la sección crítica para realizar los modelamientos. Ver Figura 21.

Figura 21.

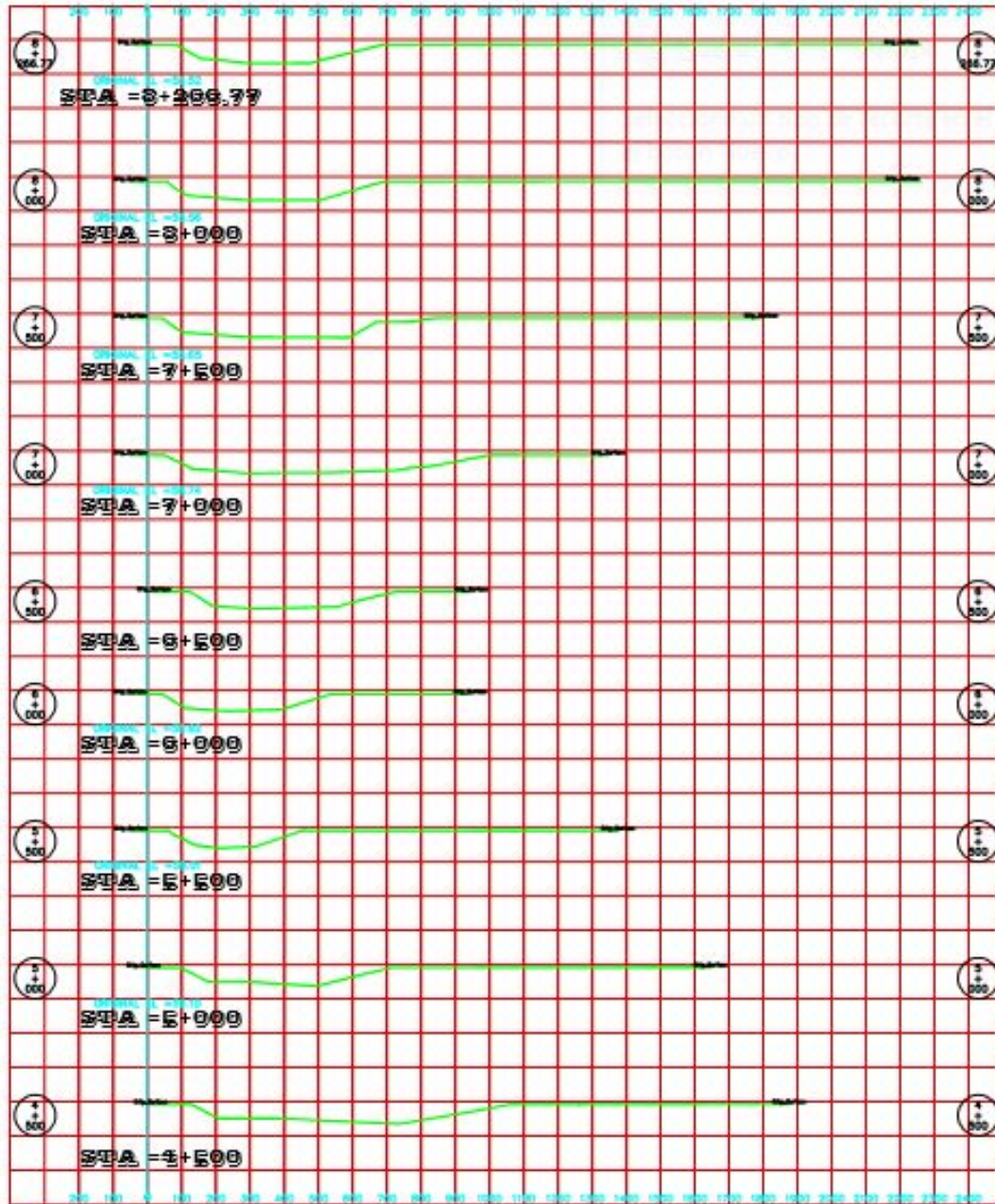
Batimetría sobre el río Magdalena en San Pablo, Bolívar



Nota: Fernán González

Figura 22.

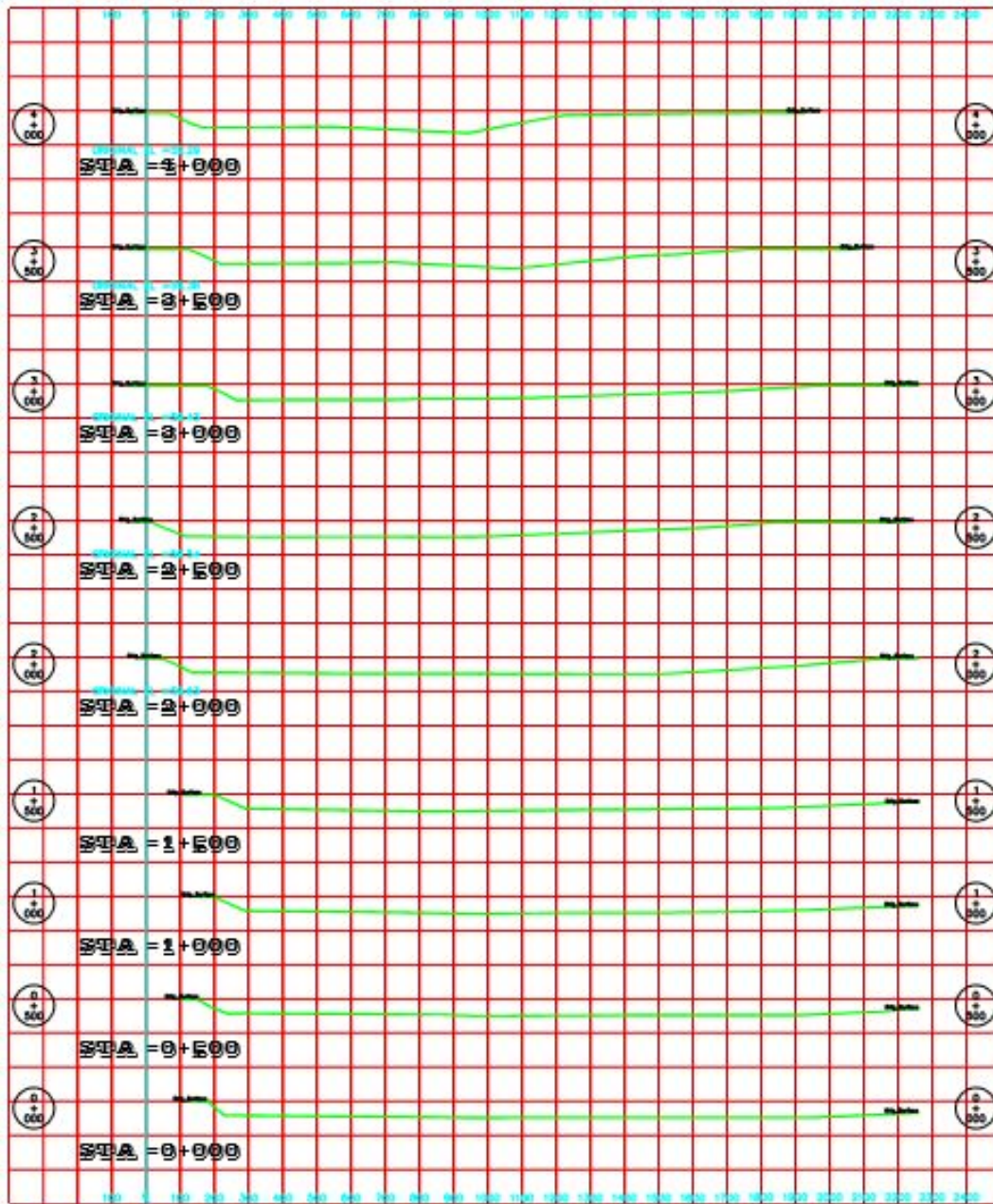
Secciones transversales río Magdalena abscisa K 4+500-K 8+266.77



Nota: Fernán González

Figura 23.

Secciones transversales río Magdalena abscisa K 0+000-K4+000



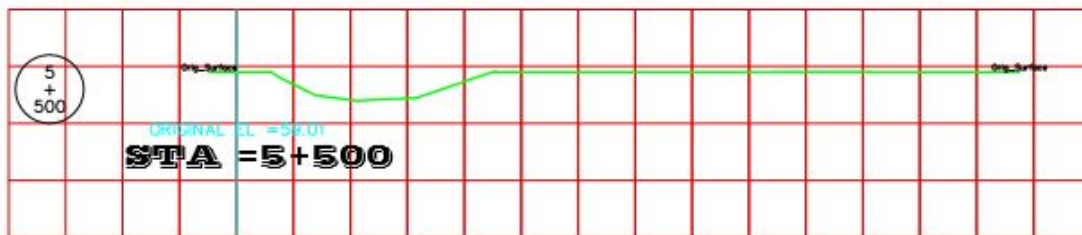
Nota: Fernán González

Se determinó la sección crítica teniendo en cuenta el área de la misma. A medida que el área de la sección transversal es menor, la altura de la lámina de agua será mayor, lo cual genera un aumento en la velocidad de arrastre y una mayor presión sobre el cauce (socavación).

Se consideró como sección crítica la abscisa Km 5+500, ver Figura 24.

Figura 24.

Sección transversal crítica río Magdalena abscisa K 5+500



Nota: Fernán Gonzalez

5.2 Caudales del río Magdalena en el municipio de San Pablo, Bolívar

El caudal de estudio se calcula en base a la tesis de grado “Curvas de rendimiento de caudales máximos instantáneos asociados a diferentes períodos de retorno en Colombia, caso de estudio río Magdalena”

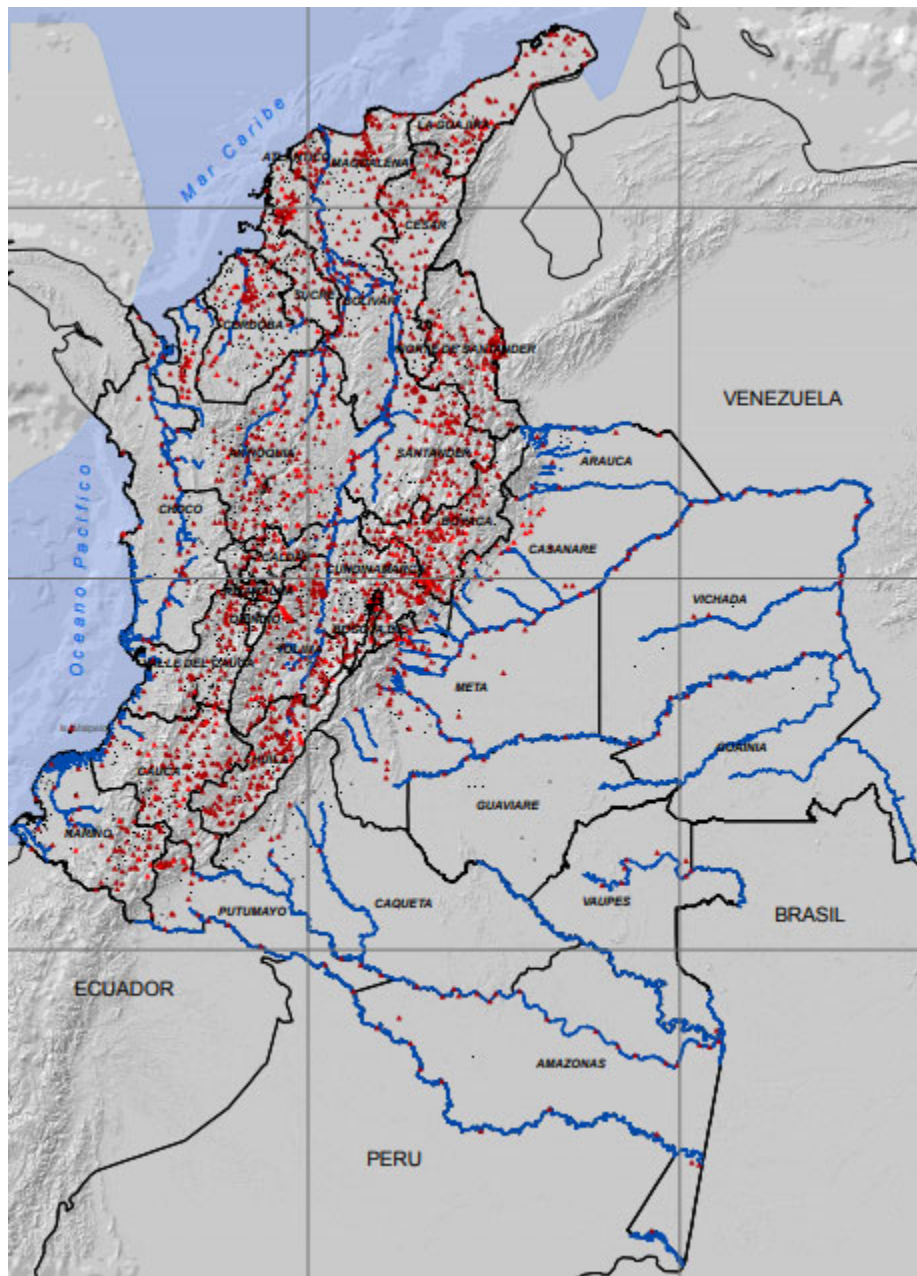
Se realizó una búsqueda de información en el IDEAM, (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales), para realizar una verificación y validación de información del estudio base a utilizar, se puede establecer que para la corriente del río Magdalena, se encuentran localizadas 20 estaciones activas, de categoría LG (Limnigraficas), localizadas a lo largo del afluente situadas en 10 departamentos, por donde pasa el río Magdalena.

Tabla 11.*Caudales del río Magdalena en el municipio de San Pablo, Bolívar*

Código	Nombre	Categ.	Estado	Corr	Depto	Mpio
25027020	El Banco Automática	LG	ACT	Magdalena	Magdalena	El Banco
29047070	San Pedrito Automática	LG	ACT	Magdalena	Atlántico	Suan
29047080	Darcena Barranquil	LG	ACT	Magdalena	Atlántico	Barranquilla
21017030	Cascada Simón Boli	LG	ACT	Magdalena	Huila	San Agustín
21017040	Salado Blanco	LG	ACT	Magdalena	Huila	Elías
21017060	Magdalena La	LG	ACT	Magdalena	Huila	San Agustín
21027010	Pericongo	LG	ACT	Magdalena	Huila	Altamira
21047010	Pte Balseadero	LG	ACT	Magdalena	Huila	Agrado
21097070	Pte Santander	LG	ACT	Magdalena	Huila	Neiva
21097120	Esperanza	LG	ACT	Magdalena	Huila	Palermo
21137050	Angostura Rio	LG	ACT	Magdalena	Tolima	Natagaima
23097030	Pto Berrio Automática	LG	ACT	Magdalena	Antioquia	Puerto Berrio
23157030	Barrancabermeja	LG	ACT	Magdalena	Santander	Barrancabermeja
23207040	San Pablo Rio Magdalena	LG	ACT	Magdalena	Bolívar	San Pablo
23217080	Gamarra Automática	LG	ACT	Magdalena	Cesar	Gamarra
21137010	Purificación Autom	LG	ACT	Magdalena	Tolima	Purificación
21237010	Nariño Autom	LG	ACT	Magdalena	Cundinamarca	Nariño
21237020	Arrancaplumas	LG	ACT	Magdalena	Cundinamarca	Guaduas
23037010	Pto Salgar Autom	LG	ACT	Magdalena	Cundinamarca	Puerto Salgar
23097040	Pto Inmarco	LG	ACT	Magdalena	Antioquia	Puerto Nare

Figura 25.

Localización estaciones



Nota: IDEAM

Las dos estaciones más próximas al municipio de San Pablo, Bolívar, de las registradas en el IDEAM son la estación Puerto Berrio, y Barrancabermeja. A continuación, se presenta la localización de estas dos estaciones en la Figura 25.

Estación Puerto Berrio

Estación del IDEAM, código 23097030, de nombre PTO BERRIO AUTOMATICA, clasificada como LG, estado activo localizado sobre la corriente del río Magdalena, en el departamento de Antioquia, instaurada el 15 de enero de 1936.

Tabla 12.

Localización - Estación Puerto Berrio

Nombre	Latitud	Longitud	Departamento	Municipio
Pto Berrio	6°29'6.50"N	74°24'4.20"O	Antioquia	Puerto Berrio

ESTACIONES			COORDENADAS		DISTANCIA	DISTRIBUCIÓN GEV METODO DE MOMENTOS PONDERADOS						
CODIGO	TE	ESTACION	X	Y	KM	Caudales máximos asociados a diferentes periodos de retorno (m ³ /s)						
						TR 2,33	TR 5	TR 10	TR 25	TR 50	TR 100	TR 500
23097030	LG	PTO BERRIO	-74,4012	6,485139	732,58	4019,6	4742,6	5390,7	6303,4	7054,93	7862,66	10099

Estación San Pablo

Estación del IDEAM, código 23207040, de nombre SAN PABLO MAGDALENA, clasificada como LG, estado activo localizado sobre la corriente del río Magdalena, en el departamento de Bolívar, instaurada el 15 de Julio de 1977.

Tabla 13.*Localización - Estación San Pablo*

Nombre	Latitud	Longitud	Departamento	Municipio
San Pablo Magdalena	7°28'49.2"N	73°55'6.8"O	Bolívar	San Pablo

ESTACIONES			COORDENADAS		DISTANCIA	DISTRIBUCIÓN GEV METODO DE MOMENTOS PONDERADOS						
CODIGO	TE	ESTACION	X	Y	KM	Caudales máximos asociados a diferentes periodos de retorno (m ³ /s)						
						TR 2,33	TR 5	TR 10	TR 25	TR 50	TR 100	TR 500
23207040	LG	SAN PABLO	7,48033333	-73,9185556	946	5032,2	5951,52	6787,99	7979,22	8966,17	10028,9	12981,3

Estación Barrancabermeja

Es una estación del IDAM, código 23157030, de nombre BARRANCABERMEJA, clasificada como LG, estado activo localizado sobre la corriente del río Magdalena, en el departamento de Santander, instaurada el 15 de junio de 1936.

Tabla 14.*Localización - Estación Barrancabermeja*

Nombre	Latitud	Longitud
Barrancabermeja	7° 3'36.70"N	73°52'33.60"O

Figura 26.

Cuenca río Magdalena-Puerto Berrio



Nota: Google Earth

La cuenca del río Magdalena tiene un área estimada hasta la estación Pto. Berrio de 74.610 Km².

Figura 27.

Cuenca río Magdalena-Barrancabermeja



Nota: Google Earth

La cuenca del río Magdalena tiene un área estimada hasta la estación BARRANCABERMEJA de 95.003 Km².

5.3 Clasificación del Cauce

Figura 28.

