

Medidas de mitigación al efecto de socavación que se presenta en el caño Buque, entre el puente ubicado en la vía Bogotá a 1km del túnel Buenavista al puente de la Av. 40 cerca de la Cll. 15, aplicando soluciones de ingeniería

Medidas de mitigación al efecto de socavación que se presenta en el caño Buque, entre el puente ubicado en la vía Bogotá a 1km del túnel Buenavista al puente de la Av. 40 cerca de la Cll. 15, aplicando soluciones de ingeniería



Por:

Yamid Castellanos Hernández

Facultad de Ingeniería Civil

Universidad Santo Tomás

Villavicencio,

Mayo

2018

Medidas de mitigación al efecto de socavación que se presenta en el caño Buque, entre el puente ubicado en la vía Bogotá a 1km del túnel Buenavista al puente de la Av. 40 cerca de la Cll. 15, aplicando soluciones de ingeniería

Proyecto de Investigación en Temas de Ingeniería Civil

Medidas de mitigación al efecto de socavación que se presenta en el caño Buque, entre el puente ubicado en la vía Bogotá a 1km del túnel Buenavista al puente de la Av. 40 cerca de la Cll. 15, aplicando soluciones de ingeniería

Trabajo de grado presentado como requisito para optar el título de **Ingeniero Civil**

Por:

Yamid Castellanos Hernández

Aprobado por:

Esp. Iván Darío Acosta Sabogal
Especialista en Recursos Hídricos

Director

Facultad de Ingeniería Civil

Universidad Santo Tomás

Villavicencio,

Mayo

2018

Medidas de mitigación al efecto de socavación que se presenta en el caño Buque, entre el puente ubicado en la vía Bogotá a 1km del túnel Buenavista al puente de la Av. 40 cerca de la Cll. 15, aplicando soluciones de ingeniería

AUTORIDADES ACADÉMICAS

P. FRAY JUAN UBALDO LÓPEZ SALAMANCA, O.P.

Rector General

P. FRAY MAURICIO ANTONIO CORTÉS GALLEGO, O.P.

Vicerrector Académico General

P. FRAY JOSE ARTURO RESTREPO RESTREPO, O.P.

Rector Sede Villavicencio

P. FRAY FERNANDO CAJICA GAMBOA, O.P.

Vicerrector Académico Sede Villavicencio

JULIETH ANDREA SIERRA TOBÓN

Secretaria de División Sede Villavicencio

Ph.D. JHON JAIRO GIL PELÁEZ

Decano Facultad de ingeniería civil

Medidas de mitigación al efecto de socavación que se presenta en el caño Buque, entre el puente ubicado en la vía Bogotá a 1km del túnel Buenavista al puente de la Av. 40 cerca de la Cll. 15, aplicando soluciones de ingeniería

NOTA DE ACEPTACIÓN

FIRMA JOHN JAIRO GIL PELÁEZ

Decano de Facultad

FIRMA IVÁN DARÍO ACOSTA SABOGAL

Director Trabajo de Grado

FIRMA GERMÁN ERNESTO CHICANGANA

jurado

Villavicencio, Mayo de 2018

Medidas de mitigación al efecto de socavación que se presenta en el caño Buque, entre el puente ubicado en la vía Bogotá a 1km del túnel Buenavista al puente de la Av. 40 cerca de la Cll. 15, aplicando soluciones de ingeniería

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a las personas que con su inteligencia, dedicación y esmero me han inculcado el ser de un ingeniero civil.

Medidas de mitigación al efecto de socavación que se presenta en el caño Buque, entre el puente ubicado en la vía Bogotá a 1km del túnel Buenavista al puente de la Av. 40 cerca de la Cll. 15, aplicando soluciones de ingeniería

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a las diferentes entidades que a lo largo del proyecto facilitaron la información requerida para poder llevar a cabo su desarrollo, a mi familia, por su comprensión y estímulo constante, además de su apoyo incondicional a lo largo de mis estudios, a mi director de tesis por toda su ayuda y orientación que ayudaron a que esta investigación se desarrollara de la manera correcta y a todas las personas que de una u otra forma me apoyaron en la realización de este proyecto.

RESUMEN

El caño Buque es un cuerpo hídrico ubicado en el municipio de Villavicencio. Este caño nace en el cerro de Buenavista al Noroccidente de Villavicencio y desemboca en el río Ocoa, luego de una trayectoria aproximada de 10 km. Este proyecto de investigación pretende identificar el fenómeno de socavación presentado por el caño Buque por medio de la modelación y simulación hidráulica de este cuerpo hídrico, buscando determinar las medidas de mitigación necesarias para frenar la degradación el terreno en los puntos críticos del tramo elegido, disminuyendo así el riesgo en las zonas que están ubicadas en el margen de la ladera del caño. El proyecto está comprendido en tres (3) fases: Fase uno (1) realizar la caracterización geomorfológica e hidrometeorológica de la cuenca caño Buque e identificar las características de la cuenca media caño Buque. Fase dos (2) realizar los cálculos, modelaciones, simulaciones y análisis pertinentes para identificar la socavación que aporta la cuenca y las medidas de mitigación para hacer frente a este fenómeno, salvaguardando las zonas que se encuentran dentro del margen de la ladera del caño. Y la fase tres (3) en la que se delimitará espacialmente la zona con la erosión aportada por el caño Buque, mediante la elaboración de mapas con la graficación de la socavación y las medidas a instaurar para su control.

Palabras Clave: Erosión, Fenómeno de Socavación, Hdrología, Obras de Mitigación.

ABSTRACT

The river Buque is a body of water located in the municipality of Villavicencio. This river is born in the hill of Buenavista at Northwest of Villavicencio and flows into the Ocoa River, after approximately 10 km of trajectory. This research project aims to identify the phenomenon of scouring presented by the river Buque by means of modeling and hydraulic simulation of this body of water, seeking to determine the mitigation measures necessary to stop the degradation of the land at the critical points of the chosen section, thus decreasing the risk in the zones that are in the margin of the slope of the river. The project is divided into three (3) phases: The phase one (1) is to Carry out the geomorphological and hydrometeorological characterization of the river Buque basin and identify the characteristics of the middle river Buque basin. The phase two (2) is to Carry out the calculations, modeling, simulations and relevant analyzes to identify the undermining provided by the basin and the mitigation measures to deal with this phenomenon, safeguarding the areas that are within the margin of the slope of the river. And the phase three (3) the area will be spatially delimited with the erosion contributed by the river Buque, through the elaboration of maps of the grading of the scour and the measures to be established for its control.

Key Word- Erosion, Scouring Phenomenon, Hydrology, Mitigation Works.