Río Magdalena, San Pablo, Bolívar



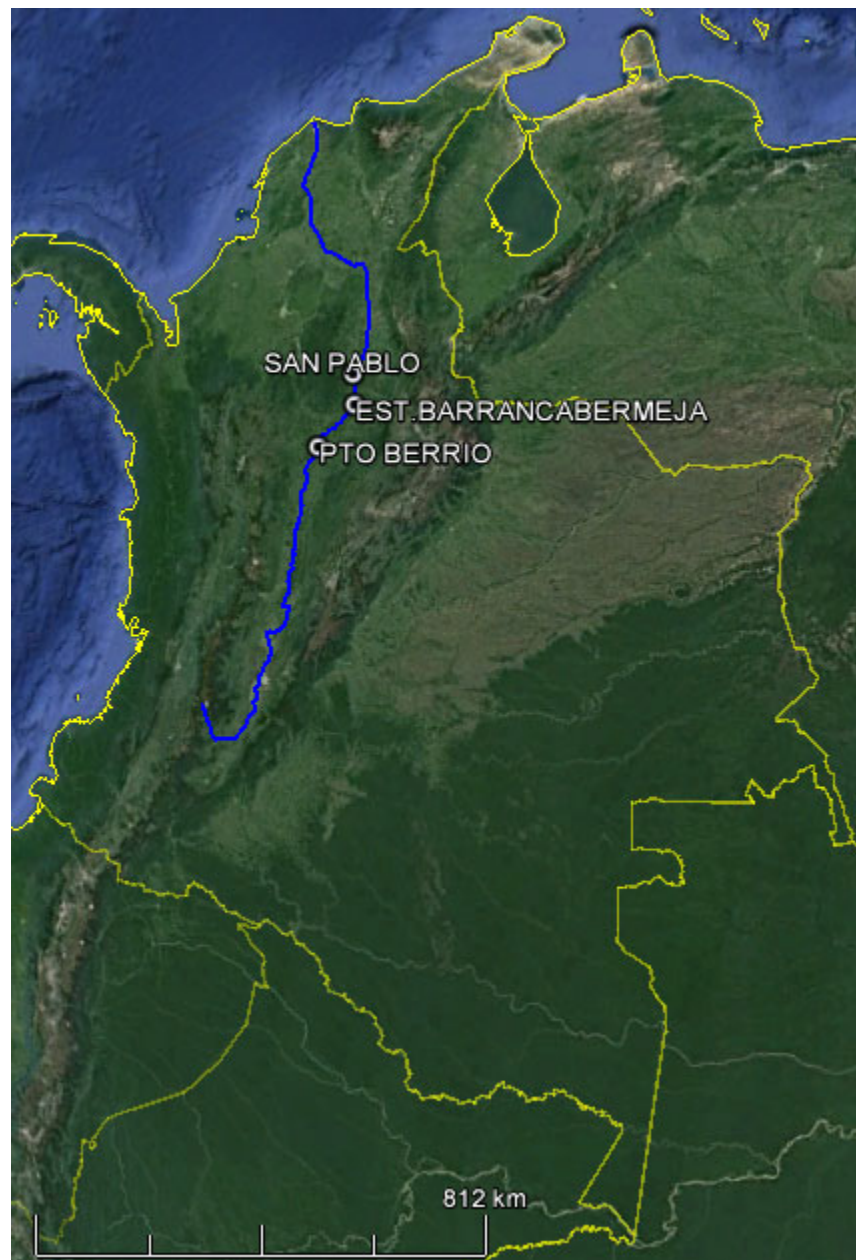
Nota: Google Earth

San Pablo se encuentra localizado sobre la margen izquierda del río Magdalena, pendiente aproximada de $s=0.001$ y longitud del río desde su nacimiento 946 Km. Ver Figura 29

Figura .

Figura 29.

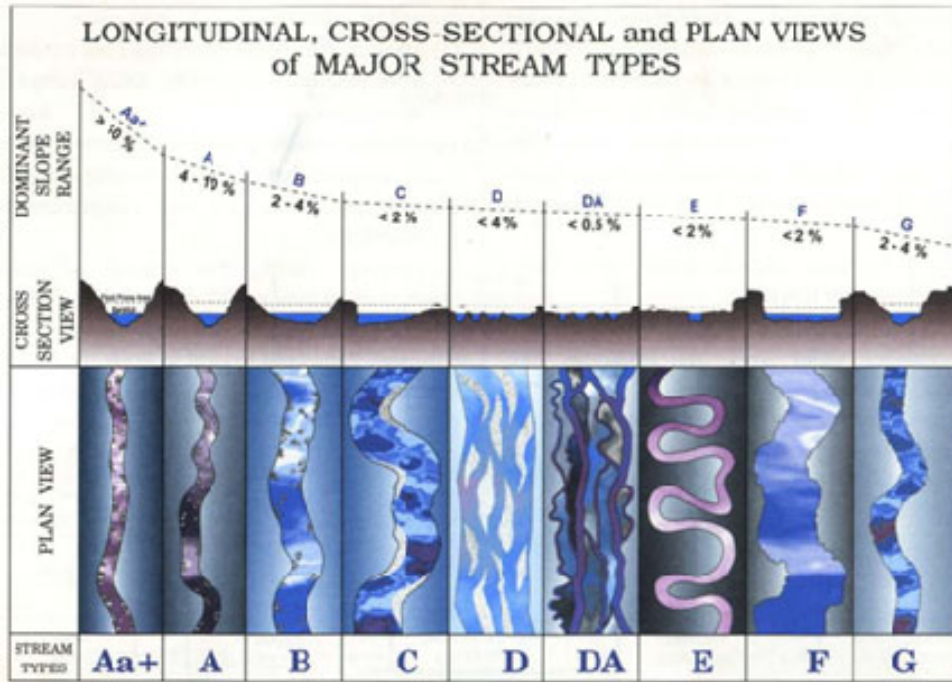
Trazado río Magdalena



Nota: Google Earth

Figura 30.

Vistas longitudinales, transversales y en planta de los principales tipos de corriente



Stream TYPE	A	B	C	D	DA	E	F	G
Bedrock	1							
Boulder	2							
Cobble	3							
Gravel	4							
Sand	5							
Silt-Clay	6							
Enticmet.	< 1.4	1.4 - 2.2	> 2.2	n/a	> 4.0	> 2.2	< 1.4	< 1.4
WD Ratio	< 12	> 12	> 12	> 40	< 40	< 12	> 12	< 12
Sinuosity	1 - 1.2	> 1.2	> 1.2	n/a	variable	> 1.5	> 1.2	> 1.2
H ₀ Slope	.04-.099	.02-.039	< .02	< .04	< .005	< .02	< .02	.02-.039

Nota: Rosgen Geomorphic Channel Design

La clasificación para el tipo de corriente del río Magdalena San Pablo, Bolívar es la C: Secuencia de rápidos-remansos (Riffle-pool). Meandros, point bars, planicies de inundación bien desarrolladas, márgenes estables o inestables, el suelo que más destacado en ese tipo de corriente es el 6 que pertenece a limos y arcillas.

5.4 Caudal de análisis

El caudal de estudio se calcula en base a la tesis de grado “Curvas de rendimiento de caudales máximos instantáneos asociados a diferentes períodos de retorno en Colombia, caso de estudio río Magdalena” la cual determinó las ecuaciones características de cada uno de los caudales máximos a diferentes períodos de retorno, en función de a la distancia como se observa a continuación:

Tabla 15.

Distancias y caudales máximos a diferentes períodos de retorno

Periodo de Retorno	Ecuación Característica	R ²
TR 2,33	$Q = 4,7444d + 543,97$	0,8497
TR 5	$Q = 5,6645d + 592,9$	0,8234
TR 10	$Q = 6,5471d + 594,43$	0,8459
TR 25	$Q = 7,8522d + 551,04$	0,8514
TR 50	$Q = 8,9553d + 494,46$	0,8537
TR 100	$Q = 10,15d + 426,97$	0,8531
TR 500	$Q = 13,505d + 205,55$	0,8331

Nota: la tesis de grado “Curvas de Rendimiento de Caudales Máximos Instantáneos Asociados a Diferentes Periodos de Retorno en Colombia, Caso de Estudio Rio Magdalena”

Donde Q es el caudal máximo en m³/s y d la distancia desde el nacimiento del río al área estudiada en Km.

Dada la localización del área de estudio se tienen los siguientes caudales para diferentes períodos de retorno.

En la Tabla 16, se muestran los caudales para los diferentes periodos de retorno, que se esperan se puedan presentar en san pablo localizado a 946 km desde el nacimiento del rio.

Tabla 16.

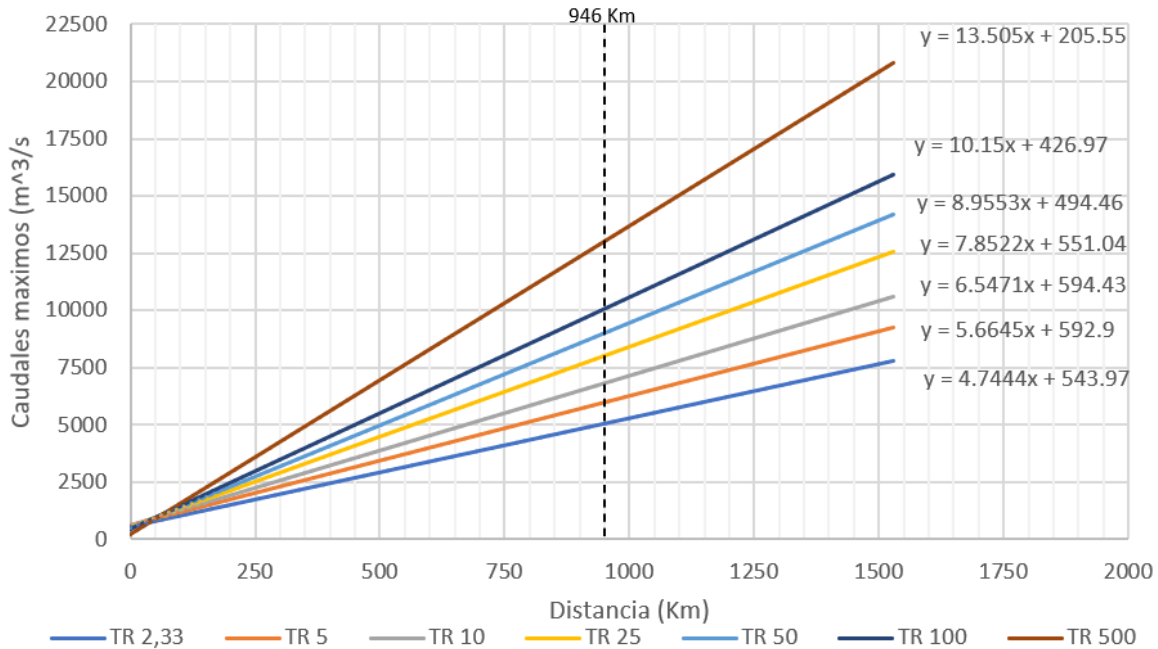
Caudales máximos a diferentes períodos de retorno

Año	Caudal esperado [m ³ /s]
2,33	5032.17
5	5951.52
10	6787.99
25	7979.22
50	8966.17
100	10028.87
500	12981.28

En la Figura 31, se presenta el incremento a lo largo de todo el recorrido del río”.

Figura 31.

Caudales máximos de diseño para diferentes periodos de retorno



5.5 Análisis hidráulico

Teniendo en cuenta su versatilidad, su amplia utilización a nivel mundial, y las facilidades computacionales y de manejo del programa, se seleccionó el modelo HEC-RAS (River Analysis System) para realizar el análisis de las condiciones de flujo del río Magdalena en el sector de San Pablo.

El modelo fue desarrollado por el U.S. Army Corps of Engineers (Hydrologic Engineering Center), del Ejército de los Estados Unidos de América.

El modelo hidráulico consta de dos elementos fundamentales, la geometría del cauce y las condiciones del flujo (condiciones de contorno y caudales), a través de un modelo numérico unidimensional, que resuelve la ecuación de la energía.

5.5.1 Calibración del modelo

La calibración del modelo es su proceso de verificación de su adaptabilidad o capacidad de reproducir el fenómeno natural estudiado. Para realizar la calibración se utiliza información de campo – en este caso niveles, caudales y granulometría del lecho, con el fin de establecer el parámetro de rugosidad N del lecho del cauce involucrado en el modelo hidráulico.

- Coeficiente de rugosidad de Manning N , en zonas de canal natural

El valor del coeficiente de rugosidad del río Magdalena en el sector de San Pablo, será estimado con base en el reconocimiento visual de campo y la utilización de tablas con valores normales del coeficiente de Manning y con base en la fórmula presentada por Ven Te Chow en *Open Channel Hydraulic*, la cual se muestra a continuación:

$$n = (nm + ni + nv + no + nve) * mm$$

Donde:

nm1	Para canales en tierra	0.020
nm2	Para canales en roca cortada	0.025
nm3	Para canales en grava fina	0.024
nm4	Para canales con grava gruesa	0.028
nm5	Para canales en tierra arenosa	0.023
ni1	Irregularidad de sección: liso	0.000
ni2	Irregularidad de sección: menor	0.005

ni3	Irregularidad de sección: moderada	0.010
ni4	Irregularidad de sección: severa	0.020
nv1	Variación entre secciones: gradual	0.000
nv2	Variación entre secciones: alternante ocasional	0.005
nv3	Variación entre secciones: frecuentemente alterna	0.010
nv4	Variación entre secciones: muy frecuente alterna	0.015
no1	Obstrucciones: despreciable	0.001
no2	Obstrucciones: menor	0.012
no3	Obstrucciones: apreciable	0.025
no4	Obstrucciones: severa	0.055
nve1	Vegetación: Nula	0.000
nve2	Vegetación: Baja	0.007
nve3	Vegetación: Media	0.017
nve4	Vegetación: Alta	0.037
nve5	Vegetación: Muy Alta	0.075
mm1	Cantidad de meandros: Menor	1.000
mm2	Cantidad de meandros: Apreciable	1.150
mm3	Cantidad de meandros: Severa	1.300

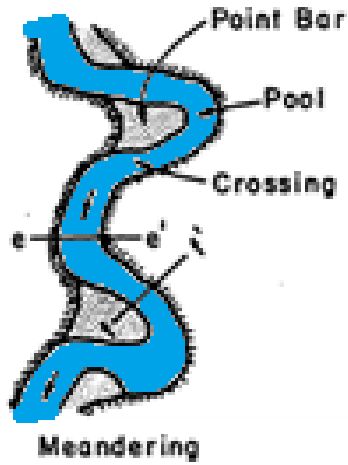
Nota: Ven Te Chow

Para el río Magdalena sector San Pablo se tiene:

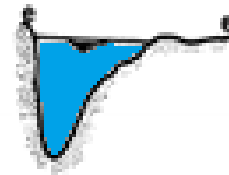
$$n = (0.02 + 0.02 + 0.015 + 0.01 + 0.007) * 1.00 = 0.072$$

Para las áreas inundables:

$$n = (0.02 + 0.02 + 0.015 + 0.01 + 0.017) * 1.00 = 0.082$$



Meandering



Pool



Crossing

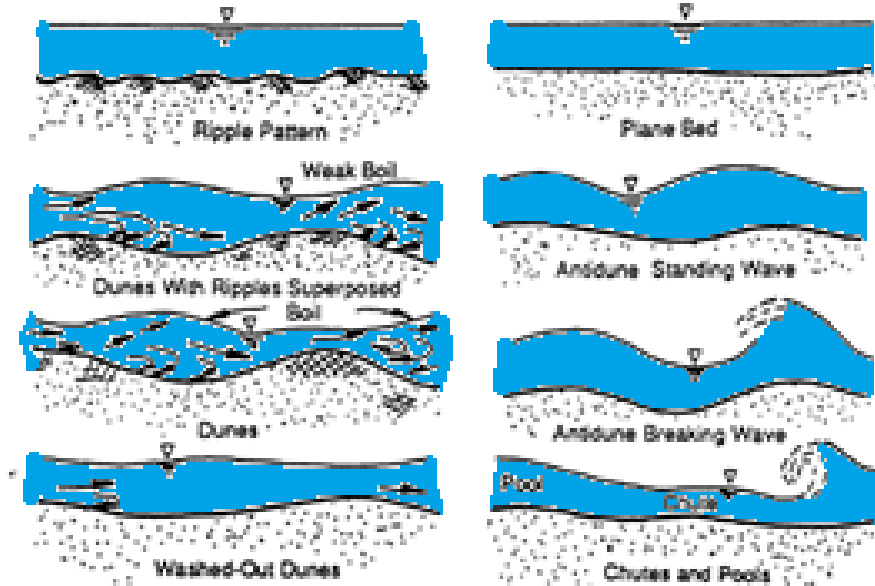


Tabla 17.*Variaciones de rugosidad para las corrientes*

Bed Forms	Range of Manning's n
Ripples	0.018 – 0.030
Dunes	0.020 – 0.035
Washed Out Dunes	0.014 – 0.025
Plane Bed	0.012 – 0.022
Standing Waves	0.014 – 0.025
Antidunes	0.015 – 0.031

Nota: Ven Te Chow

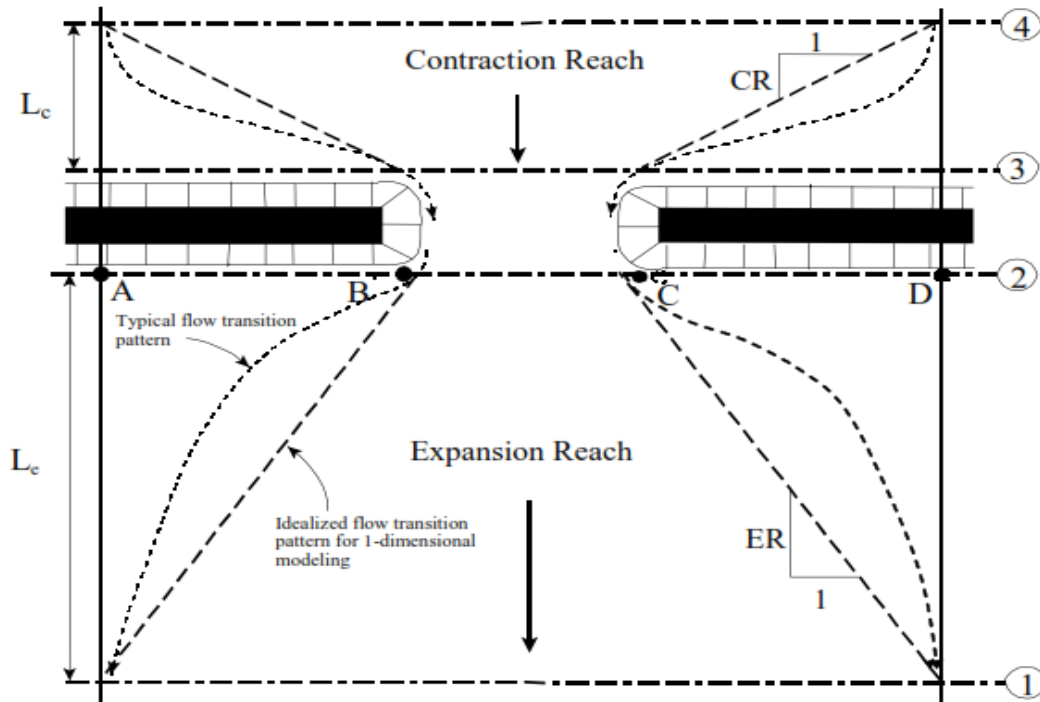
Se trabaja todo el modelo hidráulico con una rugosidad de 0.072 en canal y 0.082 para áreas inundables.

- Coeficiente de contracción y expansión

La expansión o contracción de la corriente debido a cambios en la sección transversal produce una pérdida de energía que se evalúa mediante la aplicación de coeficientes. Los coeficientes se multiplican por el valor absoluto de la diferencia de velocidades entre dos secciones transversales, la cual da la pérdida de energía debido a la transición.

Figura 32.

Sección transversal en un puente



Nota: Ven Te Chow

Los valores de estos coeficientes de pérdidas localizadas recomendados en los manuales de usuario de HEC-RAS son los siguientes:

Tabla 18.

Coeficientes de contracción y expansión

Tipo	Contracción	Expansión
Transiciones graduales	0.1	0.3
Secciones de puentes	0.3	0.5
Transiciones abruptas	0.6	0.8

Nota: Manuales de usuario de HEC-RAS

Para el estudio actual se tomaron los coeficientes correspondientes a transiciones graduales con valores de 0.1 y 0.3 respectivamente, debido a que las secciones analizadas no sufren cambios abruptos según la topografía del sector.

5.5.2 Idealización del modelo

Los siguientes principios de hidráulica se tomaron en cuenta para la idealización teórica del modelo y la simulación del mismo con los caudales estimados en el Estudio Hidrológico:

- El cauce natural se asimila a un cauce artificial, en la medida en que el modelo no simula procesos de socavación o deposición de fondo o lateral.
- El modelo no tiene en cuenta la sinuosidad de la quebrada; sin embargo, si tiene en cuenta que la sección transversal del río varía considerablemente en curvas y en las cercanías de obstáculos o controles geológicos.
- El flujo en la quebrada es de tipo no permanente; la suposición de flujo permanente implícita en el modelo seleccionado no altera los resultados de niveles máximos esperados.
- La pendiente del fondo no es uniforme; existen rápidos y fosas, barreras y obstáculos, los cuales son simulados por el modelo.
- Aunque la rugosidad puede ser variable en la sección transversal y a lo largo del río, es preferible utilizar y ajustar a un solo valor de rugosidad compuesto tanto en la sección como en la longitud del tramo estudiado, el cual es homogéneo desde el punto de vista hidráulico.

5.5.3 Caudal de diseño

El valor de caudal utilizado para simular el modelo, de acuerdo con la metodología de diseño que se desarrollará en el presente estudio corresponderá al generado para un período de retorno de 10 y 100 años.

Tabla 19.

Caudal de diseño para el río Magdalena en el sector de San Pablo

Período de retorno (años)	Q (m ³ /s)
10	6787.99
100	10028.87

5.5.4 Modelo hidráulico del río Magdalena sector de San Pablo

El modelo hidráulico del Río Magdalena se realizó teniendo como base la topografía actual y las secciones batimétricas del presente estudio, este modelo se desarrolló con el programa HEC-RAS; a continuación, se muestran los resultados para las secciones transversales definidas en el sector de estudio.

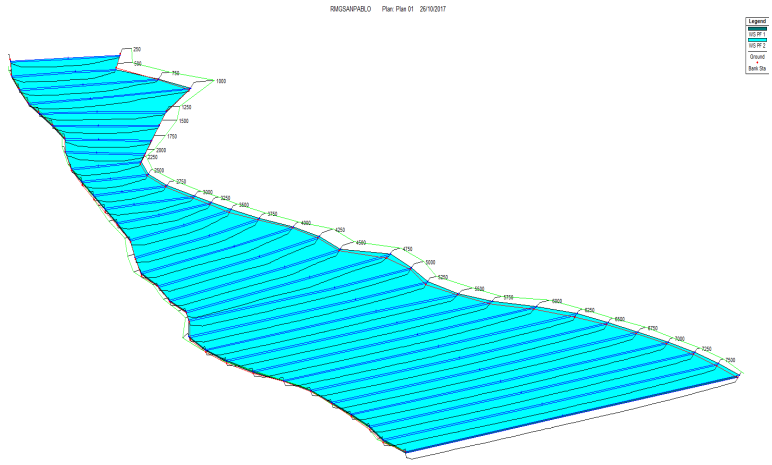
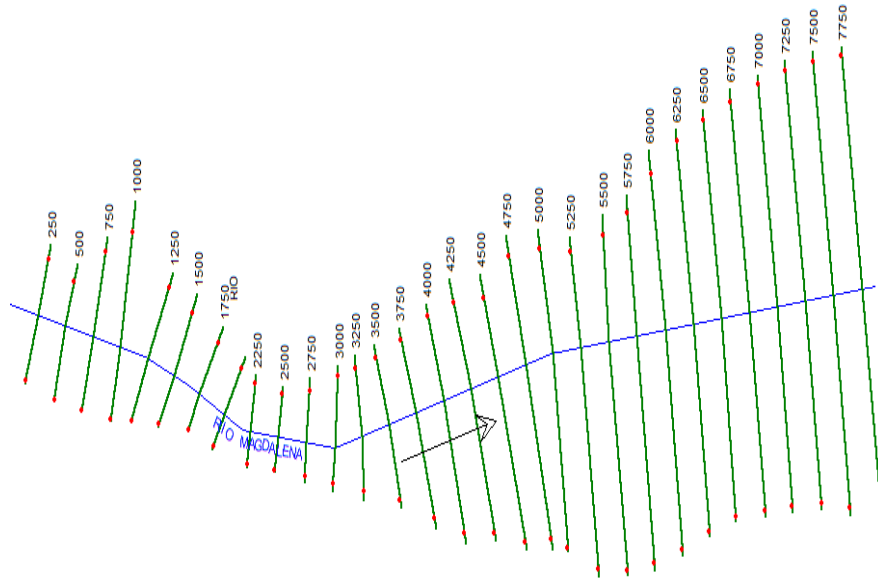
Se simularon dos modelos en Hec-ras, utilizando valores de caudales para dos periodos de retorno 10 y 100 años.

Pendiente promedio de:

$$\text{Pendiente} = \text{cota inicial} - \text{cota final} / \text{longitud} = (55.0 - 52.5) / 7000 = 0,00035 \approx 0.001$$

Figura 33.

Modelo hidráulico HEC-RAS



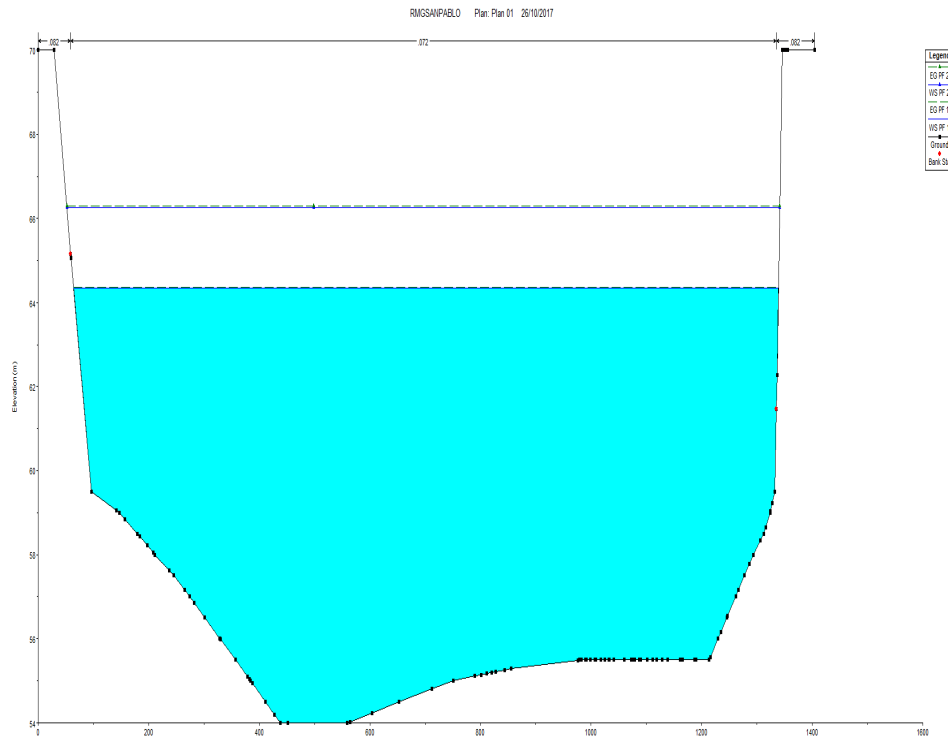


Tabla 20.

Resultados modelo hidráulico para un período de retorno de 10 años

Reach	River	Profile	Q Total	Min Ch El	W.S. Elev	E.G. Elev	E.G. Slope	Vel Chnl	Flow Area	Top Width	Froude
	Sta		(m ³ /sg)	(m)	(m)	(m)	(m/m)	(m/s)	(m ²)	(m)	# Chl
Magdalena	7750	10	6788	55.00	64.59	64.60	0.000	0.30	22458.59	2559.38	0.03
Magdalena	7500	10	6788	55.00	64.59	64.59	0.000	0.30	22306.89	2564.95	0.03
Magdalena	7250	10	6788	55.01	64.58	64.58	0.000	0.32	21220.68	2487.95	0.03
Magdalena	7000	10	6788	55.00	64.57	64.58	0.000	0.33	20616.24	2419.84	0.04
Magdalena	6750	10	6788	55.00	64.56	64.57	0.000	0.34	19889.92	2339.19	0.04
Magdalena	6500	10	6788	55.00	64.55	64.56	0.000	0.35	19457.22	2272.74	0.04
Magdalena	6250	10	6788	55.00	64.54	64.55	0.000	0.35	19228.96	2238.12	0.04
Magdalena	6000	10	6788	55.00	64.53	64.54	0.000	0.37	18587.51	2162.89	0.04
Magdalena	5750	10	6788	55.00	64.52	64.53	0.000	0.40	17047.24	2010.98	0.04
Magdalena	5500	10	6788	55.03	64.51	64.52	0.000	0.43	15609.04	1908.51	0.05
Magdalena	5250	10	6788	55.47	64.49	64.50	0.000	0.47	14385.65	1828.71	0.05
Magdalena	5000	10	6788	55.50	64.46	64.48	0.000	0.51	13255.75	1717.21	0.06
Magdalena	4750	10	6788	54.00	64.44	64.46	0.000	0.50	13483.96	1670.17	0.06
Magdalena	4500	10	6788	54.00	64.42	64.43	0.000	0.56	12109.11	1430.30	0.06
Magdalena	4250	10	6788	54.00	64.39	64.41	0.000	0.60	11380.59	1358.89	0.07

Reach	River	Profile	Q Total	Min Ch El	W.S. Elev	E.G. Elev	E.G. Slope	Vel Chnl	Flow Area	Top Width	Froude
	Sta		(m ³ /sg)	(m)	(m)	(m)	(m/m)	(m/s)	(m ²)	(m)	# Chl
Magdalena	4000	10	6788	54.00	64.36	64.38	0.000	0.63	10737.55	1274.61	0.07
Magdalena	3750	10	6788	54.00	64.32	64.34	0.000	0.75	8995.70	1055.99	0.08
Magdalena	3500	10	6788	54.00	64.24	64.29	0.000	0.96	7044.58	840.94	0.11
Magdalena	3250	10	6788	54.00	64.13	64.20	0.000	1.19	5703.02	705.92	0.13
Magdalena	3000	10	6788	54.00	63.95	64.06	0.001	1.43	4765.96	614.39	0.16
Magdalena	2750	10	6788	54.16	63.64	63.82	0.001	1.87	3630.99	498.61	0.22
Magdalena	2500	10	6788	54.00	63.22	63.45	0.002	2.13	3189.05	444.03	0.25
Magdalena	2250	10	6788	53.99	62.83	63.04	0.002	2.04	3322.61	467.59	0.24
Magdalena	2000	10	6788	53.99	62.46	62.65	0.001	1.93	3513.08	512.61	0.24
Magdalena	1750	10	6788	53.99	62.11	62.28	0.001	1.84	3684.51	558.61	0.23
Magdalena	1500	10	6788	53.98	61.84	61.96	0.001	1.55	4378.52	687.94	0.20
Magdalena	1250	10	6788	53.74	61.65	61.73	0.001	1.28	5285.04	819.11	0.16
Magdalena	1000	10	6788	53.00	61.54	61.59	0.000	0.97	6995.66	1080.57	0.12
Magdalena	750	10	6788	52.98	61.41	61.47	0.001	1.13	6000.16	915.67	0.14
Magdalena	500	10	6788	52.73	61.19	61.30	0.001	1.45	4672.85	679.91	0.18
Magdalena	250	10	6788	52.87	60.96	61.07	0.001	1.50	4517.09	712.86	0.19

Tabla 21.

Resultados modelo hidráulico para un período de retorno de 100 años

Reach	River	Profile	Q Total	Min Ch El	W.S. Elev	E.G. Elev	E.G. Slope	Vel Chnl	Flow Area	Top Width	Froude
	Sta		(m ³ /sg)	(m)	(m)	(m)	(m/m)	(m/s)	(m ²)	(m)	# Chl
Magdalena	7750	100	10029	55.00	66.52	66.53	0.000	0.37	27409.67	2568.83	0.04
Magdalena	7500	100	10029	55.00	66.52	66.52	0.000	0.37	27268.05	2575.83	0.04
Magdalena	7250	100	10029	55.01	66.51	66.51	0.000	0.39	26031.76	2499.85	0.04
Magdalena	7000	100	10029	55.00	66.50	66.51	0.000	0.40	25294.34	2432.60	0.04
Magdalena	6750	100	10029	55.00	66.49	66.50	0.000	0.41	24412.21	2354.11	0.04
Magdalena	6500	100	10029	55.00	66.48	66.49	0.000	0.42	23845.74	2284.58	0.04
Magdalena	6250	100	10029	55.00	66.47	66.48	0.000	0.43	23548.27	2249.87	0.04
Magdalena	6000	100	10029	55.00	66.46	66.47	0.000	0.44	22763.18	2178.85	0.04
Magdalena	5750	100	10029	55.00	66.44	66.45	0.000	0.48	20926.68	2026.46	0.05
Magdalena	5500	100	10029	55.03	66.43	66.44	0.000	0.52	19288.80	1924.78	0.05
Magdalena	5250	100	10029	55.47	66.41	66.42	0.000	0.56	17905.73	1841.43	0.06
Magdalena	5000	100	10029	55.50	66.38	66.40	0.000	0.61	16558.61	1729.80	0.06
Magdalena	4750	100	10029	54.00	66.36	66.38	0.000	0.60	16698.53	1685.91	0.06
Magdalena	4500	100	10029	54.00	66.33	66.35	0.000	0.68	14856.10	1444.64	0.07
Magdalena	4250	100	10029	54.00	66.30	66.32	0.000	0.72	13987.98	1375.12	0.07

Reach	River	Profile	Q Total	Min Ch El	W.S. Elev	E.G. Elev	E.G. Slope	Vel Chnl	Flow Area	Top Width	Froude
	Sta		(m ³ /sg)	(m)	(m)	(m)	(m/m)	(m/s)	(m ²)	(m)	# Chl
Magdalena	4000	100	10029	54.00	66.26	66.29	0.000	0.76	13176.95	1288.88	0.08
Magdalena	3750	100	10029	54.00	66.21	66.25	0.000	0.91	11009.23	1069.80	0.09
Magdalena	3500	100	10029	54.00	66.12	66.19	0.000	1.16	8635.68	852.69	0.12
Magdalena	3250	100	10029	54.00	65.98	66.09	0.000	1.43	7024.35	716.38	0.14
Magdalena	3000	100	10029	54.00	65.79	65.93	0.001	1.71	5900.63	624.28	0.18
Magdalena	2750	100	10029	54.16	65.43	65.68	0.001	2.22	4528.73	507.23	0.24
Magdalena	2500	100	10029	54.00	64.96	65.29	0.002	2.54	3966.83	450.95	0.27
Magdalena	2250	100	10029	53.99	64.54	64.84	0.002	2.43	4130.86	473.79	0.26
Magdalena	2000	100	10029	53.99	64.16	64.43	0.002	2.29	4392.37	518.74	0.25
Magdalena	1750	100	10029	53.99	63.81	64.04	0.001	2.16	4638.93	564.28	0.24
Magdalena	1500	100	10029	53.98	63.55	63.71	0.001	1.80	5562.07	693.95	0.20
Magdalena	1250	100	10029	53.74	63.37	63.48	0.001	1.50	6701.29	825.34	0.17
Magdalena	1000	100	10029	53.00	63.27	63.34	0.000	1.13	8873.07	1087.51	0.13
Magdalena	750	100	10029	52.98	63.13	63.22	0.001	1.32	7586.14	923.61	0.15
Magdalena	500	100	10029	52.73	62.89	63.04	0.001	1.72	5832.45	685.49	0.19
Magdalena	250	100	10029	52.87	62.65	62.81	0.001	1.75	5728.89	717.59	0.20

Se realizó la modelación del río Magdalena en un tramo de longitud de 8 Km, a la altura del paso por el corregimiento de San Rafael, donde se establecieron secciones cada 250 m, para un total de 31 secciones analizadas. Se modelaron dos caudales diferentes uno de 6788 m³/s y 10029 m³/s para un período de retorno de 10 y 100 años, donde se obtuvo para el primero un nivel máximo de cota de inundación que varía entre sus secciones desde 60.93 m.s.n.m hasta 64.59 m.s.n.m, se estableció la sección crítica de análisis como River Sta 4000, esta es la sección que se localiza en la población, obteniendo resultados de nivel de agua máxima 64.36 m y la velocidad media del cauce es de 0.630 m/s, con profundidad de cauce máxima de 10.0 m.

Para un período de retorno de 100 años con caudal de 10029 m³/s, se obtuvo un nivel de cota máxima de inundación variable entre 62.65 y 66.52, con nivel de agua máxima de 66.26 m, velocidad media del cauce 0.76 m/s y una profundidad de cauce máximo de 12.0 m.

5.6 Análisis de socavación

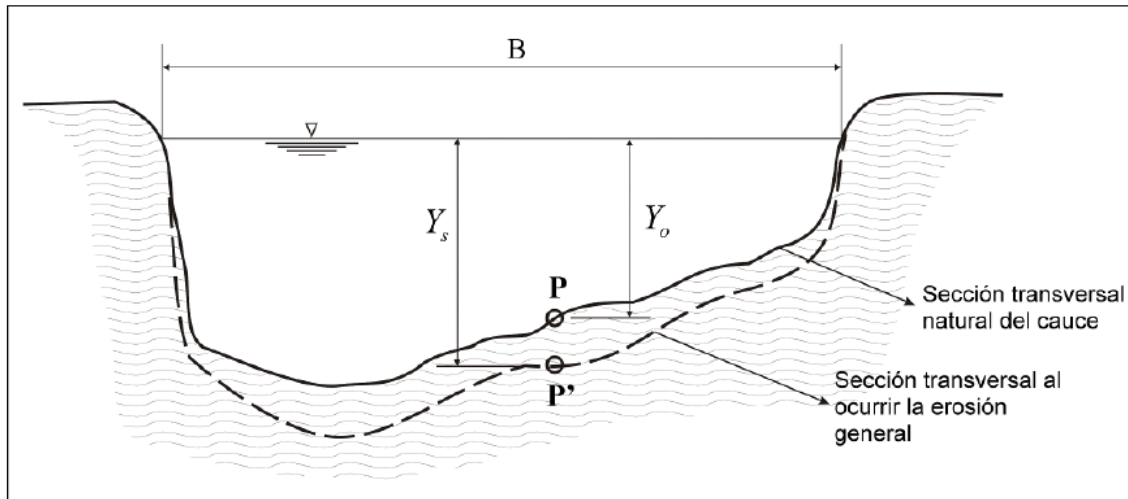
El análisis de la socavación tendrá por objeto definir las profundidades máximas ocasionadas por la socavación general producida por el arrastre de las partículas de fondo en el sector de estudio.

5.6.1 Socavación general

La evaluación de la socavación general producida por el flujo del agua en el cauce será realizada utilizando la metodología de Lischtan – Levediev, aprobada por Invías en sus estudios y diseños de vías en Colombia.