TABLA DE CONTENIDO

DEDICATORIA	5
AGRADECIMIENTOS	6
RESUMEN	7
ABSTRACT	8
TABLA DE CONTENIDO	9
TABLA DE FIGURAS	14
LISTADO DE TABLAS	16
LISTADO DE ANEXOS	18
Capítulo 1. INTRODUCCIÓN	19
1.1. Motivación y formulación del problema	20
1.2. Finalidad	22
1.2.1. Objetivo general	22
1.2.2. Objetivo específicos	22
1.3. Aportes del trabajo	22
Capítulo 2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA Y CIENTÍFICA	24
2.1. Marco teórico	24
2.1.1. Geomorfología	24
2.1.2. Erosión	25
2.1.2.1. Socavación	26
2.1.3. Medidas de mitigación	27
2.2. Marco legal	28
2.3. Estado del arte	29
Capítulo 3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	31
3.1. Geomorfología.	31

Medidas de mitigación al efecto de socavación que se presenta en el caño Buque, entre el puente ubicado en la vía Bogotá a 1km del túnel Buenavista al puente de la Av. 40 cerca de la Cll. 15, aplicando soluciones de ingeniería

3.1.1.	Área de drenaje	31
3.1.2.	Forma de la cuenca	31
3.1.2.1.	Elongación (E)	32
3.1.2.2.	Relación de circularidad (C)	32
3.1.2.3.	Índice de Gravelius (Kc)	32
3.1.2.4.	Densidad de drenaje	33
3.1.2.5.	Sinuosidad de la corriente	33
3.1.2.6.	Pendiente del cauce principal	34
3.1.2.7.	Tiempo de concentración	35
3.2.	Suelo de la cuenca	35
3.3.	Cobertura vegetal de la cuenca	36
3.4.	Clima de la cuenca	36
3.5.	Cálculo de caudal	37
3.5.1.	Curvas intensidad duración frecuencia (IDF)	37
3.5.2.	Hietogramas de precipitación de diseño mediante bloque alterno	38
3.5.3.	Número de curva – método soil conservations service (scs)	38
3.5.4.	Obtención del caudal con HEC – HMS	40
3.6.	Ecuación universal de pérdidas de suelo.	40
3.6.1.	Índice de erosión pluvial – R	41
3.6.2.	Índice de erodabilidad del suelo – K	42
3.6.3.	Factores topográficos l y s	43
3.6.3.1.	Factor L	44
3.6.3.2.	Factor S	45

Medidas de mitigación al efecto de socavación que se presenta en el caño Buque, entre el puente ubicado en la vía Bogotá a 1km del túnel Buenavista al puente de la Av. 40 cerca de la Cll. 15, aplicando soluciones de ingeniería

3.6.4.	Factor cobertura vegetal del suelo – C	46
3.6.5.	Factor de prácticas de conservación – P	47
3.7.	Socavación.	47
3.7.1.	Socavación en suelos cohesivos homogéneos – sección recta	49
3.7.2.	Socavación en suelos no cohesivos homogéneos – sección recta	51
3.7.3.	Socavación en suelos no homogéneos	53
3.7.4.	Socavación en suelos cohesivos homogéneos – sección curva	53
3.7.5.	Socavación al pie de estribos	54
3.8.	Obras de mitigación	57
3.8.1.	Empuje activo	58
3.8.2.	Empuje pasivo	59
3.8.3.	Factor de seguridad al deslizamiento	59
3.8.4.	Factor de seguridad al volcamiento	59
3.8.5.	Factor de seguridad de capacidad de carga	60
3.9.	Softwares.	61
3.9.1.	ArcGIS®	61
3.9.2.	HEC-RAS	61
3.9.3.	HEC-HMS	61
3.10.	Descripción de etapas y tareas	62
3.10.1.	Etapas 1 – caracterización	62
3.10.2.	Etapas 2 – cálculos y simulaciones	62
3.10.3.	Etapas 3 – entregables	63
Capítulo 4.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	64

Medidas de mitigación al efecto de socavación que se presenta en el caño Buque, entre el puente ubicado en la vía Bogotá a 1km del túnel Buenavista al puente de la Av. 40 cerca de la Cll. 15, aplicando soluciones de ingeniería

4.1. Geomorfología	64
4.2. Suelo de la cuenca.	65
4.3. Cobertura de la cuenca.	68
4.4. Climatología	70
4.4.1. Precipitación	70
4.4.2. Temperatura	71
4.4.3. Humedad relativa	72
4.4.4. Evaporación	73
4.5. Cálculo de caudal.	73
4.5.1. Curvas IDF	73
4.5.2. Hietograma unitario de precipitación por bloques alternos.	74
4.5.3. Número de curva.	75
4.5.4. Modelación en HEC-HMS para obtención de caudal.	75
4.6. Erosión (usle)	77
4.6.1. Factor R	77
4.6.2. Factor k	77
4.6.3. Factor ls	78
4.6.4. Factor C	79
4.6.5. Factor P	79
4.6.6. Erosión real	80
4.6.7. Erosión potencial	82
4.7. Socavación.	83
4.7.1. Sección 1 (recta)	84

Medidas de mitigación al efecto de socavación que se presenta en el caño Buque, entre el puente ubicado en la vía Bogotá a 1km del túnel Buenavista al puente de la Av. 40 cerca de la Cll. 15, aplicando soluciones de ingeniería

4.7.2.	Sección 2 (curva)	87
4.7.3.	Sección 3 (recta)	89
4.7.4.	Sección 4 (puente)	91
4.8.	Obras de mitigación	97
Capítulo 5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	101
CAPÍTULO 6.	BIBLIOGRAFÍA	103
ANEXOS		107

TABLA DE FIGURAS

Figura 1-1. Lluvias afectan estribo del puente de la Av. 40 Cerca de la Cll. 15.....	21
Figura 1-2. Daños ocasionados por el caño buque, gavión destrozado y árbol caído.....	21
Figura 2-1. Esquematzación del proceso de erosión causado por el agua.	26
Figura 2-2. Ubicación detallada. A partir de Imagen © 2017 Google Earth©.....	30
Figura 3-1. Patrones de cauces típicos.	34
Figura 3-2. Clasificación para la socavación general.....	48
Figura 3-3. Socavación general en cauces definidos.....	50
Figura 3-4. Método Artamanov, intercepción del flujo por los estribos dentro del canal...	56
Figura 3-5. Diagrama de fuerzas en un muro a gravedad.....	58
Figura 4-1. Mapa de localización de información geotécnica y exploraciones de campo de la ciudad de Villavicencio.	67
Figura 4-2. Mapa de isovalores de índice de homogeneidad promedio.	68
Figura 4-3. Mapa de Cobertura de suelo Caño Buque.	69
Figura 4-4. Diagrama porcentual de la cobertura del suelo.....	69
Figura 4-5. Valores promedio de Totales Mensuales de Precipitación.	70
Figura 4-6. Valores promedio de Máximos Mensuales de Precipitación.....	71
Figura 4-7. Valores promedio de Medios Mensuales de Temperatura.	71
Figura 4-8. Valores promedio Máximos Mensuales de Temperatura.	72
Figura 4-9. Valores promedio Mensuales de Humedad Relativa.....	72
Figura 4-10. Valores promedio Mensuales de Evaporación.	73
Figura 4-11. Curvas IDF para la estación del Aeropuerto Vanguardia.....	74
Figura 4-12. Hietograma Unitario de Precipitación.	74
Figura 4-13. Hidrograma sintético resultante.....	76
Figura 4-14. Mapa Factor de Erosividad R.	77
Figura 4-15. Mapa Factor de Erodabilidad K.....	78