Figura 34.

Variables tenidas en cuenta en la socavación



Nota: INVIAS

Según Líschtvan – Levediev (maza, 1967) las expresiones para evaluar la socavación general son las siguientes:

Para suelos granulares:

$$y_s = \left(\frac{\alpha * y_o^{5/3}}{0.68 * D_m^{0.28} * \beta * \psi} \right)^{\frac{1}{1+x}}$$

Para los suelos cohesivos:

$$y_s = \left(\frac{\alpha * y_o^{5/3}}{0.60 * \gamma_s^{1.18} * \beta * \psi} \right)^{\frac{1}{1+x}}$$

Donde:

$$\alpha = \frac{Q_d}{H_m^{5/2} * \beta_e * \mu}$$

Y_s = Desnivel entre la superficie del agua, al pasar la avenida y el fondo erosionado.

Y_o = Desnivel entre la superficie del agua, al pasar la avenida, y el fondo original (medio antes de la avenida)

Y_s, Y_o = Se miden en cada sección vertical donde se desea hacer el cálculo.

A = área hidráulica de la sección.

β_e = Ancho libre de la superficie al presentarse la avenida.

H_m = Altura media de la sección.

α = coeficiente de contracción o distribución de gasto.

Q_d = Gasto del diseño.

D_m = Diámetro medio; si el material del fondo es friccionante.

x, z = Exponentes en función de D_m o γ_s según el tipo de material del fondo.

ψ = Coeficiente que depende de la concentración del material transportado en suspensión.

β = Coeficiente en función de la frecuencia.

μ = Coeficiente de contracción.

V_m = velocidad media del cauce.

Tabla 22.

Valores de coeficiente de concentración del cauce μ

Velocidad	Luz libre entre dos pilas, en metros												
	10	13	16	18	21	25	30	42	52	63	106	124	200
Media en	Coeficiente μ												
m/seg													
Menor de 1	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
1.00	0.96	0.97	0.98	0.98	0.99	0.99	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
1.50	0.94	0.96	0.97	0.97	0.97	0.98	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	1.00	1.00
2.00	0.93	0.94	0.95	0.96	0.97	0.97	0.98	0.98	0.99	0.99	0.99	0.99	1.00
2.50	0.9	0.93	0.94	0.95	0.96	0.96	0.97	0.98	0.98	0.99	0.99	0.99	1.00
3.00	0.89	0.91	0.93	0.94	0.95	0.96	0.96	0.97	0.98	0.98	0.98	0.99	0.99
3.50	0.87	0.90	0.92	0.93	0.94	0.95	0.96	0.97	0.98	0.98	0.98	0.99	0.99
4.00 o mayor	0.85	0.89	0.91	0.92	0.93	0.94	0.95	0.96	0.98	0.98	0.98	0.99	0.99

Nota: Maza, (1967). Control de erosión en zonas tropicales, 2001

Tabla 23.

Valores de coeficientes x, y, z

Suelos Cohesivos						Suelos Granulares					
γ_d	x	$\frac{1}{1+x}$	γ_d	X	$\frac{1}{1+x}$	d (mm)	Z	$\frac{1}{1+z}$	d (mm)	z	$\frac{1}{1+z}$
0.80	0.52	0.66	1.20	0.39	0.72	0.05	0.43	0.70	40.00	0.30	0.77
0.83	0.51	0.66	1.20	0.38	0.72	0.15	0.42	0.70	60.00	0.29	0.78
0.86	0.50	0.67	1.28	0.37	0.73	0.50	0.41	0.71	90.00	0.28	0.78
0.88	0.49	0.67	1.34	0.36	0.74	1.00	0.40	0.71	140.00	0.27	0.79
0.90	0.48	0.67	1.40	0.35	0.74	1.50	0.39	0.72	190.00	0.26	0.79
0.93	0.47	0.68	1.46	0.34	0.75	2.50	0.38	0.72	250.00	0.25	0.80

Suelos Cohesivos						Suelos Granulares					
γ_d	x	$\frac{1}{1+x}$	γ_d	X	$\frac{1}{1+x}$	d (mm)	Z	$\frac{1}{1+z}$	d (mm)	z	$\frac{1}{1+z}$
0.96	0.46	0.68	1.52	0.33	0.75	4.00	0.37	0.73	310.00	0.24	0.81
0.98	0.45	0.69	1.64	0.32	0.76	6.00	0.36	0.74	370.00	0.23	0.81
1.00	0.44	0.69	1.64	0.31	0.76	8.00	0.35	0.74	450.00	0.22	0.83
1.04	0.43	0.70	1.71	0.30	0.77	10.00	0.34	0.75	570.00	0.21	0.83
1.08	0.42	0.70	1.80	0.29	0.77	15.00	0.33	0.75	750.00	0.20	0.83
1.12	0.41	0.71	1.89	0.28	0.78	20.00	0.32	0.76	1000.00	0.19	0.84
1.16	0.40	0.71	2.00	0.27	0.78	25.00	0.31	0.76			

Nota: Maza, (1967). Control de erosión en zonas tropicales, 2001

Tabla 24.

Valores de β

Probabilidad (en % de que se presente el caudal de diseño)	Coficiente β
100	0.77
50	0.82
20	0.86
10	0.90
5	0.94
2	0.97
1	1.00
0.3	1.03
0.2	1.05
0.1	1.07

Nota: Maza, (1967). Control de erosión en zonas tropicales, 2001

Tabla 25.*Valores de ψ*

$\gamma_{mezcla\ agua-sedimento}$	Coefficiente ψ
1.05	1.06
1.10	1.13
1.15	1.20
1.20	1.27
1.25	1.34
1.30	1.42
1.35	1.50
1.40	1.60

Nota: Maza, (1967). Control de erosión en zonas tropicales, 2001

La socavación general para los períodos de retorno de 10 y 100 años en la sección del sitio de estudio se presenta en las siguientes tablas.

Tabla 26.*Socavación general en la sección del sitio en estudio para un Tr de 10 años*

Parámetros	Abscisa	M	28.98	58.97	96.05	157.19	245.24
Periodo de retorno de la avenida	T	años	10	10	10	10	10
Caudal de diseño	Q	m ³ /s	6787.99	6787.99	6787.99	6787.99	6787.99
Área de la sección	A	m ²	2664.95	2664.95	2664.95	2664.95	2664.95
Ancho libre de la superficie superior	Be	M	393.81	393.81	393.81	393.81	393.81
Nivel de fondo actual del cauce		M	70.00	65.16	59.50	58.84	57.50

Parámetros	Abscisa	M	28.98	58.97	96.05	157.19	245.24
Nivel de aguas máximas		M	64.36	64.36	64.36	64.36	64.36
Profundidad del cauce	y	M	0.00	0.00	4.860	5.516	6.860
Altura media de la sección:	Hm=A/Be	M	6.767	6.767	6.767	6.767	6.767
Velocidad media del cauce	Vm	m/s	0.630	0.630	0.630	0.630	0.630
Diámetro medio de las partículas	Dm	Mm	2	2	2	2	2
Factor que depende del diámetro medio	z		0.385	0.385	0.385	0.385	0.385
Coefficiente de contracción (Con Vm y Separación entre pilas)	m		1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
Coefficiente de contracción o distribución de gasto	a		0.712	0.712	0.712	0.712	0.712
Coefficiente en función de la frecuencia	b		1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
Densidad del agua más sedimentos	G (w+s)		1.400	1.400	1.400	1.400	1.400
Coefficiente del material a transportar en suspensión	y		1.600	1.600	1.600	1.600	1.600
Profundidad del cauce actual	Ho	M	0.00	0.00	4.860	5.516	6.860
Profundidad del cauce después de la socavación	Hs	M	0.000	0.000	4.290	4.996	6.495
Altura socavada	Hs-Ho	M	0.000	0.000	0.00	0.00	0.00

Parámetros	Abcisa	M	356.95	438.31	451.57	558.98	603.96
Periodo de retorno de la avenida	T	años	10	10	10	10	10
Caudal de diseño	Q	m ³ /s	6787.99	6787.99	6787.99	6787.99	6787.99
Área de la sección	A	m ²	2664.95	2664.95	2664.95	2664.95	2664.95
Ancho libre de la superficie superior	Be	M	393.81	393.81	393.81	393.81	393.81
Nivel de fondo actual del cauce		M	55.50	54.00	54.00	54.00	54.24
Nivel de aguas máximas		M	64.36	64.36	64.36	64.36	64.36
Profundidad del cauce	Y	M	8.860	10.360	10.360	10.360	10.120
Altura media de la sección:	Hm=A/Be	M	6.767	6.767	6.767	6.767	6.767
Velocidad media del cauce	Vm	m/s	0.630	0.630	0.630	0.630	0.630
Diámetro medio de las partículas	Dm	Mm	2	2	2	2	2
Factor que depende del diámetro medio	z		0.385	0.385	0.385	0.385	0.385
Coefficiente de contracción (Con Vm y Separación entre pilas)	M		1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
Coefficiente de contracción o distribución de gasto	A		0.712	0.712	0.712	0.712	0.712
Coefficiente en función de la frecuencia	B		1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
Densidad del agua más sedimentos	G (w+s)		1.400	1.400	1.400	1.400	1.400
Coefficiente del material a transportar en suspensión	y		1.600	1.600	1.600	1.600	1.600

Parámetros	Abscisa	M	356.95	438.31	451.57	558.98	603.96
Profundidad del cauce actual	Ho	M	8.860	10.360	10.360	10.360	10.120
Profundidad del cauce después de la socavación	Hs	M	8.836	10.666	10.666	10.666	10.370
Altura socavada	Hs-Ho	M	0.00	0.306	0.306	0.306	0.250

Parámetros	Abscisa	M	652.17	750.75	855.80	976.08	1072.28
Periodo de retorno de la avenida	T	años	10	10	10	10	10
Caudal de diseño	Q	m ³ /s	6787.99	6787.99	6787.99	6787.99	6787.99
Área de la sección	A	m ²	2664.95	2664.95	2664.95	2664.95	2664.95
Ancho libre de la superficie superior	Be	M	393.81	393.81	393.81	393.81	393.81
Nivel de fondo actual del cauce		M	54.50	55.00	55.30	55.49	55.50
Nivel de aguas máximas		M	64.36	64.36	64.36	64.36	64.36
Profundidad del cauce	y	M	9.860	9.360	9.064	8.867	8.864
Altura media de la sección:	Hm=A/Be	M	6.767	6.767	6.767	6.767	6.767
Velocidad media del cauce	Vm	m/s	0.630	0.630	0.630	0.630	0.630
Diámetro medio de las partículas	Dm	Mm	2	2	2	2	2
Factor que depende del diámetro medio	z		0.385	0.385	0.385	0.385	0.385
Coefficiente de contracción (Con Vm y Separación entre pilas)	m		1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
Coefficiente de contracción o distribución de gasto	a		0.712	0.712	0.712	0.712	0.712

Parámetros	Abscisa	M	652.17	750.75	855.80	976.08	1072.28
Coeficiente en función de la frecuencia	b		1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
Densidad del agua más sedimentos	G (w+s)		1.400	1.400	1.400	1.400	1.400
Coeficiente del material a transportar en suspensión	y		1.600	1.600	1.600	1.600	1.600
Profundidad del cauce actual	Ho	M	9.860	9.360	9.064	8.867	8.864
Profundidad del cauce después de la socavación	Hs	M	10.050	9.440	9.082	8.845	8.841
Altura socavada	Hs-Ho	M	0.190	0.080	0.018	0.00	0.00

Parámetros	Abscisa	M	1213.69	1261.64	1323.87	1332.59	1345.39
Periodo de retorno de la avenida	T	años	10	10	10	10	10
Caudal de diseño	Q	m ³ /s	6787.99	6787.99	6787.99	6787.99	6787.99
Área de la sección	A	m ²	2664.95	2664.95	2664.95	2664.95	2664.95
Ancho libre de la superficie superior	Be	M	393.81	393.81	393.81	393.81	393.81
Nivel de fondo actual del cauce		M	55.50	57.00	59.00	59.50	70.00
Nivel de aguas máximas		M	64.36	64.36	64.36	64.36	64.36
Profundidad del cauce	Y	M	8.860	7.360	5.360	4.860	0.00
Altura media de la sección:	Hm=A/Be	M	6.767	6.767	6.767	6.767	6.767
Velocidad media del cauce	Vm	m/s	0.630	0.630	0.630	0.630	0.630
Diámetro medio de las partículas	Dm	Mm	2	2.000	2.000	2.000	2.000
Factor que depende del diámetro medio	Z		0.385	0.385	0.385	0.385	0.385

Parámetros	Abscisa	M	1213.69	1261.64	1323.87	1332.59	1345.39
Coeficiente de contracción (Con Vm y Separación entre pilas)	M		1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
Coeficiente de contracción o distribución de gasto	A		0.712	0.712	0.712	0.712	0.712
Coeficiente en función de la frecuencia	B		1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
Densidad del agua más sedimentos	G (w+s)		1.400	1.400	1.400	1.400	1.400
Coeficiente del material a transportar en suspensión	Y		1.600	1.600	1.600	1.600	1.600
Profundidad del cauce actual	Ho	M	8.860	7.360	5.360	4.860	0.00
Profundidad del cauce después de la socavación	Hs	M	8.836	7.069	4.826	4.290	0.000
Altura socavada	Hs-Ho	M	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000

Figura 35.

Perfil de Socavación para un Tr de 10 años

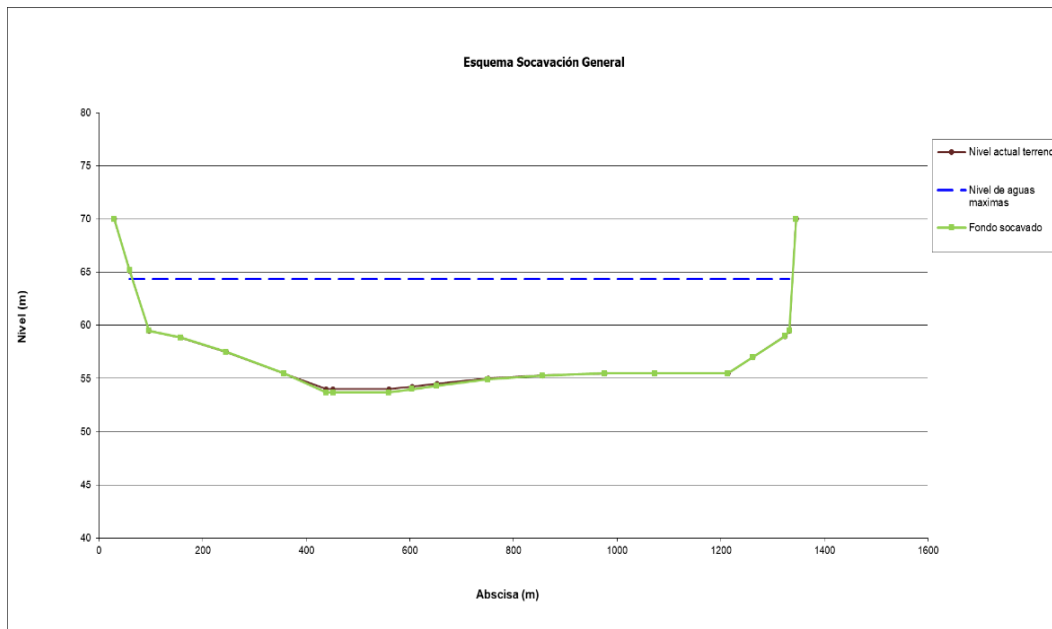


Tabla 27.

Socavación general en la sección del sitio en estudio para un Tr de 100 años

Parámetros	Abscisa	M	28.98	58.97	96.05	157.19	245.24
Periodo de retorno de la avenida	T	años	100	100	100	100	100
Caudal de diseño	Q	m ³ /s	8546.97	8546.97	8546.97	8546.97	8546.97
Área de la sección	A	m ²	2664.95	2664.95	2664.95	2664.95	2664.95
Ancho libre de la superficie superior	Be	M	393.81	393.81	393.81	393.81	393.81
Nivel de fondo actual del cauce		M	70.00	65.16	59.50	58.84	57.50
Nivel de aguas máximas		M	66.26	66.26	66.26	66.26	66.26
Profundidad del cauce	Y	M	0.00	1.100	6.760	7.416	8.760
Altura media de la sección:	Hm=A/Be	M	6.767	6.767	6.767	6.767	6.767
Velocidad media del cauce	Vm	m/s	0.760	0.760	0.760	0.760	0.760

Parámetros	Abscisa	M	28.98	58.97	96.05	157.19	245.24
Diámetro medio de las partículas	Dm	Mm	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000
Factor que depende del diámetro medio	z		0.385	0.385	0.385	0.385	0.385
Coefficiente de contracción (Con Vm y Separación entre pilas)	M		1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
Coefficiente de contracción o distribución de gasto	A		0.896	0.896	0.896	0.896	0.896
Coefficiente en función de la frecuencia	B		1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
Densidad del agua más sedimentos	G (w+s)		1.200	1.200	1.200	1.200	1.200
Coefficiente del material a transportar en suspensión	y		1.270	1.270	1.270	1.270	1.270
Profundidad del cauce actual	Ho	M	0.00	1.100	6.760	7.416	8.760
Profundidad del cauce después de la socavación	Hs	M	0.000	1.002	8.904	9.954	12.163
Altura socavada	Hs-Ho	M	0.000	0.00	2.144	2.538	3.403
Parámetros	Abscisa	M	356.95	438.31	451.57	558.98	603.96
Periodo de retorno de la avenida	T	años	100	100	100	100	100
Caudal de diseño	Q	m ³ /s	8546.97	8546.97	8546.97	8546.97	8546.97
Área de la sección	A	m ²	2664.95	2664.95	2664.95	2664.95	2664.95
Ancho libre de la superficie superior	Be	M	393.81	393.81	393.81	393.81	393.81

Parámetros	Abscisa	M	356.95	438.31	451.57	558.98	603.96
Nivel de fondo actual del cauce		M	55.50	54.00	54.00	54.00	54.24
Nivel de aguas máximas		M	66.26	66.26	66.26	66.26	66.26
Profundidad del cauce	Y	M	10.760	12.260	12.260	12.260	12.020
Altura media de la sección:	Hm=A/Be	M	6.767	6.767	6.767	6.767	6.767
Velocidad media del cauce	Vm	m/s	0.760	0.760	0.760	0.760	0.760
Diámetro medio de las partículas	Dm	Mm	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000
Factor que depende del diámetro medio	z		0.385	0.385	0.385	0.385	0.385
Coeficiente de contracción (Con Vm y Separación entre pilas)	M		1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
Coeficiente de contracción o distribución de gasto	A		0.896	0.896	0.896	0.896	0.896
Coeficiente en función de la frecuencia	B		1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
Densidad del agua más sedimentos	G (w+s)		1.200	1.200	1.200	1.200	1.200
Coeficiente del material a transportar en suspensión	y		1.270	1.270	1.270	1.270	1.270
Profundidad del cauce actual	Ho	M	10.760	12.260	12.260	12.260	12.020
Profundidad del cauce después de la socavación	Hs	M	15.577	18.226	18.226	18.226	17.798
Altura socavada	Hs-Ho	M	4.817	5.966	5.966	5.966	5.778

Parámetros	Abscisa	M	652.17	750.75	855.80	976.08	1072.28
Periodo de retorno de la avenida	T	años	100	100	100	100	100
Caudal de diseño	Q	m ³ /s	8546.97	8546.97	8546.97	8546.97	8546.97
Área de la sección	A	m ²	2664.95	2664.95	2664.95	2664.95	2664.95
Ancho libre de la superficie superior	Be	M	393.81	393.81	393.81	393.81	393.81
Nivel de fondo actual del cauce		M	54.50	55.00	55.30	55.49	55.50
Nivel de aguas máximas		M	66.26	66.26	66.26	66.26	66.26
Profundidad del cauce	Y	M	11.760	11.260	10.964	10.767	10.764
Altura media de la sección:	Hm=A/Be	M	6.767	6.767	6.767	6.767	6.767
Velocidad media del cauce	Vm	m/s	0.760	0.760	0.760	0.760	0.760
Diámetro medio de las partículas	Dm	Mm	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000
Factor que depende del diámetro medio	Z		0.385	0.385	0.385	0.385	0.385
Coeficiente de contracción (Con Vm y Separación entre pilas)	M		1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
Coeficiente de contracción o distribución de gasto	A		0.896	0.896	0.896	0.896	0.896
Coeficiente en función de la frecuencia	B		1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
Densidad del agua más sedimentos	G (w+s)		1.200	1.200	1.200	1.200	1.200
Coeficiente del material a transportar en suspensión	Y		1.270	1.270	1.270	1.270	1.270
Profundidad del cauce actual	Ho	M	11.760	11.260	10.964	10.767	10.764

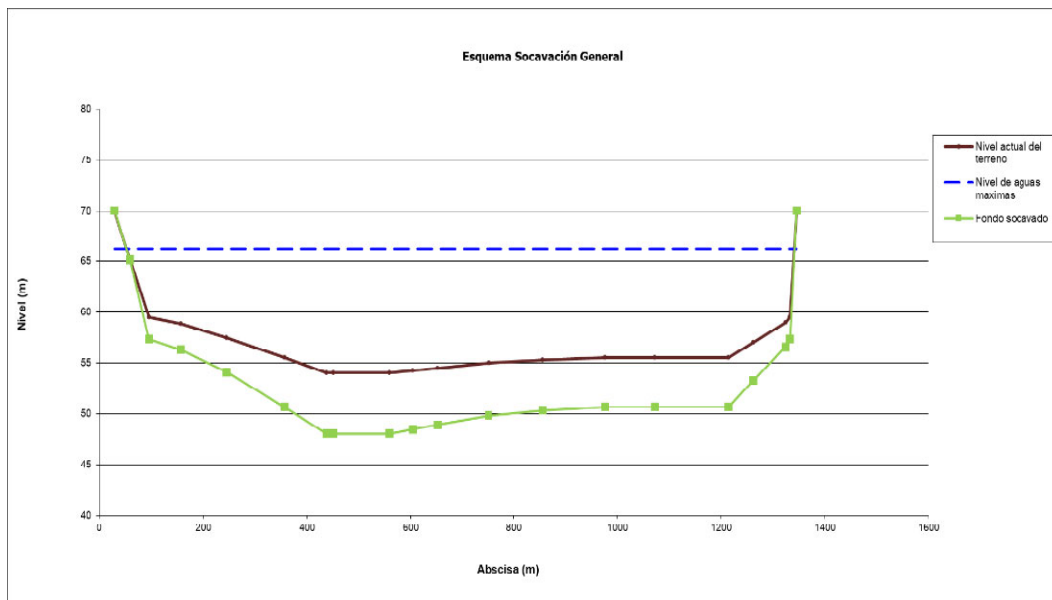
Parámetros	Abscisa	M	652.17	750.75	855.80	976.08	1072.28
Profundidad del cauce después de la socavación	Hs	M	17.336	16.453	15.934	15.590	15.584
Altura socavada	Hs-Ho	M	5.576	5.193	4.970	4.823	4.820

Parámetros	Abscisa	M	1213.69	1261.64	1323.87	1332.59	1345.39
Periodo de retorno de la avenida	T	años	100	100	100	100	100
Caudal de diseño	Q	m ³ /s	8546.97	8546.97	8546.97	8546.97	8546.97
Área de la sección	A	m ²	2664.95	2664.95	2664.95	2664.95	2664.95
Ancho libre de la superficie superior	Be	M	393.81	393.81	393.81	393.81	393.81
Nivel de fondo actual del cauce		M	55.50	57.00	59.00	59.50	70.00
Nivel de aguas máximas		M	66.26	66.26	66.26	66.26	66.26
Profundidad del cauce	Y	M	10.760	9.260	7.260	6.760	0.00
Altura media de la sección:	Hm=A/Be	M	6.767	6.767	6.767	6.767	6.767
Velocidad media del cauce	Vm	m/s	0.760	0.760	0.760	0.760	0.760
Diámetro medio de las partículas	Dm	Mm	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000
Factor que depende del diámetro medio	Z		0.385	0.385	0.385	0.385	0.385
Coefficiente de contracción (Con Vm y Separación entre pilas)	M		1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
Coefficiente de contracción o distribución de gasto	A		0.896	0.896	0.896	0.896	0.896
Coefficiente en función de la frecuencia	B		1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

Parámetros	Abscisa	M	1213.69	1261.64	1323.87	1332.59	1345.39
Densidad del agua más sedimentos	G (w+s)		1.200	1.200	1.200	1.200	1.200
Coeficiente del material a transportar en suspensión	Y		1.270	1.270	1.270	1.270	1.270
Profundidad del cauce actual	Ho	M	10.760	9.260	7.260	6.760	0.00
Profundidad del cauce después de la socavación	Hs	M	15.577	13.003	9.702	8.904	0.000
Altura socavada	Hs-Ho	M	4.817	3.743	2.442	2.144	0.000

Figura 36.

Perfil de socavación para un Tr de 100 años



Se espera la máxima socavación para un caudal de 10029 m³/s con periodo de retorno 100 años, socavación máxima de fondo 5,966 metros y socavación máxima lateral 2,2 metros.

6. Análisis Geotécnico

Se realizó en tres fases:

1. Recopilación de información previa, realizados en el área de estudio, exploraciones del subsuelo, ensayos de laboratorio para definir la caracterización y propiedades del perfil.
2. Modelamiento en software slide programa de estabilidad de pendiente de equilibrio límite 2D para evaluar el factor de seguridad y probabilidad de falla, de superficies de falla circulares o no circulares en condiciones iniciales.
3. Modelamiento en software slide programa de estabilidad de pendiente de equilibrio límite 2D para evaluar el factor de seguridad y probabilidad de falla, de superficies de falla circulares o no circulares en condición intervenida o con obras.

Para la modelación se realizó una caracterización geotécnica a partir de ensayos de exploración de campo, correlaciones con los valores de los ensayos de SPT, resultados de los ensayos de laboratorio y antecedentes o consultó bibliografía existente de suelos aluviales del río Magdalena caracterizados de acuerdo a la granulometría, de tal manera que los parámetros considerados son producto de estudios del Río Magdalena en el área de estudio.

6.1 Parámetros Utilizados para el Modelo Geotécnico

El modelo geotécnico se estableció para el perfil crítico, perfil A-A', para el cual se determinan los parámetros necesarios de acuerdo a los criterios de equilibrio límite y modelo de comportamiento de acuerdo a la teoría de esfuerzos de Mohr Coulomb

Figura 37.

Perfil estratigráfico. Sección analizada

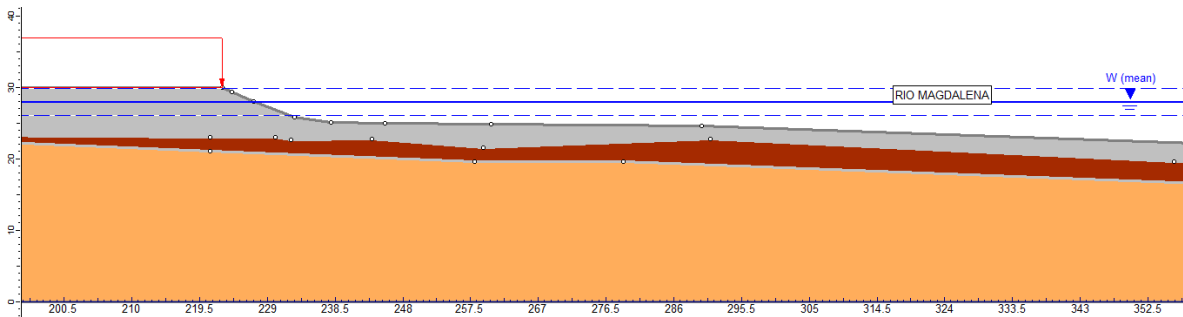
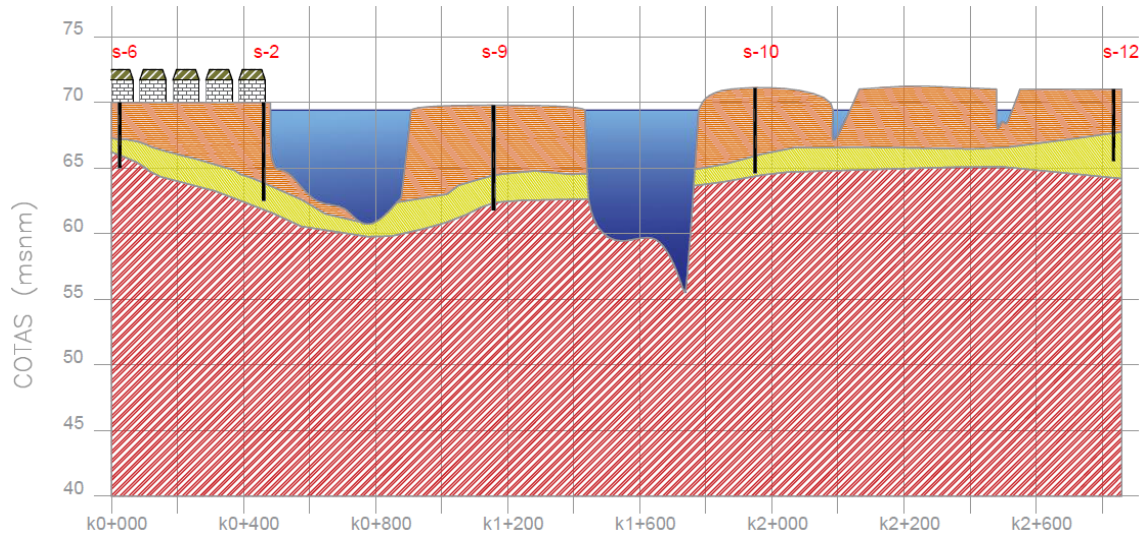


Figura 38.

Parámetros geotécnicos. Sección analizada

Material Name	Color	Unit Weight (kN/m ³)	Strength Type	Cohesion (kN/m ²)	Phi
Material 1	Grey	18	Mohr-Coulomb	3	35
Material 2	Brown	19	Mohr-Coulomb	8	35
Material 3	Orange	19	Mohr-Coulomb	12	37

6.2 Modelación Geotécnica de Estabilidad

Se realizaron los análisis de estabilidad mediante la teoría de equilibrio límite. Se evaluó el factor de seguridad por 5 métodos: Fellenius, Bishop, Hanbú, Spence y Morgenster & Prince.

El criterio de evaluación de los factores de seguridad obtenido de los análisis se clasifica de acuerdo con la norma colombiana sismorresistente así:

VALORES DEL FACTOR DE SEGURIDAD GEOTÉCNICO BÁSICO SB F — La selección de los factores de seguridad debe justificarse plenamente teniendo en cuenta:

- (a) La magnitud de la obra.
- (b) Las consecuencias de una posible falla en la edificación o sus cimentaciones.
- (c) La calidad de la información disponible en materia de suelos.

En cualquier caso, los Factores de Seguridad Básicos SB F aplicados al material térreo (suelo, roca o material intermedio) no deben ser inferiores a los Factores de Seguridad Básicos Mínimos SBM F o SBUM F de la tabla H.2.4-1, en la cual las cargas se refieren a valores nominales sin coeficientes de mayoración, tal como se indica en el aparte B.2.3 de este Reglamento, en el cual, para los cimientos y el material térreo de cimentación se empleará para las fuerzas sísmicas E un factor $R = 1.0$. En ningún caso el factor de seguridad básico mínimo SBM F podrá ser inferior a 1.00 (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010).

Tabla 28.

Factores de seguridad básica y mínimos directos

Condición	F_{SBM}		F_{SBUM}	
	Diseño	Construcción	Diseño	Construcción
Carga Muerta + Carga Viva Normal	1.50	1.25	1.80	1.40
Carga Muerta + Carga Viva Máxima	1.25	1.10	1.40	1.15
Carga Muerta + Carga Viva Normal + Sismo de Diseño Seudo estático	1.10	1.00 (*)	No se permite	No se permite
Taludes – Condición Estática y Agua Subterránea Normal	1.50	1.25	1.80	1.40
Taludes – Condición Seudo-estática con Agua Subterránea Normal y Coeficiente Sísmico de Diseño	1.05	1.00 (*)	No se permite	No se permite

Nota: NSR-10, H.2.4-1

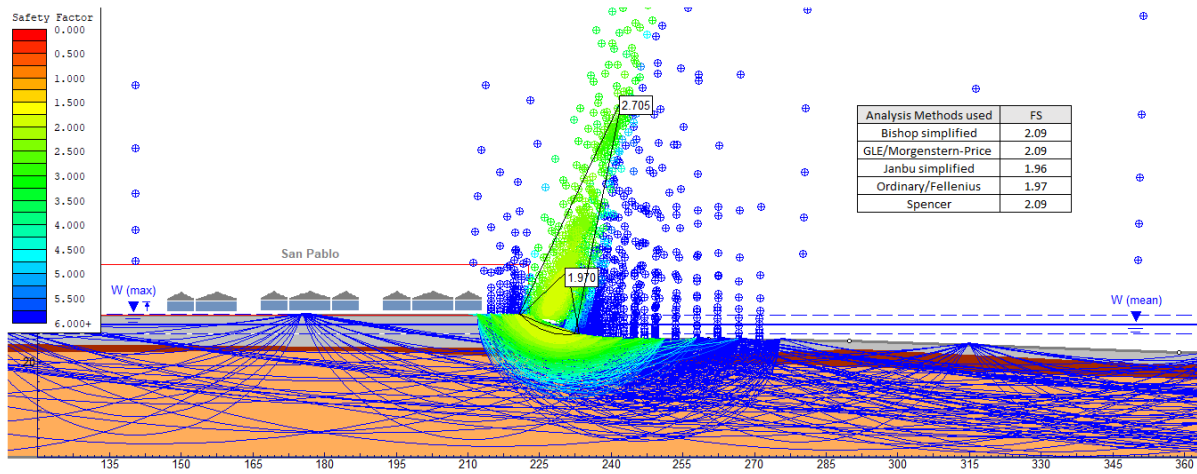
En la sección analizada, se realizó un modelo de estabilidad donde se analizan los 5 métodos: Fellenius, Bishop, Janbú, Spence y Morgenstern - Price, en relación a todas las combinaciones de niveles máximos y mínimos de la lámina de agua, y su efecto en la estabilidad, revisando las variaciones generadas en los factores de seguridad, por medio de un análisis determinístico utilizando el software Slide, para el modelo de estabilidad inicial actual sin obras.

6.2.1 Modelo No. 1 Estabilidad inicial actual sin obras, estática

Se realizó un análisis con modelo de sección original en condiciones estáticas, con análisis determinístico.

Figura 39.

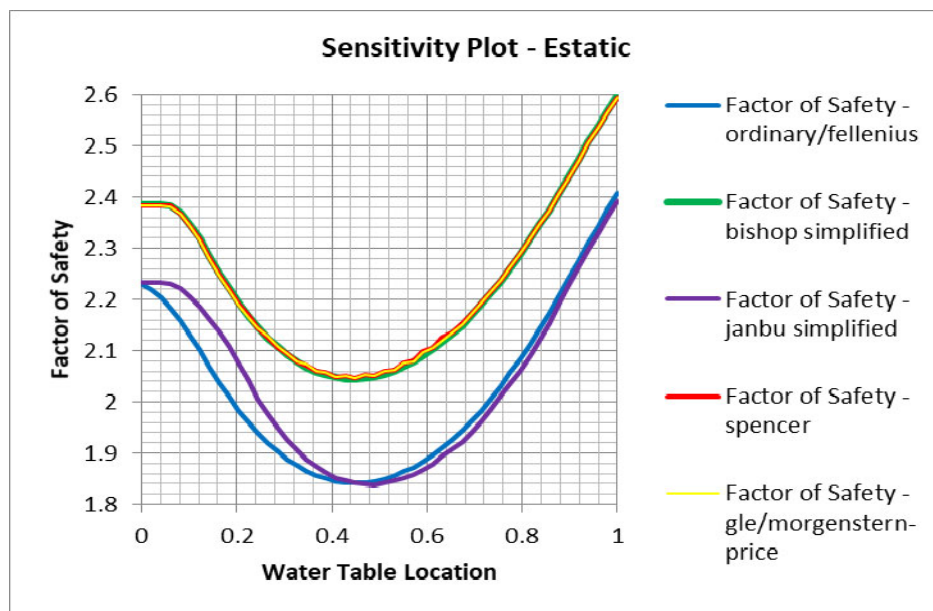
Análisis de estabilidad inicial, condición estático sección original



Se evaluaron los cambios de factores de seguridad de acuerdo al análisis de sensibilidad de niveles máximos y mínimos de la lámina de agua.

Figura 40.

Factores de seguridad estáticos, análisis de sensibilidad nivel de agua.

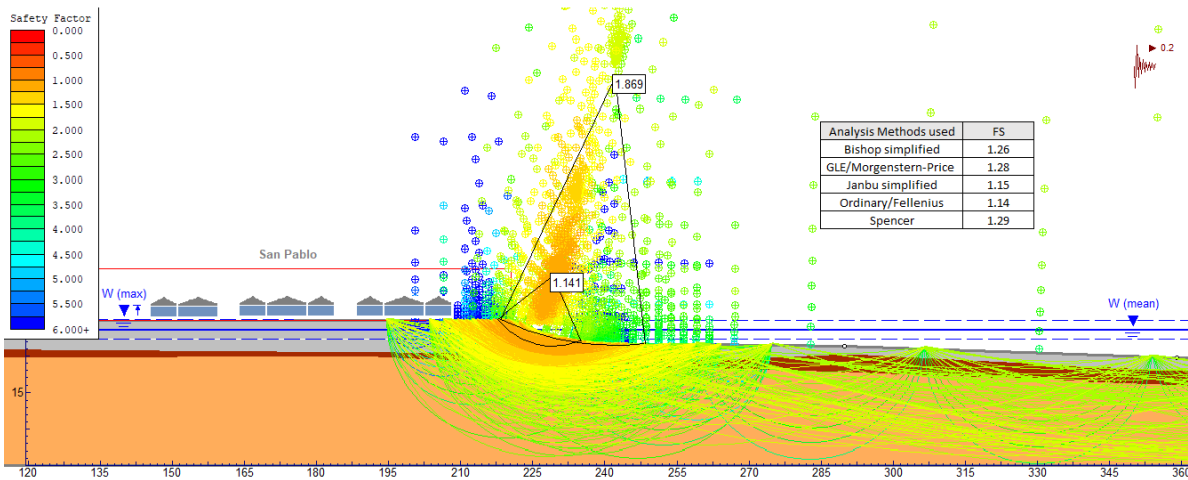


6.2.2 Modelo No. 2 Estabilidad inicial actual sin obras, pseudo - estática

Se realizó un análisis con modelo de sección original en condiciones pseudo- estáticas, con análisis determinístico.