Medidas de mitigación al efecto de socavación que se presenta en el caño Buque, entre el puente ubicado en la vía Bogotá a 1km del túnel Buenavista al puente de la Av. 40 cerca de la Cll. 15, aplicando soluciones de ingeniería

Figura 4-16. Mapa de los factores topográficos LS.	78
Figura 4-17. Factor de Cobertura de suelo C.	79
Figura 4-18. Factor de Prácticas de Conservación de suelo P.....	80
Figura 4-19. Mapa erosión cuenca Caño Buque.	81
Figura 4-20. Mapa erosión, zona de estudio.....	81
Figura 4-21. Mapa Erosión potencial de la cuenca Caño Buque.	82
Figura 4-22. Mapa Erosión potencial de la cuenca Caño Buque.	83
Figura 4-23. Mapa de ubicación, sección 1.	85
Figura 4-24. Sección 1, tramo recto.	85
Figura 4-25. Socavación presente en la sección 1.	86
Figura 4-26. Mapa de ubicación, sección 2.	87
Figura 4-27. Sección 2, curva con deslizamiento.....	88
Figura 4-28. Socavación presente en la sección 2.	88
Figura 4-29. Mapa de ubicación, sección 3.	89
Figura 4-30. Desprendimiento ocasionado por el flujo del caño Buque, sección 3.	90
Figura 4-31. Socavación en la sección 3.	91
Figura 4-32. Mapa de ubicación, sección 4.	92
Figura 4-33. Socavación en estribo del puente de la Av. 40 cerca a la calle 15.	92
Figura 4-34. Socavación en la sección 4.	93
Figura 4-35. Tipos de gavión empleados.	98
Figura 4-36. Sección 1, con gavión tipo A.....	99
Figura 4-37. Sección 2, con gavión tipo C.	99
Figura 4-38. Sección 3, gavión tipo B.....	100
Figura 4-39. Sección 4, puente Av. 40, gaviones tipo A y tipo B. Fuente: Autor	100

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1-1. Resultados Esperados su impacto.	23
Tabla 2-1. Obras de mitigación más comunes y sus usos.	27
Tabla 2-2. Normativa que rige para el presente proyecto.....	28
Tabla 3-1. Estaciones empleadas para la Caracterización Meteorológica.....	37
Tabla 3-2. Números de curva de escorrentía para usos selectos de tierra agrícola, suburbana y urbana (condiciones antecedentes de humedad II).	39
Tabla 3-3. Constantes para el factor "C" de acuerdo al tipo de cobertura del suelo.	46
Tabla 3-4. Constantes para el factor "P" de acuerdo a la clase de cobertura terrestre...47	
Tabla 3-5. Coeficiente de contracción μ	51
Tabla 3-6. Coeficiente epsilon para el cálculo de la socavación en curvas.	54
Tabla 3-7. Coeficiente P_{α} , en función del ángulo α que forma el eje de la obra en la dirección de la corriente.	56
Tabla 3-8. Coeficiente P_R , en función del talud R de los lados de la obra.	56
Tabla 3-9. Factores de seguridad para Estructuras de Contención.	57
Tabla 4-1. Resumen de parámetros geomorfológicos.	64
Tabla 4-2. Resumen de parámetros geomorfológicos para las subcuencas.....	65
Tabla 4-3. Características suelo tipo 1.....	66
Tabla 4-4. Características suelo tipo 2.....	66
Tabla 4-5. Cálculo del Número de Curva, cuenca Caño Buque.....	75
Tabla 4-6. Resultados HEC-HMS.	76
Tabla 4-7. Parámetros para el cálculo de socavación.	84
Tabla 4-8. Cálculo de socavación en la sección 1.....	86
Tabla 4-9. Cálculo de socavación en recta y curva sección 2.	88
Tabla 4-10. Cálculo de la socavación en Sección 3.	90

Medidas de mitigación al efecto de socavación que se presenta en el caño Buque, entre el puente ubicado en la vía Bogotá a 1km del túnel Buenavista al puente de la Av. 40 cerca de la Cll. 15, aplicando soluciones de ingeniería

Tabla 4-11. Cálculo de la socavación en terreno natural y estribos, Puente Av.40 Aguas arriba (sin puente).....	93
Tabla 4-12. Cálculo de la socavación en terreno natural y estribos, Puente Av.40 Aguas arriba (con puente).....	94
Tabla 4-13. Cálculo de la socavación en terreno natural y estribos, Puente Av.40 Aguas abajo (con puente).	95
Tabla 4-14. Cálculo de la socavación en terreno natural y estribos, Puente Av.40 Aguas abajo (sin puente)	96
Tabla 4-15. Características de las Arcillas (suelos cohesivos)	97
Tabla 4-16. Capacidad portante, cohesión y ángulo de fricción interna de los tipos de suelo de la cuenca caño Buque.	98

Medidas de mitigación al efecto de socavación que se presenta en el caño Buque, entre el puente ubicado en la vía Bogotá a 1km del túnel Buenavista al puente de la Av. 40 cerca de la Cll. 15, aplicando soluciones de ingeniería

LISTADO DE ANEXOS

Anexo A Regresión multitemporal, evidenciando crecimiento urbano en zonas aledañas al caño buque, elaborada a partir de imagen © 2018 CNES / AIRBUS	107
Anexo B Ubicación del tramo seleccionado y del caño buque. Elaborado a partir de IMAGEN © 2018 CNES / AIRBUS	108
Anexo C SOCAVACIÓN EN LOS PUENTES PRESENTES EN LA ZONA.	109
Anexo D Daños ocasionados en obras presentes en el cauce.....	126
Anexo E Mapa de factor de erosividad.	129
Anexo F Mapa de factor de erodabilidad.	129
Anexo G Mapa de factores topográficos.....	129
Anexo H Mapa de factor de cobertura de suelo.	129
Anexo I Mapa de factor de prácticas de conservación.....	129
Anexo J Mapa de erosión real cuenca caño Buque.....	129
Anexo K Mapa de erosión potencial cuenca caño Buque.....	129

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN

El caño buque es un cuerpo hídrico ubicado en el municipio de Villavicencio, que nace en el cerro de Buenavista al Noroccidente de Villavicencio y desemboca en el río Ocoa, luego de una trayectoria aproximada de 10 km [1] (ver Figura 1-1).