Figura 41.

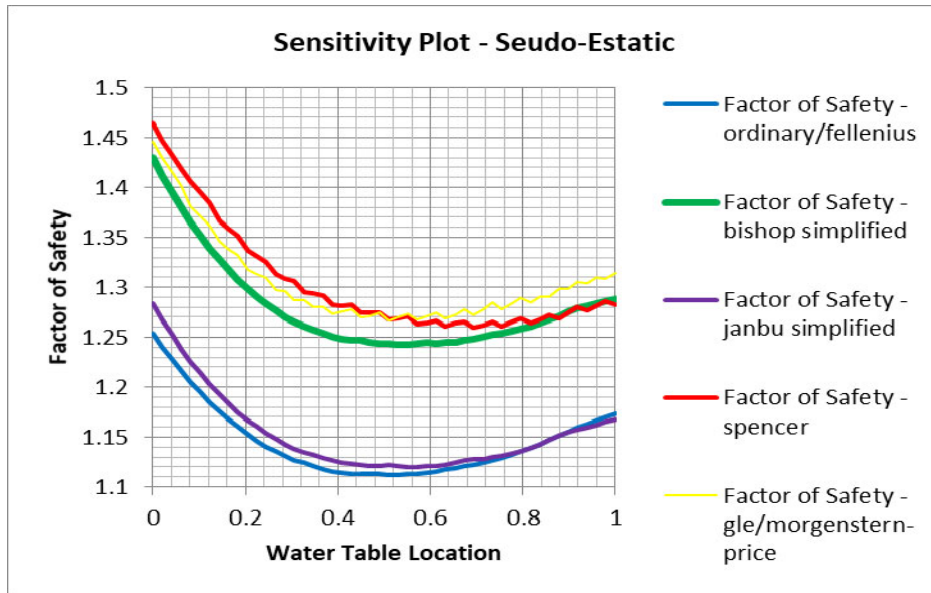
Análisis de estabilidad inicial, condición pseudo-estático sección original



Se evaluaron los cambios de factores de seguridad de acuerdo al análisis de sensibilidad de niveles máximos y mínimos de la lámina de agua.

Figura 42.

Factores de seguridad pseudo-estaticos, analisis de sensibilidad nivel de agua.



6.2.3 Resultados modelación inicial, condiciones estática y pseudo estática

Se obtuvieron los siguientes factores de seguridad de los analisis de estabilidad inial actual, en condiciones estatica y seudo estatica.

Tabla 29. Resultados modelación inicial, condiciones estática y pseudo estática

Método de Análisis	FS Estático	Fsbm (Diseño)	FS Seudo-Estático	Fsbm (Diseño)
Ordinary/fellenius	1.84		1.11	
Bishop simplified	2.04		1.24	
Janbu simplified	1.84	1.5 (OK)	1.12	1.05 (OK)
Spencer	2.05		1.26	
Gle/morgenstern-price	2.05		1.27	

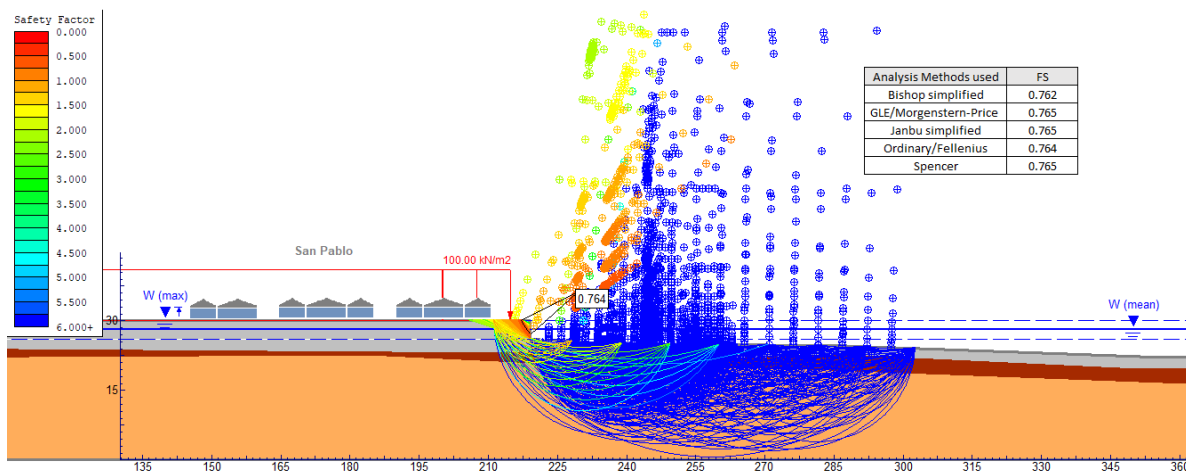
De este análisis inicial se determinó que no hay problema de inestabilidad en la condición actual, debido a que los factores de seguridad son muy superiores a los límites exigido, es por eso que se realiza una modelación teniendo en cuenta la socavación que se produce con los diferentes periodo de retorno.

6.2.4 Modelo No. 3 Estabilidad inicial actual sin obras socavado, estática

Se realizó un análisis con modelo de sección original en condiciones estáticas socavado, con análisis determinístico.

Figura 43.

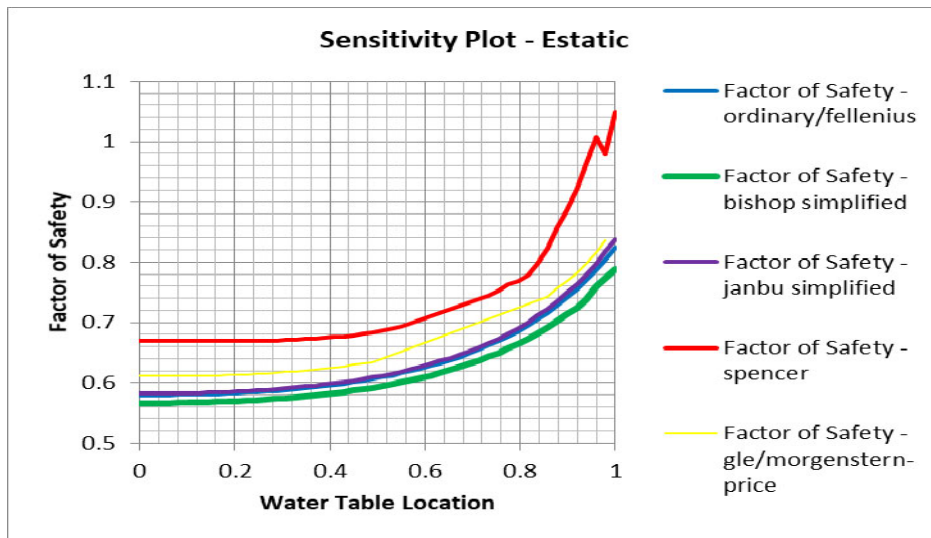
Análisis estático sección inicial socavada



Se evaluaron los cambios de factores de seguridad de acuerdo al análisis de sensibilidad de niveles máximos y mínimos de la lámina de agua.

Figura 44.

Factores de seguridad estáticos sección socavada, análisis de sensibilidad nivel de agua.

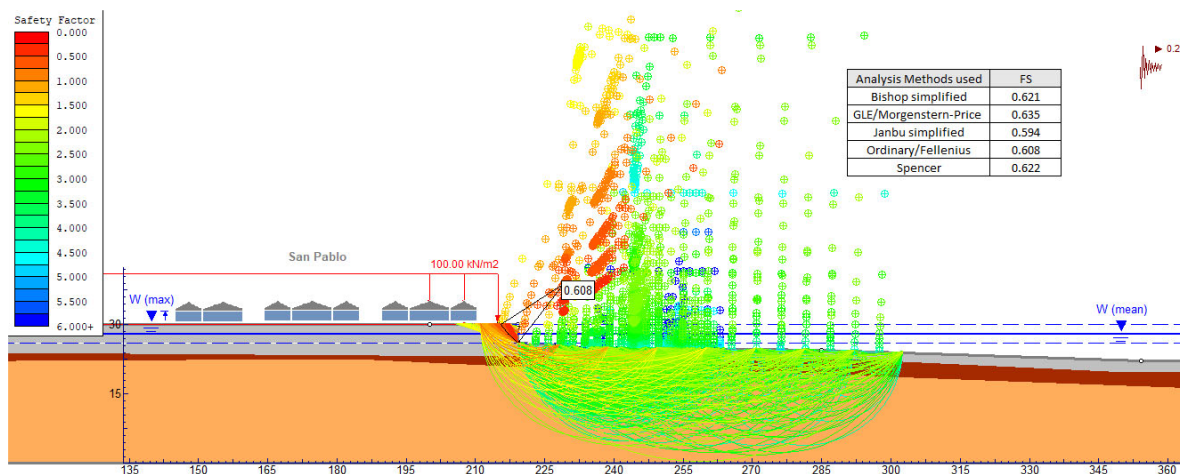


6.2.5 Modelo No. 4 Estabilidad inicial sin obras socavado, pseudo -estática

Se realizó un análisis con modelo de sección original en condiciones pseudo estáticas socavado, con análisis determinístico.

Figura 45.

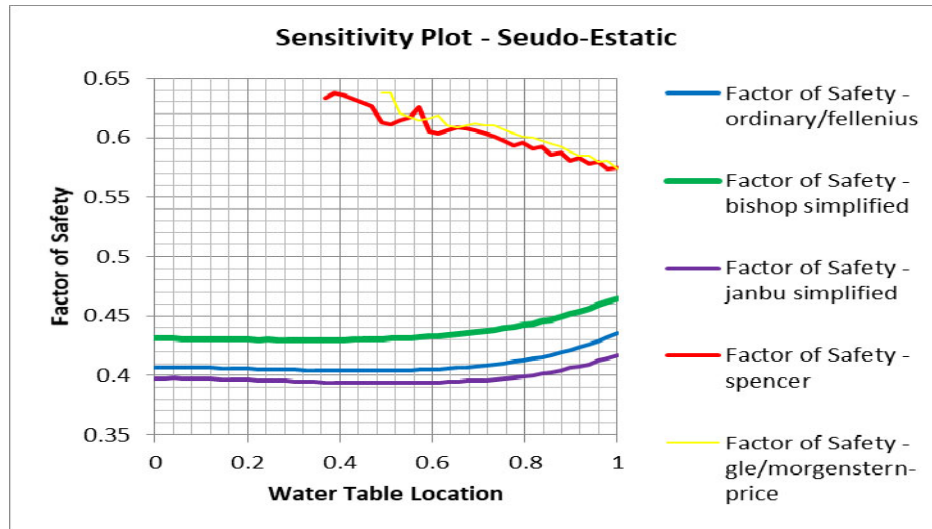
Análisis pseudo estático sección inicial socavada



Se evaluaron los cambios de factores de seguridad de acuerdo al análisis de sensibilidad de niveles máximos y mínimos de la lámina de agua.

Figura 46.

Factores de seguridad pseudo estáticos seccion socavada, análisis de sensibilidad nivel de agua.



6.2.6 Resultados modelación sección socavada, condiciones estática y pseudo estática

Se obtuvieron los siguientes factores de seguridad de los análisis de estabilidad inicial actual, en condiciones estática y pseudo estáticas.

Tabla 30.

Resultados modelación sección socavada, condiciones estática y pseudo estática

Método de Análisis	FS Estático	Fsbm (Diseño)	FS SeudoEstatico	Fsbm (Diseño)
Ordinary/Fellenius	0.58		0.40	
Bishop simplified	0.57	1.5 (N)	0.43	1.05 (N)
Janbu simplified	0.58		0.39	

Método de Análisis	FS Estático	Fsbm (Diseño)	FS SeudoEstatico	Fsbm (Diseño)
Spencer	0.67		0.57	
Gle/Morgenstern-price	0.61		0.57	

De este análisis inicial se determinó que los factores de seguridad, en sección socavados son inferiores a los mínimos permisibles, lo que indica que esta margen del río presenta problemas de inestabilidad debido a los cambios en la sección producidos por la socavación, para lo cual se proponen 2 alternativa.

6.2.7 Análisis de alternativas para el control de socavación y estabilidad

Como evidencian los analisis iniciales, la margen del río presenta problemas de inestabilidad asociados a la socavación y el nivel de la lamina de agua, por tal razón se analizan dos alternativas 1 y 2, para mejorar la estabilidad y controlar la socacacion lateral.

Alternativa 1

Consiste en un recubrimiento de la margen expuesta con muro pantalla de micro pilotes de 15 metros de profundidad, espaciado 4 metros.

Alternativa 2

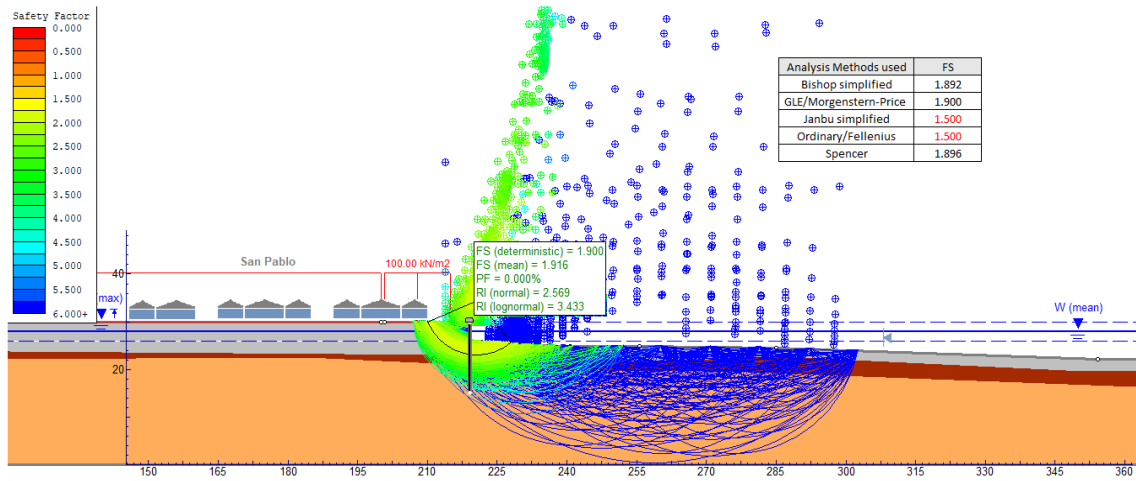
Muro bolsacreto escalonada, reforzado con dos filas de micropilotes de 5 y 7 metros de profundidad, espaciado 4 metros.

6.2.8 Modelo alternativa 1, análisis de estabilidad en condición estática

Se realizó un análisis con modelo de sección original con alternativa 1 en condiciones estáticas, con análisis determinístico.

Figura 47.

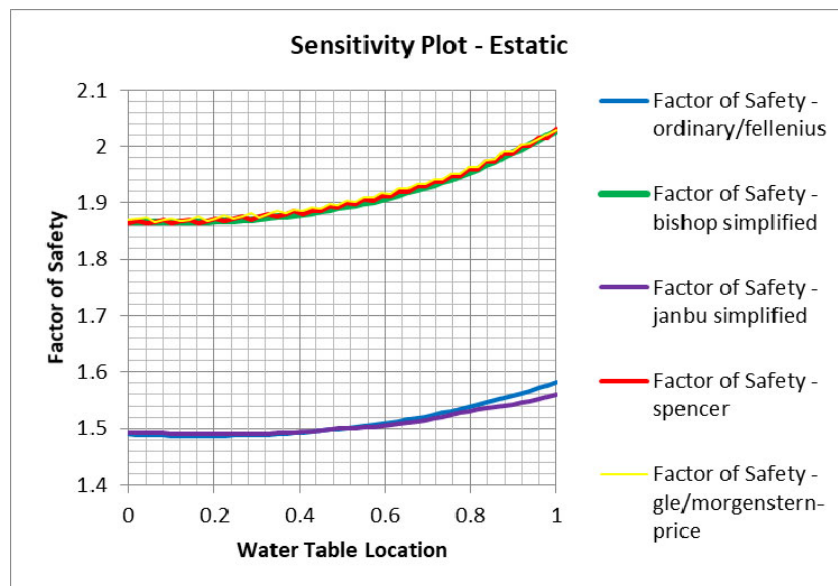
Análisis alternativa 1, condición estática



Se evaluaron los cambios de factores de seguridad de acuerdo al análisis de sensibilidad de niveles máximos y mínimos de la lámina de agua.

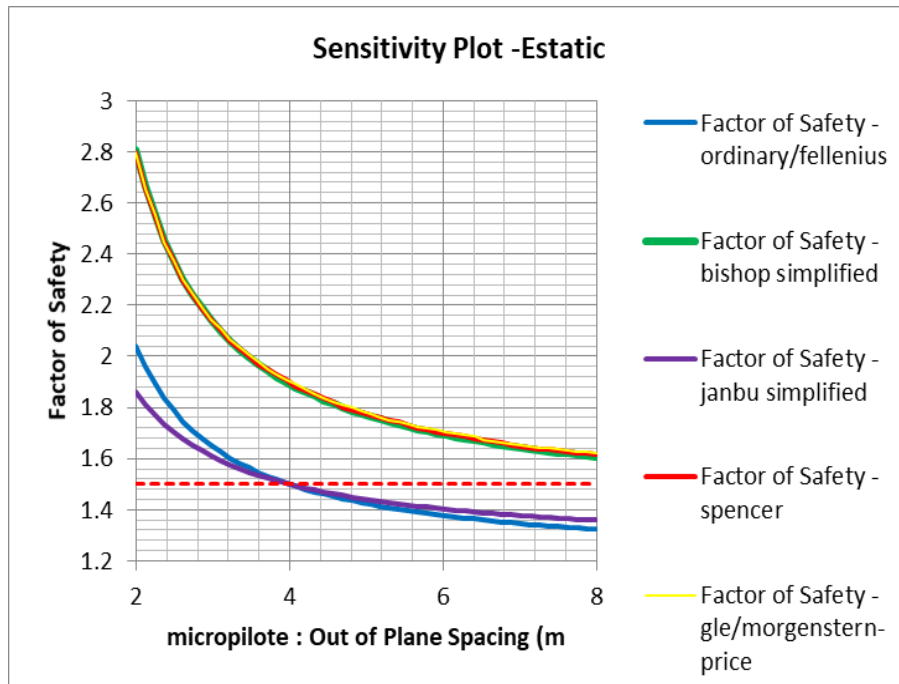
Figura 48.

Factores de seguridad estáticos, análisis de sensibilidad nivel de agua.



Se evaluaron los cambios de factores de seguridad de acuerdo al análisis de sensibilidad de espaciamiento entre pilotes.

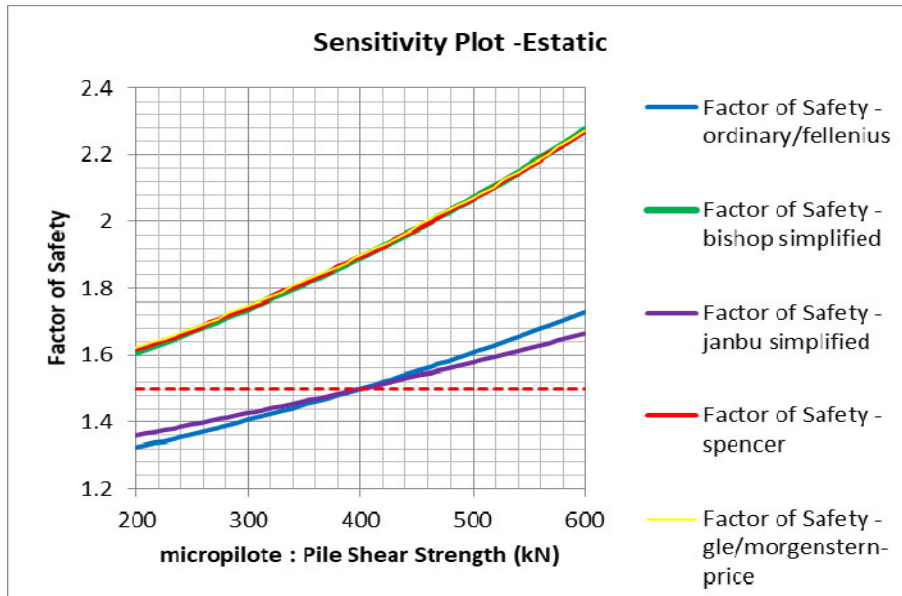
Figura 49. Factores de seguridad estáticos, espaciamiento entre pilotes.



Se evaluaron los cambios de factores de seguridad de acuerdo al análisis de sensibilidad del esfuerzo cortante del pilote.

Figura 50.

Factores de seguridad estáticos, esfuerzo cortante del pilote.

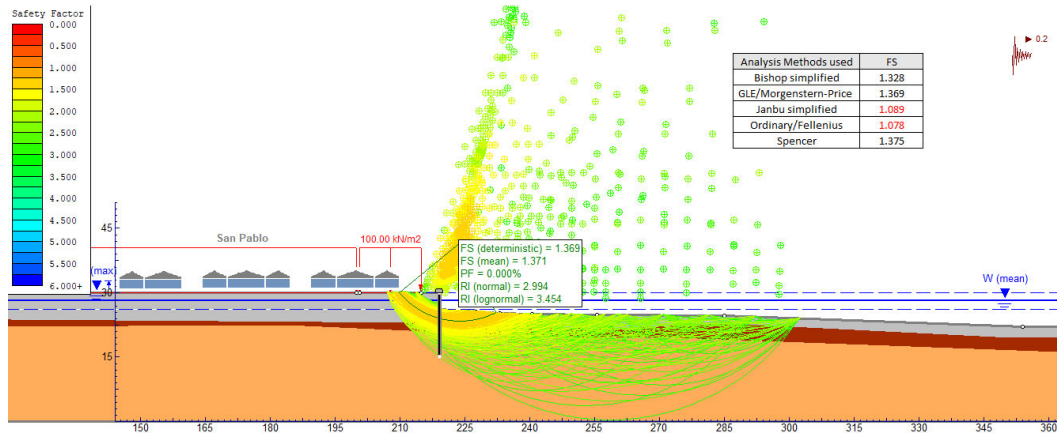


6.2.9 Modelo alternativa 1, análisis de estabilidad en condición pseudo-estático

Se realizó un análisis con modelo de sección original con alternativa 1 en condiciones pseudo-estático, con análisis determinístico.

Figura 51.

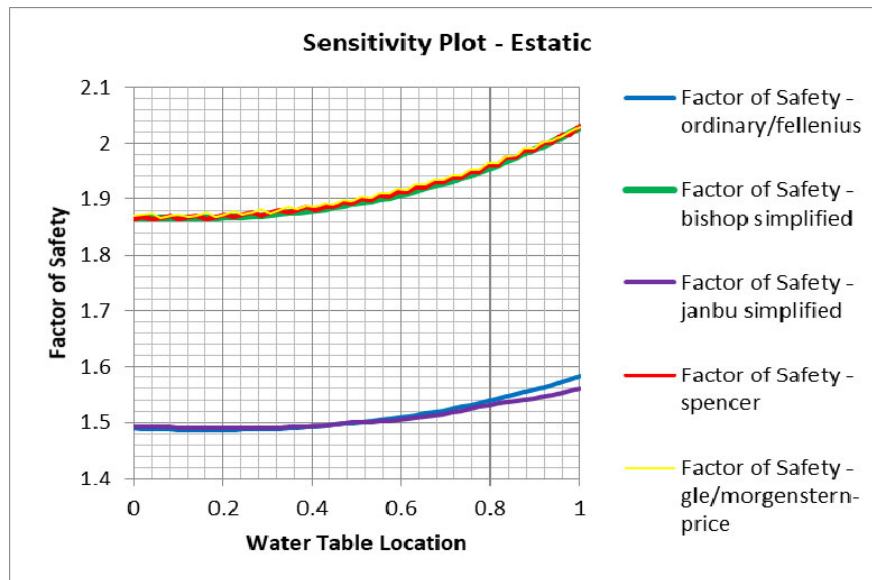
Análisis alternativa 1, condición pseudo-estática



Se evaluaron los cambios de factores de seguridad de acuerdo al análisis de sensibilidad de niveles máximos y mínimos de la lámina de agua.

Figura 52.

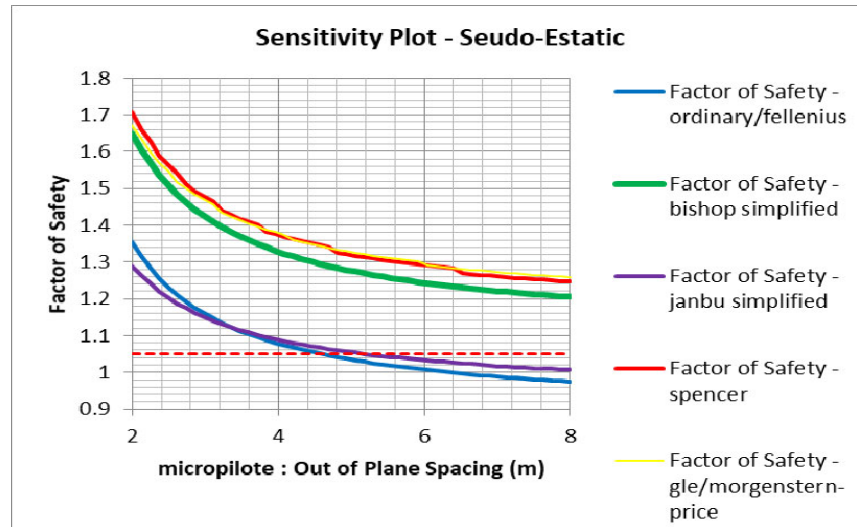
Factores de seguridad pseudo estáticos, análisis de sensibilidad nivel de agua.



Se evaluaron los cambios de factores de seguridad de acuerdo al análisis de sensibilidad de espaciamiento entre pilotes.

Figura 53.

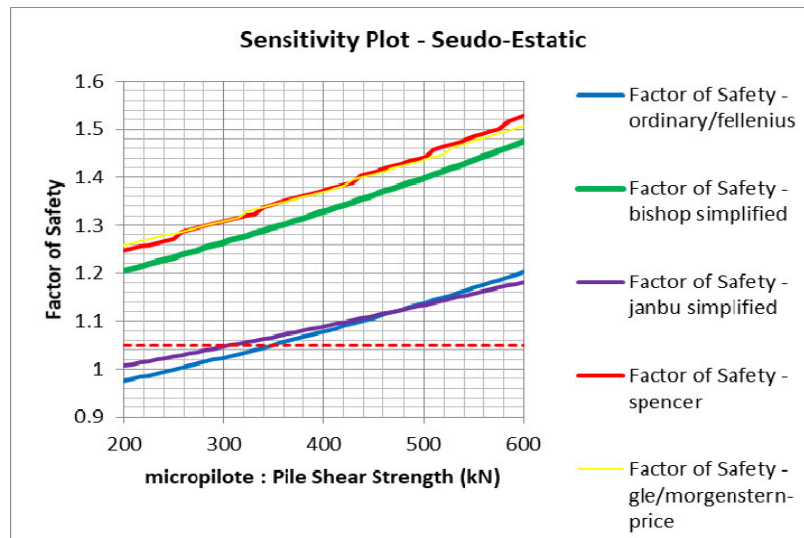
Factores de seguridad pseudo estáticos, espaciamiento entre pilotes.



Se evaluaron los cambios de factores de seguridad de acuerdo al análisis de sensibilidad del esfuerzo cortante del pilote.

Figura 54.

Factores de seguridad pseudo estáticos, esfuerzo cortante del pilote.



6.2.10 Resultados modelación alternativa 1, condiciones estática y pseudo estática

Se obtuvieron los siguientes factores de seguridad de los análisis de estabilidad en condiciones estática y pseudo estática.

Tabla 31.

Resultados modelación alternativa 1, condiciones estática y pseudo estática

Método de Análisis	FS Estático	Fsbm (Diseño)	FS Seudo-Estático	Fsbm (Diseño)
Ordinary/fellenius	1.5		1.08	
Bishop simplified	1.87		1.33	
Janbu simplified	1.5	1.5 (OK)	1.09	1.05 (OK)
Spencer	1.86		1.36	
Gle/morgenstern-price	1.87		1.37	

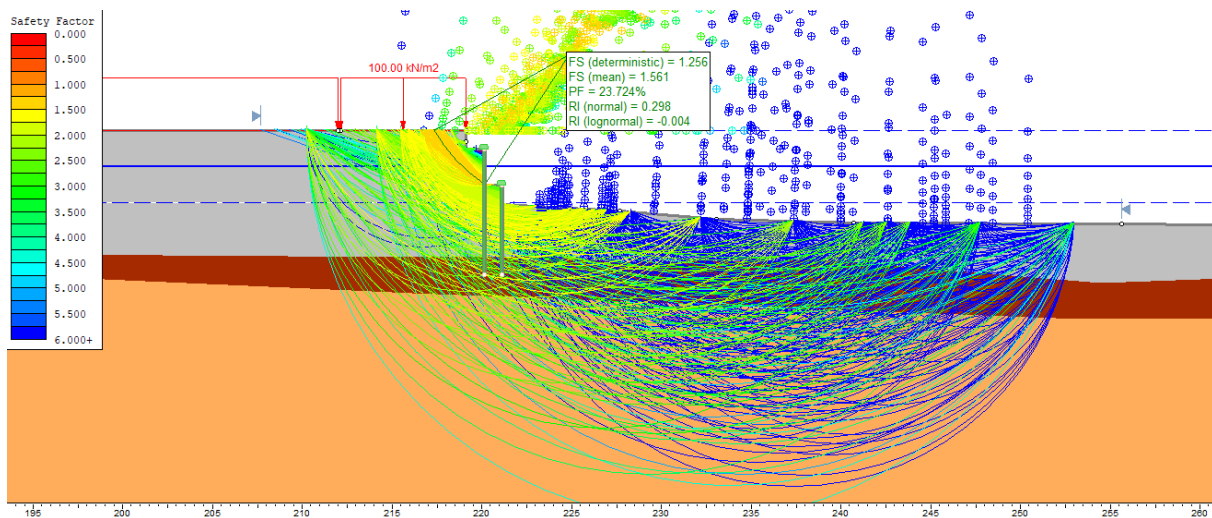
De este análisis se determinó que los factores de seguridad, en la alternativa 1 son superiores a los límites exigidos.

6.2.11 Modelo alternativa 2, análisis de estabilidad en condición estática

Se realizó un análisis con modelo de sección original con alternativa 2 en condiciones estáticas, con análisis determinístico.

Figura 55.

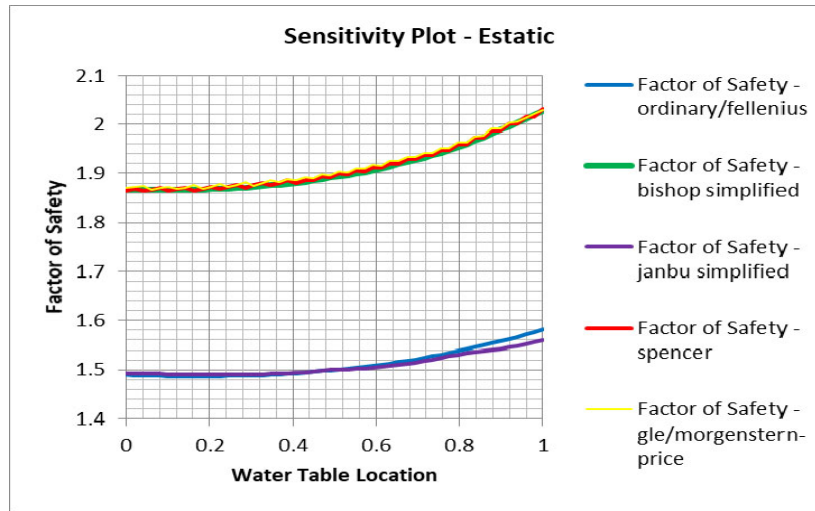
Análisis alternativa 2, condición estática



Se evaluaron los cambios de factores de seguridad de acuerdo al análisis de sensibilidad de niveles máximos y mínimos de la lámina de agua.

Figura 56.

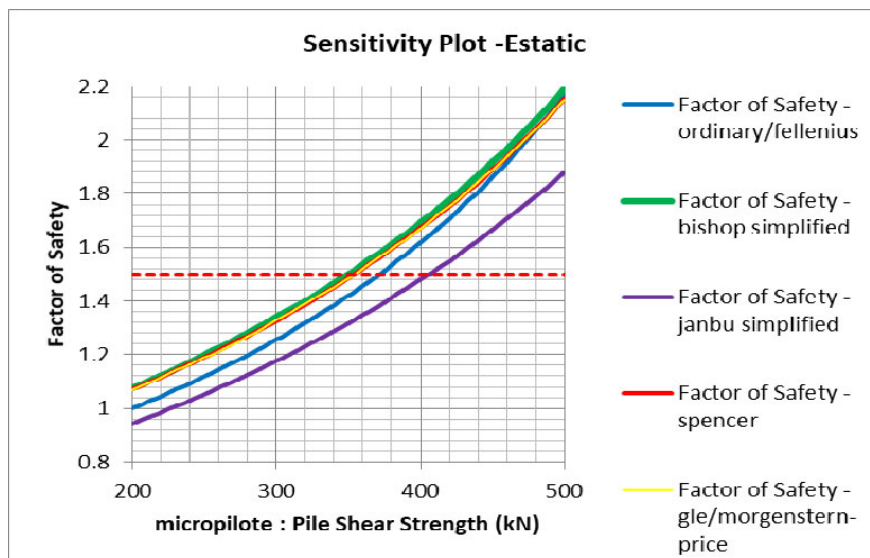
Factores de seguridad estáticos, análisis de sensibilidad nivel de agua.



Se evaluaron los cambios de factores de seguridad de acuerdo al análisis de sensibilidad del esfuerzo cortante del pilote.

Figura 57.

Factores de seguridad estáticos, esfuerzo cortante del pilote.

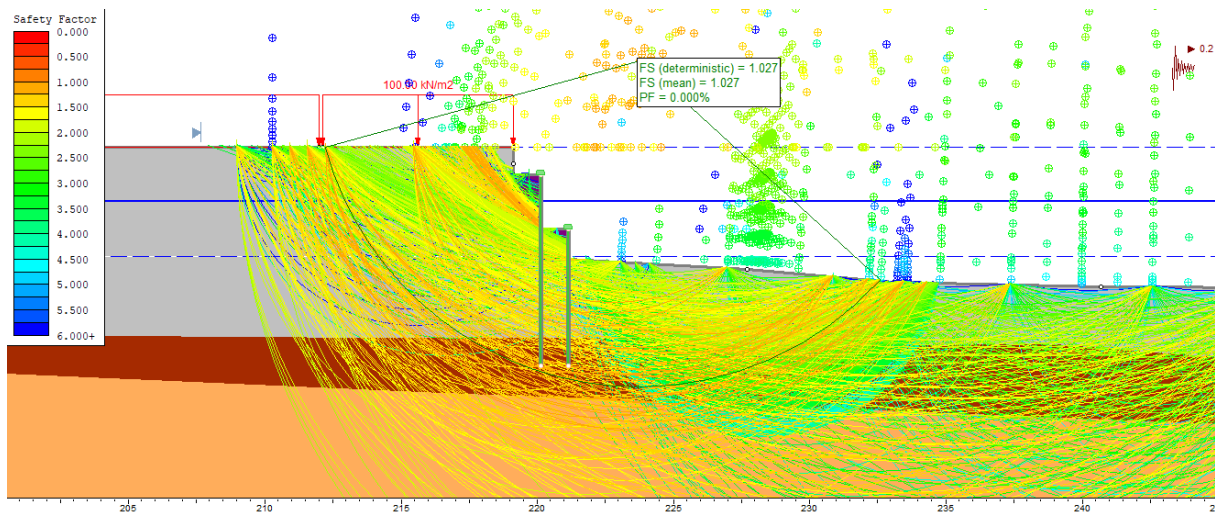


6.2.12 Modelo alternativa 2, análisis de estabilidad en condición pseudo-estático

Se realizó un análisis con modelo de sección original con alternativa 2 en condiciones pseudo-estático, con análisis determinístico.

Figura 58.

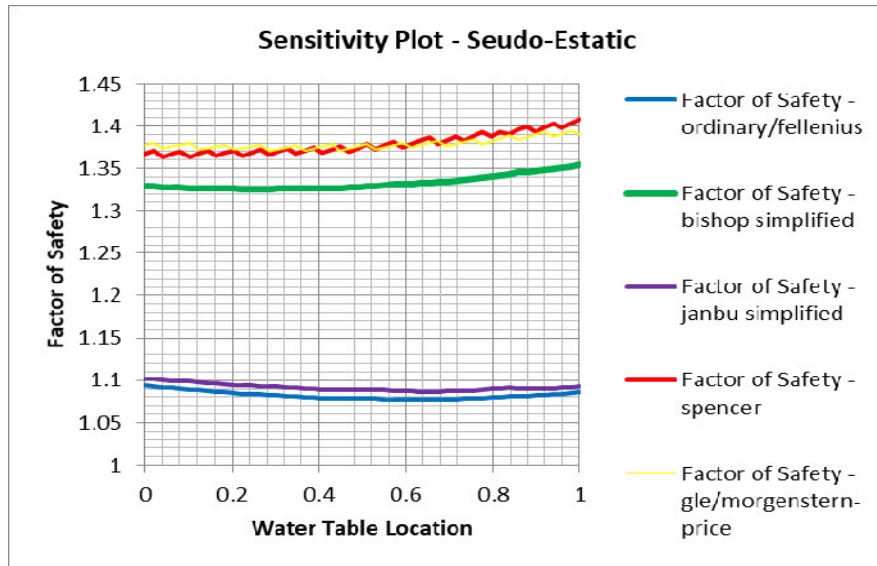
Análisis alternativa 2, condición pseudo-estática



Se evaluaron los cambios de factores de seguridad de acuerdo al análisis de sensibilidad de niveles máximos y mínimos de la lámina de agua.

Figura 59.