La socavación causada por el caño Buque representa una amenaza para la población aledaña a él, ya que dicho fenómeno puede llegar a desestabilizar el terreno y puede causar el colapso de las estructuras que están conformadas en la porción de terreno afectada. Para esto inicialmente se seleccionaron diez (10) puntos, situados en puentes que atraviesan este cuerpo hídrico, desde los cuales se hizo una observación del comportamiento del caño Buque que permitió elegir el tramo que va desde el puente ubicado en la vía Bogotá – Villavicencio, a 1 km del túnel Buenavista, al puente de la Avenida 40 cerca de la Calle 15. A este trayecto se le identificará la socavación, teniendo en cuenta puntos críticos en los que es más pertinente reducir este factor erosivo y determinando las medidas de mitigación más adecuadas u óptimas. Este tramo que está ubicado en la cuenca media caño Buque es delimitado así porque según lo observado en campo se espera que el comportamiento erosivo, la socavación, sea mayor que en la cuenca media por su alta pendiente que influye en una mayor velocidad la cual es un factor importante en este fenómeno, además de que según lo observado por regresión temporal (ver Anexo A) es una zona que se ha ido urbanizando con el paso de los años y a medida que esto pasa será más difícil instalar estas medidas de mitigación y representará un riesgo para la población.

En el presente estudio, se utilizó un Modelo de Elevación Digital (DEM) recuperado del satélite ALOS con resolución de pixel 12,5m x12.5m en el cual se abarcó la zona de estudio. Se hace la delimitación de la cuenca con ayuda de la información meteorológica y por medio de modelaciones se identifica el comportamiento del caño, identificando diversos factores importantes como la intensidad de caída de la precipitación por medio de la elaboración de curvas intensidad, duración, frecuencia (curvas IDF), los totales de precipitación para saber que caudal máximo que se manejará y junto con la batimetría del tramo del cuerpo hídrico a

analizar se podrá identificar qué medidas de mitigación son las pertinentes para hacer frente a la socavación que está detonando el caño y dando como resultado cartografía referente a dicho proceso de degradación del terreno en las áreas que están dentro del margen de la ladera del caño, antes y después de las medidas de mitigación.

1.1. Motivación y formulación del problema

El caño Buque maneja un caudal medio de 0.450 metros cúbicos por segundo [1] que se espera aumente frente a un evento extremo como ha sucedido en anteriores ocasiones, tal como a mediados del 2016, momento en el cual el caño Buque gracias a varias precipitaciones de gran intensidad se desbordó produciendo daños a las tuberías de aguas servidas dando como resultado inundaciones en las viviendas con derrumbes en distintos sectores de su cauce [2]. Estos daños (afectaciones) al aumentar el caudal del caño se deben a que en este momento, las partículas de agua adquieren una mayor velocidad y por ende una mayor energía cinética que al chocar con las laderas del mismo esta energía es “absorbida” por el terreno el cual sufre una desestabilización dando origen al fenómeno de socavación. También se debe tener en cuenta que no solo el agua del cuerpo hídrico tiene implicación en la socavación, también las gotas de lluvia caen con una energía cinética y tienen el mismo efecto desestabilizador. Esta socavación afecta de tal forma las laderas del caño que puede hacer que dichas laderas colapsen afectando las obras civiles ubicadas dentro del margen de la ribera del caño y en mayor medida a las personas que estén al momento del colapso.

Cuando el caño Buque se desbordó a mediados de 2016 se evidenció como las fuertes precipitaciones y su aporte a los cuerpos hídricos produjeron daños por erosión, que repercuten fuertemente en factores produciendo pérdidas económicas y afectaciones. [3], [4], [5], [6], [7], [8], [9]. En la Figura 1-1 y Figura 1-2 se observan afectaciones que se han presentado a lo largo del caño Buque, las cuales perturban a la población tanto de forma económica como social, la primera en el sentido de que los procedimientos que se deben hacer para poner en funcionamiento de nuevo un puente o una vía requieren de un capital no presupuestado, y la segunda se ve reflejada en la incomunicación de dos sectores dejando

damnificados. Por esto nos vemos en la medida de implementar obras civiles que mitiguen la socavación previniendo dichos problemas, lo que nos lleva a la pregunta que fundamenta esta investigación:

¿Qué obras civiles conseguirán la mayor mitigación frente a la socavación presente en el tramo elegido del caño Buque?



Figura 1-1. Lluvias afectan estribo del puente de la Av. 40 Cerca de la Cll. 15. Fuente: Autor.



Figura 1-2. Daños ocasionados por el caño buque, gavión destrozado y árbol caído. Fuente: Autor

1.2. Finalidad

Se proponen medidas de mitigación, en puntos críticos que afecten en gran medida el proceso erosivo generado en este tramo del caño, de tal forma que se reduzca en su mayoría el fenómeno de socavación teniendo la menor implicación en las construcciones aledañas. Lo cual de una forma más organizada y concisa se expresa en los siguientes objetivos:

1.2.1. Objetivo general

Determinar las obras de ingeniería a realizar para mitigar de manera óptima la socavación en los distintos puntos críticos en el trayecto que va desde el puente ubicado en la vía Bogotá – Villavicencio, a 1Km del túnel Buenavista, al puente que está situado en la avenida cuarenta (40) cerca de la calle quince (15), en la cuenca media caño Buque.

1.2.2. Objetivo específicos

1. Realizar la caracterización morfológica e hidrometeorológica de la cuenca alta-media caño Buque.
2. Modelar hidráulica e hidrológicamente el comportamiento del caño Buque.
3. Efectuar el estudio de la socavación en la cuenca media caño Buque en los puntos críticos.
4. Identificar medidas de mitigación óptimas frente a la socavación.

1.3. Aportes del trabajo

Tras el desarrollo de este proyecto de investigación se espera obtener los siguientes resultados, los cuales generaran distintos impactos y se pueden ver en la Tabla 1-1.

Medidas de mitigación al efecto de socavación que se presenta en el caño Buque, entre el puente ubicado en la vía Bogotá a 1km del túnel Buenavista al puente de la Av. 40 cerca de la Cll. 15, aplicando soluciones de ingeniería

Tabla 1-1. Resultados Esperados su impacto.

Resultado	Indicador	Impacto
Diagnóstico del comportamiento del caño Buque, frente a precipitaciones de gran magnitud, de acuerdo a datos históricos e información de campo.	Informe	Académico: Implementación en futuros proyectos constructivos en las laderas del caño buque así como proyectos de investigación sobre la misma temática.
Diagnóstico de socavación por medio de la modelación y simulación hidráulica e hidrológica del caño Buque.	Informe - Cartografía	Social: La población que se encuentra en el margen de la ribera del caño Buque al tener conocimiento de las medidas de mitigación adecuadas para hacer frente a la socavación podrá adoptar medidas frente a este fenómeno de la manera adecuada.
Propuesta de medidas de mitigación óptimas que hagan frente al fenómeno de socavación.	Informe	Económico: En caso de que sea tomado este estudio como referente para la ejecución de medidas de mitigación se estaría ayudando a evitar futuros desastres, que representarían pérdidas económicas.

Fuente: Autor.

Capítulo 2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA Y CIENTÍFICA

Villavicencio cuenta con un estudio realizado por CORMACARENA donde se caracteriza la cuenca caño Buque, sin embargo en este estudio no se tiene en cuenta el proceso erosivo que aporta, fenómeno que necesario determinar y/o identificar lo más rápido posible.