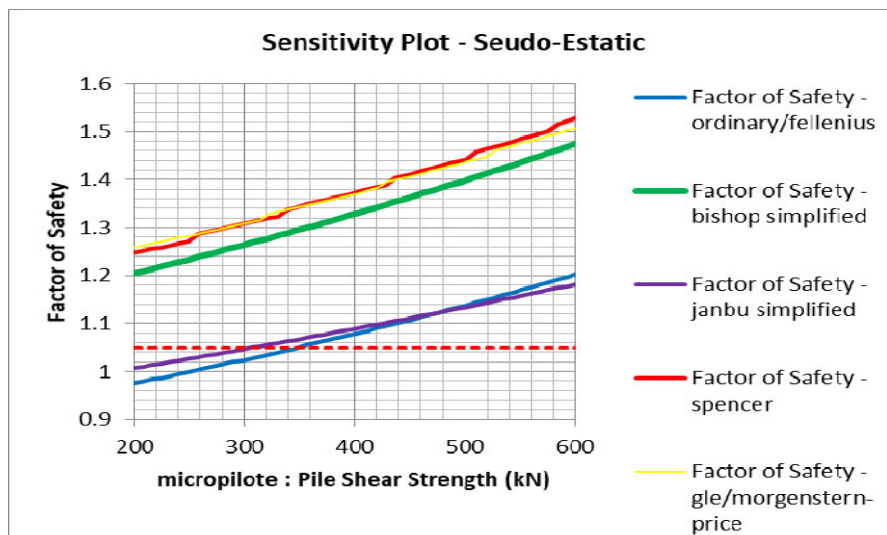
Factores de seguridad pseudo estáticos, análisis de sensibilidad nivel de agua.



Se evaluaron los cambios de factores de seguridad de acuerdo al análisis de sensibilidad del esfuerzo cortante del pilote.

Figura 60.

Factores de seguridad pseudo estáticos, esfuerzo cortante del pilote.



6.2.13 Resultados modelación alternativa 2, condiciones estática y pseudo estática

Se obtuvieron los siguientes factores de seguridad de los análisis de estabilidad en condiciones estática y pseudo estática.

Tabla 32.

Resultados modelación alternativa 2, condiciones estática y pseudo estática

Método de Análisis	FS Estático	Fsbm (Diseño)	FS Seudo-Estático	Fsbm (Diseño)
Ordinary/Fellenius	1.5		1.08	
Bishop simplified	1.87		1.33	
Janbu simplified	1.5	1.5 (OK)	1.09	1.05 (OK)
Spencer	1.86		1.36	
Gle/Morgenstern-price	1.87		1.37	

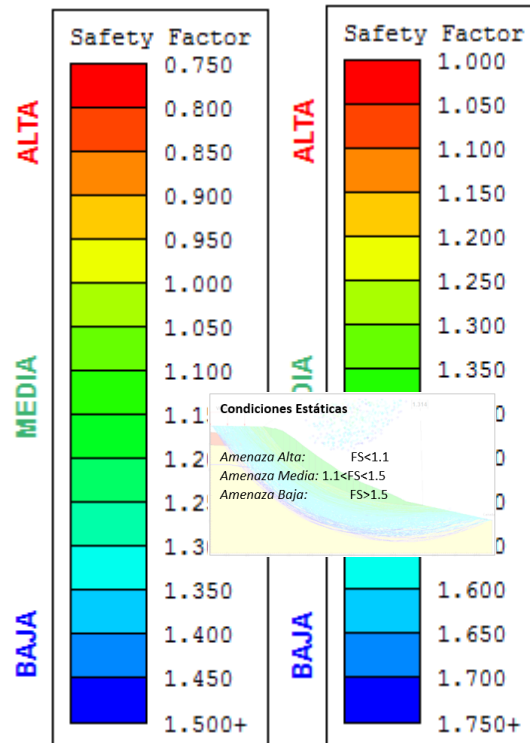
De este análisis se determinó que los factores de seguridad, en la alternativa 2 son superiores a los límites exigidos.

6.3 Análisis de Amenaza

Con el fin de identificar los niveles de amenaza en la orilla del muelle, se realizó un análisis de estabilidad mediante modelaciones de equilibrio Límite en estado estático, teniendo en cuenta las consideraciones estipulas en la Guía Metodológica para Estudios de Amenaza, Vulnerabilidad y Riesgo por Movimientos en Masa del Servicio Geológico Colombiano.

Las modelaciones se realizaron teniendo en cuenta la caracterización geotécnica obtenida de los ensayos realizados y con base en las formaciones geológicas identificadas en el sector.

Los factores de seguridad y el nivel de amenaza se tomaron con base en lo adoptado por el SGC, donde se establece:



Dentro de las características propias de las modelaciones se encuentran las consideraciones de las aguas subterráneas y las fuerzas desestabilizantes al borde del muelle.

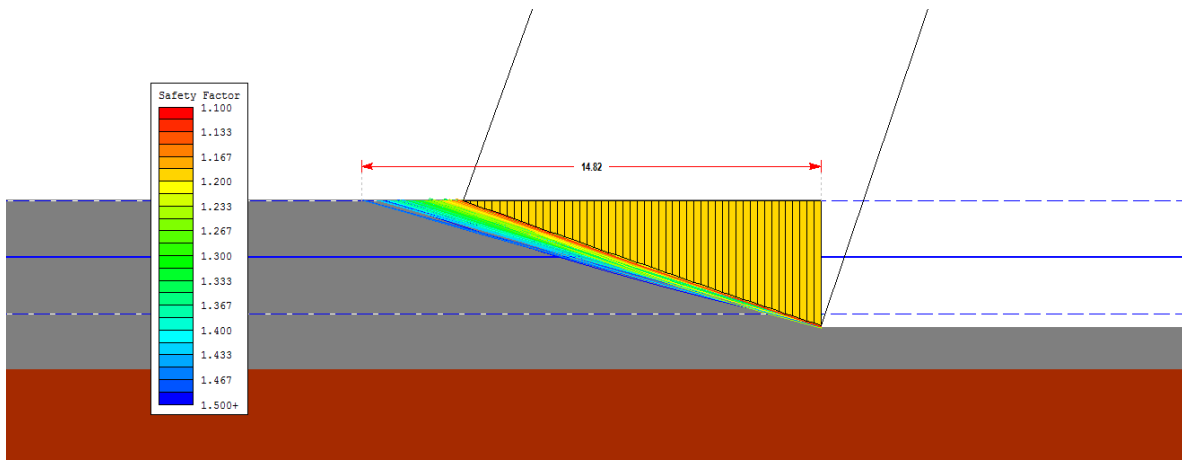
El análisis realizado fue en condiciones estáticas evaluando las superficies de fallas que generan factores de seguridad en los rangos establecidos por SGC.

Se analizaron diferentes secciones a lo largo del muelle del municipio de San Pablo, obteniendo las siguientes superficies.

Se realizaron cuatro modelos en diferentes tipos de secciones desde el K 3+000 hasta el K 6+000, espaciadas un kilómetro la una de la otra.

Figura 61.

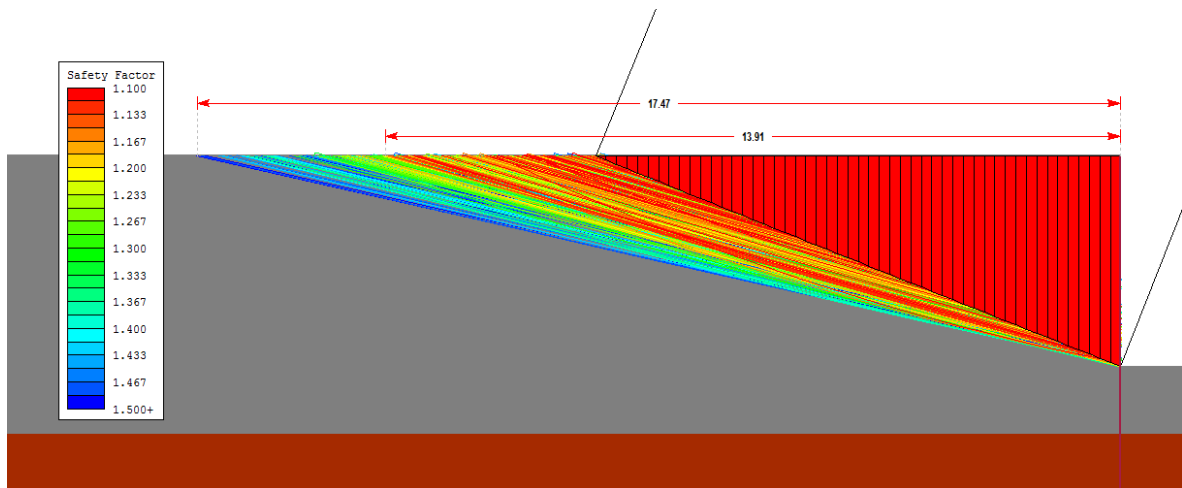
Sección K 3+000



Para este análisis la superficie de falla alcanza longitudes de 14.82 en la corona del talud con factores de seguridad entre 1.133 a 1.467.

Figura 62.

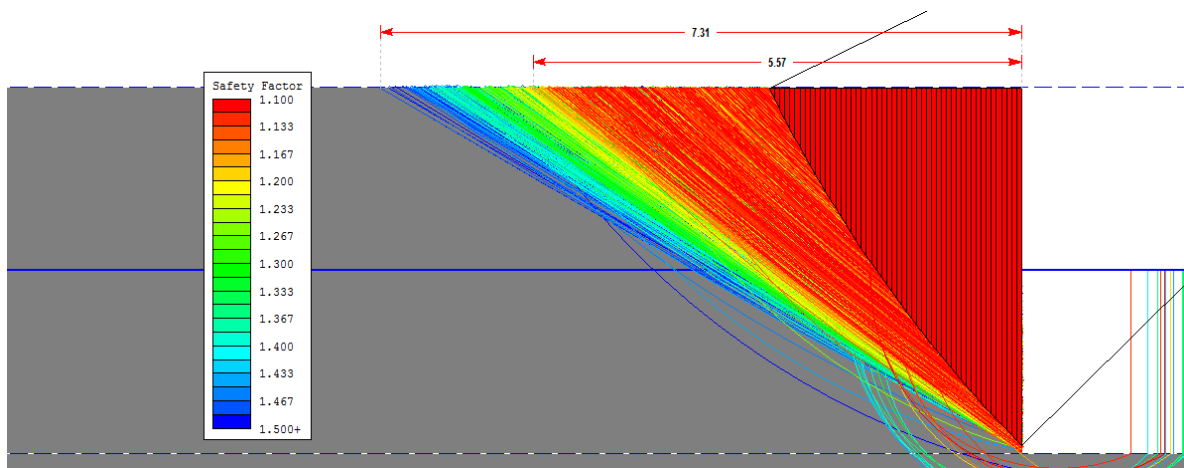
Sección K 4+000



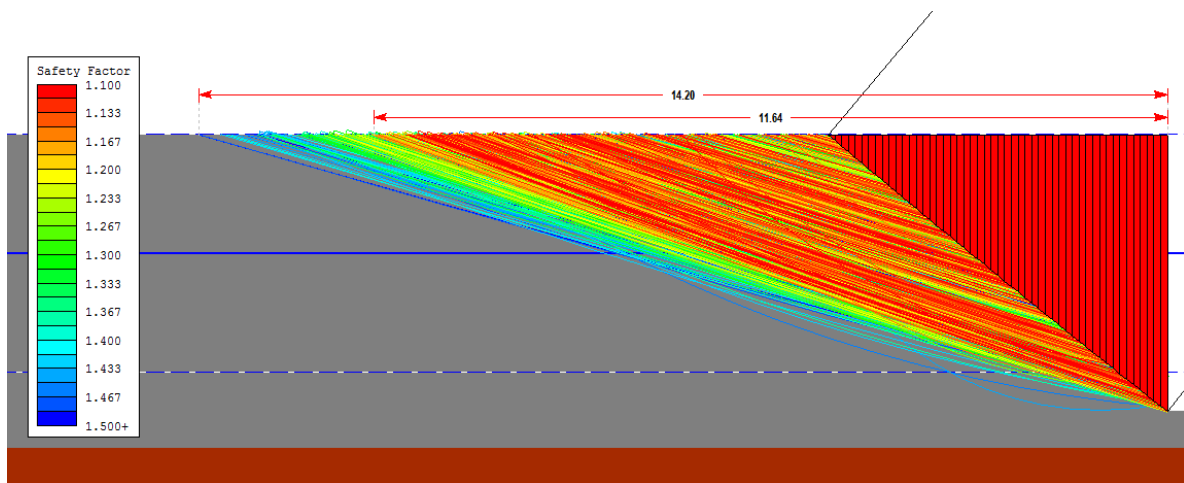
Para este análisis la superficie de falla alcanza longitudes de 13.91 en la corona del talud con factores de seguridad menores a 1.1 y una longitud entre (13.91 ;17.47) con factores de seguridad entre 1.1 y 1.500.

Figura 63.

Sección K 5+000



Para este análisis la superficie de falla alcanza longitudes de 5.57 en la corona del talud con factores de seguridad menores a 1.1 y una longitud entre (5.57 ;7.31) con factores de seguridad entre 1.1 y 1.500.

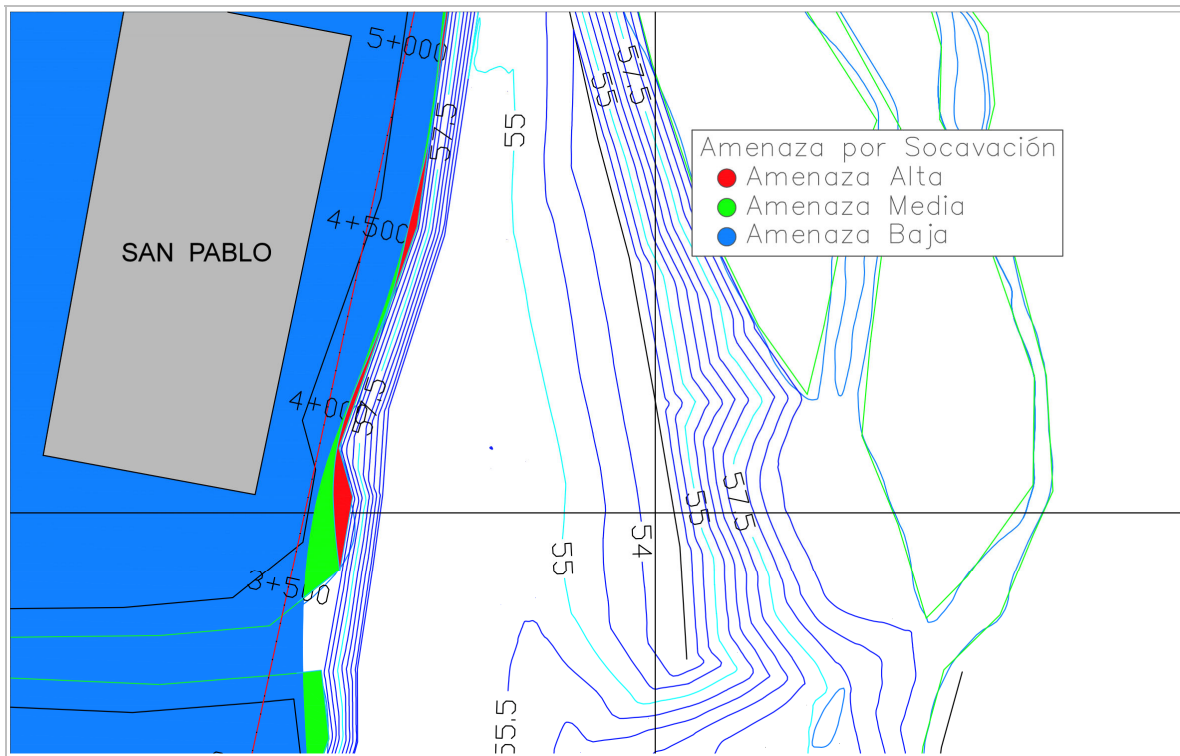
Figura 64.*Sección K6+000*

Para este análisis la superficie de falla alcanza longitudes de 11.64 en la corona del talud con factores de seguridad menores a 1.1 y una longitud entre (11.64 ;14.20) con factores de seguridad entre 1.1 y 1.500.

De acuerdo a lo anterior se logró identificar que el nivel de amenaza alta se localiza a una distancia máxima de 13 metros de la orilla del río, y la amenaza media a una distancia máxima de 17 metros. Ver Figura 65.

Figura 65.

Plano de zonificación de amenaza



7. Conclusiones

- Se define para el perfil de análisis tipo una estratigrafía conformada por 4 estratos, compuesto por un estrato inicial N°1 con espesor de 0.5 metros con clasificación limo arenoso, sobre el estrato N°2 de espesor 5 metros compuesto por grava arcillosa, seguido de el estrato N°3 de espesor 2.5 metros compuesto por arena arcillosa, al finalizar se encuentra el estrato n°4 compuesto por suelos areno arcillosos de la formación real, hasta profundidad máxima de exploración.

- Para un período de retorno de 100 años con caudal de 10028.87 m³/s, se obtuvo un nivel de cota máxima de inundación variable entre 62,65 y 66,52, con nivel de agua máxima en la sección crítica de 66,26 m, velocidad media del cauce 0.76 m/s y una profundidad de cauce máximo de 12.0 m.
- Comparando los análisis de estabilidad entre los modelos con sección natural y los modelos con sección socavada, se evidencian problemas de estabilidad debido a la socavación que origina el aumento en los caudales y velocidades de arrastre de partículas para los diferentes periodos de retorno.
- La mejor alternativa de mitigación, de la inestabilidad erosión y socavación, de acuerdo a los resultados de los modelos de estabilidad que dan como resultado factores de seguridad adecuados en cumplimiento con lo establecido por las normas vigentes, es la construcción de un muro sostenido por pilotes 15 metros de profundidad tipo tabla estaca espaciado cada 4 metros.
- Se puede identificar con el análisis de amenaza y plano de zonificación, que sobre la margen se encuentra zonificada en tres zonas, amenaza alta, media y baja, la amenaza alta se encuentra localizada en los primeros 5 metro desde el borde del talud, amenaza media entre 5 y 15 metros, amenaza baja a partir de los 15 metros en adelante.

Referencias Bibliográficas

- Alirío, C.E. (1991). *Geología y Geotecnia de la zona oriental del área metropolitana de Bucaramanga, sector Morrorico-Floridablanca*. Tesis de Grado. Bucaramanga, Santander, Colombia.
- ASTM D 653-01. (2003). *Standard Terminology Relating to Soil, Rock, and Contained Fluid*. p. 2.
- CDMB. (2005). *Amenaza de Inundación y Erosión en el río de Oro*. Bucaramanga.
- Crespo Villalaz. (2004). *Mecánica de suelos y Cimentaciones*. Limusa. México.
- Duque-Escobar, G. (2016). *Manual de Geología para Ingenieros*. Manizales.
- Indrajit Chowdhury & Shambhu P. Dasgupta. (2009). *Dinamics of Structure and Foundation*.
- Instituto Nacional de Vías. (2013). *Normas INV E-111-13. Ensayo compresión inconfinada en muestras de suelos*. Bogotá D.C.
- Instituto Nacional de Vías. (2013). *Normas INV E-125. Determinación del límite líquido de los suelos*. Bogotá D.C.
- Instituto Nacional de Vías. (2013). *Normas INV E-126. Límite plástico e índice de plasticidad de los suelos*. Bogotá D.C.
- Palacios, S.J. (1979). Energy dynamics of SPT. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*.
- Scott J.; Brandenberg, N.B. (2010). *Shear Wave Velocity as a Statistical Fuction of Standard Penetration Test Resistance and Vertical Effective Stress at Caltrans Bridge Sites*. Los Angeles: Peer.

Skempton, A.W. (1986). *Standar Penetration Test, procedures and the effects in sand of overburden pressure, relative density, particle size, ageing and over consolidation*. USA.

Ward, W.E. (1973). *Geología del Cuadrángulo H-12, Bucaramanga y H-13, Pamplona*. Bogotá.