2.1. Marco teórico

En la formulación de obras de mitigación a la socavación, se deben conocer los factores implicados, no sin antes tener claros algunos conceptos como qué es la geomorfología de una cuenca y que implicaciones tiene dentro de esta; debemos conocer todo lo que hace que se genere pérdida de suelo o simplemente que ocasiona que se debilite este. En otras palabras, conocer qué es la erosión y cómo se desarrolla a lo largo del tiempo, así como también que la desencadena y su “evolución” a socavación. Así mismo debe saberse que obras de mitigación son y han sido las más eficientes para luego determinar cuál es la adecuada.

2.1.1. Geomorfología

La geomorfología es la disciplina que pretende determinar rasgos de la superficie terrestre a partir de patrones comunes, en el caso de las corrientes de agua sucede lo mismo, ayudando a caracterizar las cuencas y así predecir su comportamiento a futuro de acuerdo a parámetros que se han ido instaurando a lo largo del tiempo. Esto es importante ya que “los cauces naturales cambian frecuentemente de posición, al tiempo que modifican su pendiente, dimensiones y sus patrones” [10].

2.1.2. Erosión

La erosión es un proceso mediante el cual Se trasladan fragmentos o partículas minerales derivadas de la desintegración del macizo rocoso por efecto de la meteorización. Otra forma de verlo sería como la degradación del suelo por un agente natural o antrópico que hace que se pierda parte de este. Ocurre de forma natural cuando el suelo está expuesto a la acción constante del agua, el viento o algún agente químico, o de forma antrópica por la incidencia de las distintas actividades que realiza el hombre que hacen que se cambie la dinámica hídrica o por el manejo del suelo para construcción de infraestructura.

De acuerdo a [11] “La erosión del suelo se reduce a tres fases: Desprendimiento/arranque, transporte y posterior sedimentación del material removido” siendo el primero en el que nos centraremos y el cual en su inicio se creía que solo era el resultado del impacto de la lluvia sobre el suelo pero que con el tiempo se ha evidenciado que también se da a consecuencia del viento o por la dinámica fluvial de los cuerpos hídricos y considerándose también el esfuerzo cortante que provoca el flujo superficial del agua, el cual si es muy grande llegando a superar la resistencia cohesiva del suelo hará que se presente el desprendimiento de tierra [12].

Hay distintos tipos de erosión en los que se pueden encontrar la erosión por salpicadura, laminar, en surcos y en cárcavas.

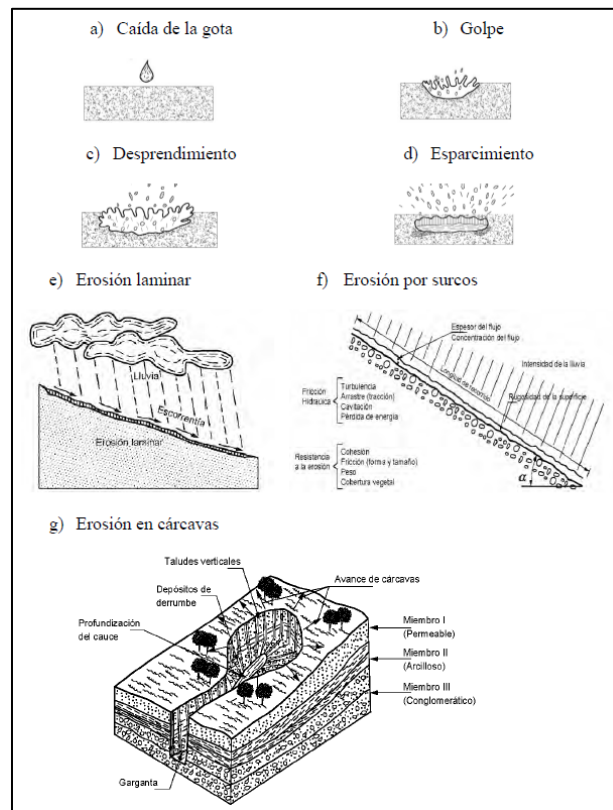


Figura 2-1. Esquematización del proceso de erosión causado por el agua. Fuente: [13]

2.1.2.1. Socavación

“La socavación es el resultado de la acción erosiva del flujo de agua que arranca y acarrea material de lecho y de las bancas de un cauce, convirtiéndose en una de las más comunes de falla en puentes.” [14] También otra definición apropiada es: “La socavación se define como el descenso del fondo de un río cuando se presenta una creciente debido al aumento de la capacidad de arrastre de material sólido de la corriente, a consecuencia del aumento de la velocidad.” [10] Este fenómeno se presenta con mayor frecuencia al momento de una creciente o por la construcción de distintas obras dentro del cauce y se determina principalmente por las características hidráulicas del cauce, las propiedades de los sedimentos del fondo y la forma y la localización de los elementos que la inducen, cabe aclarar que la socavación en el lecho del río por lo general es “recuperable”, ya que después

de que pasa la avenida torrencial o se elimine el factor detonante de la socavación, comúnmente se vuelven a depositar sedimentos y se vuelve a recuperar el fondo [13]. Lógicamente esto no se espera para la socavación que se da en las bancas del cauce o socavación, la cual por lo general tiende a afectar drenajes de bajo gradiente cuando se cuenta con una socavación evolucionada, y el cauce no tiene pendientes mayores al 2%, es decir en lugares de muy baja pendiente con ángulos menores a 10°, en los que se puede decir que la energía del cauce se aprovecha en la expansión del canal [15].

2.1.3. Medidas de mitigación

Las medidas de mitigación son aquellas designadas para hacer frente al fenómeno de socavación, buscando disminuirlo al mínimo posible, logrando así que la socavación en las laderas del cuerpo hídrico no se desarrolle y decante en una avalancha u otro desastre. Para mitigar estos fenómenos se construyen distintas obras de ingeniería como lo son diques, obras de protección de márgenes, obras de control de fondo, entre otros y su ejecución varía de acuerdo al cauce, a los sedimentos manejados por el cuerpo hídrico, a su flujo y demás (ver Tabla 2-1).

Tabla 2-1. Obras de mitigación más comunes y sus usos.

OBRA DE MITIGACIÓN	DESCRIPCIÓN
Diques en piedra con ligante en concreto	Se aplican en cauces permanentes y con unas condiciones de resistencia del suelo de fundación aceptables y una buena consolidación, no suelen superar los 3m de altura.
Diques en Gaviones	Se aplican a cauces de alto aporte de sedimentos, para corregir cauces poco contaminados, por lo general son de sección rectangular y son revestidos en concreto para aumentar su vida útil.
Diques en Concreto Reforzado	Se aplican donde hay mayores empujes por flujos y su localización debe ser cuidadosa, debe tener obras complementarias diseñadas con el fin de garantizar su estabilidad frente a la socavación. Se utilizan en la corrección de cauces.
Diques de madera	Son de carácter temporal que sirven para el control de fondo de cauces pequeño o intermitentes con el fin de permitir el desarrollo de cobertura vegetal.

Medidas de mitigación al efecto de socavación que se presenta en el caño Buque, entre el puente ubicado en la vía Bogotá a 1km del túnel Buenavista al puente de la Av. 40 cerca de la Cll. 15, aplicando soluciones de ingeniería

OBRA DE MITIGACIÓN	DESCRIPCIÓN
Diques de mampostería en seco	Por lo general se emplean en terrenos que tienen un suelo de fundación débil y de baja resistencia, frecuentemente se emplean en líneas de drenaje y cauces secundarios con bajos caudales y alta producción de sedimentos.
Obras de protección de márgenes	Utilizados para proteger los taludes laterales que conforman las márgenes de los cauces permanentes contra la socavación, En tramos rectos la protección es necesaria en ambas orillas, en las curvas solamente la orilla exterior.
Obras de Control de fondo	Su propósito es fijar el lecho del cauce a un nivel predeterminado e impedir la profundización del fondo de corrientes de agua permanentes.

Fuente: Autor, recopilando información de: [16]

2.2. Marco legal

Toda la normativa concerniente o que podría tener relevancia en la realización del proyecto se encuentra compactada en la Tabla 2-2. La cual está compuesta de leyes, decretos y resoluciones ambientales y de planeación que afectan en cierta medida la ubicación construcción de obras de mitigación en cauces.

Tabla 2-2. Normativa que rige para el presente proyecto.

NORMATIVA	DESCRIPCIÓN
Decreto 2811 de 1974	Por el cual se dicta el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente.
Ley 9 de 1989	Por la cual se dictan normas sobre planes de desarrollo municipal, compraventa y expropiación de bienes y se dictan otras disposiciones.
Ley 1319 de 1993	Por el cual se reglamenta la expedición de Licencias de Construcción, Urbanización y Parcelación y de los Permisos de que trata el Capítulo VI de la Ley 9a. de 1989
Ley 99 de 1993	Por la cual se crea el MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE, se reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental - SINA - y se dictan otras disposiciones.

Medidas de mitigación al efecto de socavación que se presenta en el caño Buque, entre el puente ubicado en la vía Bogotá a 1km del túnel Buenavista al puente de la Av. 40 cerca de la Cll. 15, aplicando soluciones de ingeniería

NORMATIVA	DESCRIPCIÓN
Ley 491 de 1999	Por el cual se reglamenta el Título VIII de la Ley 99 de 1993 sobre Licencias Ambientales.
Resolución 541 de 1994	Por medio de la cual se regula el cargue, descargue, transporte, almacenamiento y disposición final de escombros, materiales, elementos, concretos y agregados sueltos, de construcción, de demolición y capa orgánica, suelo y subsuelo de excavación.
Decreto 1180 de 2003	Por el cual se reglamenta el Título VIII de la Ley 99 de 1993 sobre Licencias Ambientales
Decreto 3573 de 2011	Por el cual se crea la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales –ANLA - y se dictan otras disposiciones.

Fuente: Autor

2.3. Estado del arte

“El caño Buque nace en el cerro de Buenavista, localizada en la cordillera Oriental, a una altura de 1200 msnm, para luego cruzar en su parte media baja la ciudad de Villavicencio y desembocar en el río Ocoa, a una altura aproximada de 400 msnm”. [1]

En su recorrido lo podemos subdividir la cuenca caño Buque en tres (3): La cuenca alta, media y baja del Caño Buque. Para el presente estudio, basándonos en observaciones hechas y la regresión temporal del Anexo A, se eligió un tramo que está en la cuenca media y se caracteriza por tener una disminución en cuanto a fauna y vegetación debido a que comienza la parte urbana y posee un clima cálido. [1]

Medidas de mitigación al efecto de socavación que se presenta en el caño Buque, entre el puente ubicado en la vía Bogotá a 1km del túnel Buenavista al puente de la Av. 40 cerca de la Cll. 15, aplicando soluciones de ingeniería



Figura 2-2. Ubicación detallada. A partir de Imagen © 2017 Google Earth© Fuente: Autor.

También se cuenta con información como que la precipitación para la cuenca media caño Buque es de 3.800 mm siendo esta inferior a la precipitación promedio de la cuenca caño Buque, sin embargo también cabe destacar que la vegetación en la cuenca media comienza a disminuir, con respecto a la de la cuenca alta, debido a que comienza la parte urbana lo cual hace que el fenómeno erosivo sea mayor [1]. Además de acuerdo a un perfil hecho en Google Earth© se inicia el tramo elegido con una altura de 587m y se finaliza en una altura de 468m al recorrer 2.37 km y teniendo así una pendiente de 5.2% la cual está por encima de la pendiente propicia para que se dé a cabalidad este fenómeno y de la pendiente predominante para este cuerpo hídrico que se encuentra entre 0% - 3%, lo cual es tanto negativo como beneficioso ya que uno de los factores detonantes de este fenómeno es que el agua lleve una gran energía dinámica y esto se consigue con una alta pendiente. En cuanto a la geología de la cuenca caño Buque tenemos que la formación que se presenta con mayor predominancia es el cuaternario coluvial (Qc), la cual ocupa el 46% de la cuenca y se encuentra en la parte media y baja de la cuenca.

Capítulo 3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

3.1. Geomorfología.

3.1.1. Área de drenaje

El área de drenaje es una de las características más importante de las cuencas, debido a que esta área determina la cantidad de agua recogida por la cuenca. Generalmente, el área de drenaje se mide en hectáreas o en kilómetros cuadrados. Dentro de las mismas condiciones geológicas y ambientales, la escorrentía es proporcional al área drenada. [13] Por lo general se obtiene por medio de planos topográficos haciendo mediciones y mirando las cotas más altas que la rodean o delimitan, sin embargo para este estudio se hizo por medio del procesamiento en el software ArcGIS 10.2.2 ® de un DEM 12.5mx12.5m Alos Palsar combinado con los puntos GPS tomados en campo.

3.1.2. Forma de la cuenca

“La forma de una cuenca hidrográfica se define a partir de su configuración en planta y permite evaluar cómo es la escorrentía por el cauce principal, desde la parte alta de la cuenca hasta la desembocadura” [10]. Ya que resulta difícil su evaluación a partir de un solo parámetro, es frecuente evaluar la forma de la cuenca a partir de parámetros como la elongación (E), la relación de circularidad (C) y el índice de Gravelius o coeficiente de compacidad (Kc).

3.1.2.1. Elongación (E)

Se define como la relación entre el diámetro de un círculo de área igual al área de la cuenca (A) y la longitud de la cuenca (L), que se define como la longitud de una línea recta entre el nacimiento y la desembocadura, de tal forma que:

$$E = 1.128 \frac{\sqrt{A}}{L} \quad (\text{Ecuación 1})$$

La elongación toma como valor máximo 1 si la cuenca es circular y disminuirá en la medida en que la cuenca sea más alargada.

3.1.2.2. Relación de circularidad (C)

Es el cociente entre el área de la cuenca y la del círculo cuyo perímetro es igual al de la cuenca, es decir:

$$C = \frac{4\pi A}{P^2} \quad (\text{Ecuación 2})$$

Valor máximo es 1 para una cuenca circular y disminuirá en la medida en que la cuenca se hace más alargada.

3.1.2.3. Índice de Gravelius (Kc)

Es la relación entre el perímetro de la cuenca y el perímetro de un círculo de igual área que la de la cuenca, se expresa de la siguiente manera:

$$K_c = 0.28 * \frac{P}{\sqrt{A}} \quad (\text{Ecuación 3})$$

Dónde: “P”, es el perímetro de la cuenca en [km], y “A”, es el área de la cuenca en [km²].

Si el resultado es cercano a la unidad, se tendrá una cuenca de forma circular y con fuerte tendencia a las crecientes. Una cuenca alargada tendrá valores superiores a la unidad.

3.1.2.4. Densidad de drenaje

Es la relación entre la longitud total de los cursos de agua y el área de drenaje de la cuenca.

$$Dd = \frac{L_T}{A} \quad (\text{Ecuación 4})$$

Dónde: “L” es la Longitud total de las corrientes de agua en [km].

3.1.2.5. Sinuosidad de la corriente

Es la relación entre la longitud del cuerpo hídrico a lo largo de su cauce principal y la longitud del valle medido en línea curva o recta.

$$S = \frac{L}{L_T} \quad (\text{Ecuación 5})$$

Dónde: “L” es la longitud curva desde la cuchilla de la cuenca hasta el punto de aforo [km].

La sinuosidad es un factor que nos ayuda a conocer meramente la morfología del cauce, siendo más específicos nos ayuda a identificar el patrón de drenaje que tiene el cuerpo hídrico, cuanto más sinuoso sea el río, más alto será el coeficiente. Por lo general se consideran tres clases de patrón de cauce: Recto, trenzado y meándrico [10] (ver Figura 3-1. Patrones de cauces típicos.).

Medidas de mitigación al efecto de socavación que se presenta en el caño Buque, entre el puente ubicado en la vía Bogotá a 1km del túnel Buenavista al puente de la Av. 40 cerca de la Cll. 15, aplicando soluciones de ingeniería

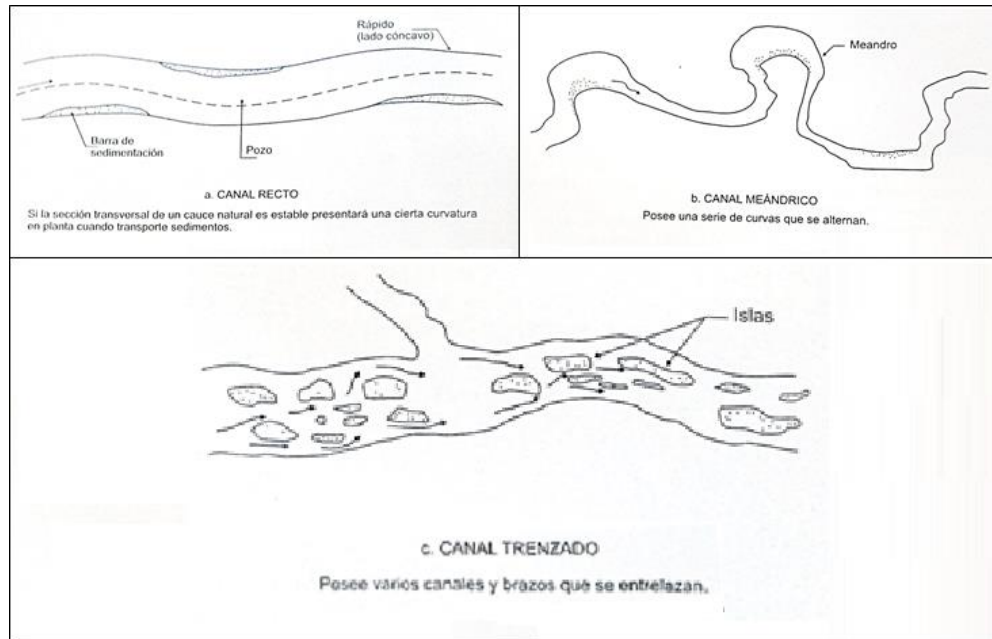


Figura 3-1. Patrones de cauces típicos. Fuente: [10]

3.1.2.6. Pendiente del cauce principal

La pendiente del cauce principal es un factor muy importante para definir el momentum de una avenida de agua y el momentum a su vez refleja la magnitud de la avenida. La ecuación más utilizada para el cálculo de la pendiente del cauce principal es propuesta por Taylor y Schwarz [17], en la cual se divide el cauce se divide en un número "n" de tramos designados a partir de las curvas de nivel que se tengan y según se vea prudente, el modelo es el siguiente:

$$S = \left[\frac{L}{\sum_{i=1}^n \frac{L_i}{S_i^{1/2}}} \right]^2 \quad (\text{Ecuación 6})$$

Dónde: "L" es la longitud total del cauce, "L_i" es la longitud del tramo y "S_i" es la pendiente del tramo.

3.1.2.7. Tiempo de concentración

Se define como el tiempo necesario, desde el inicio de la precipitación, para que una gota de agua cruce desde la cuchilla (punto más alto de la cuenca) hasta el punto de aforo.

Para el cálculo de esta variable hay diversidad de ecuaciones empíricas, para este estudio fueron seleccionadas las siguientes:

- Ecuación de Kirpich

$$Tc = 0.06628 \left(\frac{L}{S^{0.5}} \right)^{0.77} \quad (\text{Ecuación 7})$$

- Ecuación de Ven Te Chow

$$Tc = 0.273 \left(\frac{L}{S^{0.5}} \right)^{0.64} \quad (\text{Ecuación 8})$$

- Ingenieros del ejército de Estados Unidos

$$Tc = 0.28 \left(\frac{L}{S^{0.25}} \right)^{0.76} \quad (\text{Ecuación 9})$$

Dónde: “Tc”, el tiempo de concentración, en horas [h]; “L”, la longitud del cauce principal, en kilómetros [km]; “S”, la Pendiente promedio del cauce principal, en metros por metro [m/m].

3.2. Suelo de la cuenca

La información referente al material del fondo del caño fue obtenida de la zonificación sismogeotécnica indicativa del municipio de Villavicencio, realizada en el año 2000 bajo la

subdirección de amenazas geoambientales perteneciente a INGEOMINAS, ahora llamado Servicio Geológico Colombiano (SGC) y fue complementada con información del mapa digital de suelos del mundo (DMSW Siglas en inglés) hecho en 2007 por la FAO y la UNESCO.

3.3. Cobertura vegetal de la cuenca

En un inicio se pensó tomar la cobertura del catálogo de mapas con el que cuenta el sistema de información ambiental de Colombia (SIAC), el mapa de coberturas de la tierra metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia, durante el periodo 2010 – 2012 por parte del IDEAM, SINCHI, PNN, IGAC con el apoyo del MADS, sin embargo al compararlo con la cobertura que se puede observar en Google Earth© que son imágenes Landsat de 2017, se observó que aunque era similar la cobertura de ese periodo y la del 2017, no era la misma y difería en las áreas para las diferentes coberturas presentes en la cuenca, además de que tampoco se consideraba la ronda del caño, por ende se decidió delimitar la cobertura en Google Earth©, por ser esta una fuente mucho más reciente, tomando de referencia la cobertura que manejaba el CORINE Land Cover.

3.4. Clima de la cuenca

La caracterización climatológica se hizo a partir de los datos medidos por las estaciones meteorológicas que se pueden ver en la Tabla 3-1 **Tabla 3-1.** Estaciones empleadas para la Caracterización Meteorológica., para todas las estaciones se solicitaron datos de número de días de lluvia, valores totales de precipitación y valores máximos de precipitación mensual. Datos que son necesarios para el cálculo de las Curvas IDF, que son utilizadas para el cálculo del caudal pico efectivo de la cuenca. Además se pidió información de temperatura, humedad relativa, evaporación y otros parámetros para la estación Unillanos que fue empleada para la caracterización general de dichos parámetros para la cuenca.

Medidas de mitigación al efecto de socavación que se presenta en el caño Buque, entre el puente ubicado en la vía Bogotá a 1km del túnel Buenavista al puente de la Av. 40 cerca de la Cll. 15, aplicando soluciones de ingeniería

Tabla 3-1. Estaciones empleadas para la Caracterización Meteorológica.

CODIGO_CAT	NOMBRE	LATITUD		LONGITUD		ALTITUD
35020030	MANZANARES	4.1167	N	-73.8000	W	1200
35035010	BASE AEREA APIAY	4.0771	N	-73.5599	W	400
35030030	SENA	4.1274	N	-73.6396	W	425
35030040	ACD TO LA ESMERALDA	4.1636	N	-73.6477	W	550
35035020	APTO VANGUARDIA	4.1619	N	-73.6176	W	422
35035070	UNILLANOS	4.0767	N	-73.5820	W	340
35020020	SUSUMUCO	4.1962	N	-73.7719	W	1000

Fuente: Autor

3.5. Cálculo de caudal

3.5.1. Curvas intensidad duración frecuencia (IDF)

Las curvas IDF constituyen una de las herramientas más utilizadas en la estimación de caudales de diseño de obras de drenaje en vías y alcantarillados pluviales para zonas urbanas y rurales, así como en la estimación de las tormentas de diseño en sitios en donde, debido a la falta de información de caudales, es necesario recurrir a modelos lluvia-escorrentía para el cálculo de los caudales máximos. [18]

Para el cálculo de las IDF se utilizó la información registrada por siete (7) estaciones meteorológicas que registraron información durante los últimos treinta (30) años. Esta información fue suministrada por el IDEAM y luego pasó por un proceso de completado de datos por medio de regresiones lineales y no lineales con el programa informático Microsoft Excel aplicando gráficas de dispersión y líneas de tendencia. Con estas tres (3) variables se elaboraron las curvas de intensidad duración frecuencia (IDF) sintéticas ceñido al método propuesto por [19] para su elaboración. Se optó por un periodo de retorno de cien (100) años

puesto que se busca el caso más desfavorable y frente a este proponer las medidas de mitigación.

3.5.2. Hietogramas de precipitación de diseño mediante bloque alterno

El método del bloque alterno es una forma simple para desarrollar un hietograma de diseño utilizando una curva-duración-frecuencia. El hietograma de diseño producido por este método especifica la profundidad de precipitación en n intervalos de tiempo sucesivos de duración Δt , sobre una duración total de $T_d = n \Delta t$. Después de seleccionar el periodo de retorno de diseño, la intensidad es leída en una curva IDF para cada una de las duraciones Δt , $2 \Delta t$, $3 \Delta t$, $4 \Delta t$,... y la profundidad de precipitación correspondiente se encuentra al multiplicar la intensidad y la duración. Tomando diferencias entre valores sucesivos de profundidad de precipitación, se encuentra la cantidad de precipitación que debe añadirse por cada unidad adicional de tiempo Δt . Estos incrementos o bloques se reordenan en una secuencia temporal requerida T_d y que los demás bloques queden en orden descendente alternativamente hacia la derecha y hacia la izquierda del bloque central para formar el hietograma de diseño. [20] En otras palabras se ~~obtiene~~ la precipitación en un tiempo determinado a partir de la intensidad del aguacero y la duración.-Esta duración por lo general está dada en intervalos de la misma duración durante el aguacero, y la precipitación según el tiempo será organizada en de tal forma que el mayor valor quede en el centro, mientras que hacia los lados vaya disminuyendo hasta llegar a los extremos donde están los mínimos.

3.5.3. Número de curva – método soil conservations service (scs)

CN es el Número de curva, una constante adimensional que ha sido tabulada por el SCS con base en el tipo de suelo y el uso de la tierra. Para determinar el CN se debe tener claro el tipo de suelo del objeto de estudio. Para esto el SCS define cuatro grupos de suelos:

Medidas de mitigación al efecto de socavación que se presenta en el caño Buque, entre el puente ubicado en la vía Bogotá a 1km del túnel Buenavista al puente de la Av. 40 cerca de la Cll. 15, aplicando soluciones de ingeniería

Grupo A: Arena profunda, suelos profundos depositados por el viento, limos agregados.

Grupo B: Suelos poco profundos depositados por el viento, marga arenosa.

Grupo C: Margas arcillosas, margas arenosas poco profundas, suelos con bajo contenido orgánico y suelos con altos contenidos de arcilla.

Grupo D: Suelos que se expanden significativamente cuando se mojan, arcillas altamente plásticas y ciertos suelos salinos.

De acuerdo a estos grupos de suelos y a la cobertura de suelo se determina CN, los valores de CN para varios tipos de uso de tierra se encuentran en la siguiente tabla:

Tabla 3-2. Números de curva de escorrentía para usos selectos de tierra agrícola, suburbana y urbana (condiciones antecedentes de humedad II).

Descripción del uso de la tierra		Grupo Hidrológico del Suelo			
		A	B	C	D
Tierra cultivada (1):	Sin tratamientos de conservación	72	81	88	91
	Con tratamientos de conservación	62	71	78	81
Pastizales:	Condiciones pobres	68	79	86	89
	Condiciones óptimas	39	61	74	80
Vegas de ríos:	Condiciones óptimas	30	58	71	78
Bosques:	Troncos delgados, cubierta pobre, sin hierbas	45	66	77	83
	Cubierta buena (2)	25	55	70	77
Áreas abiertas, césped, etc:	Óptimas condiciones: cubierta de pasto $\geq 75\%$	39	61	74	80
	Condiciones aceptables: Cubierta de pasto 50 - 75%	49	69	79	84
Áreas comerciales de negocios (85% impermeables)		89	92	94	95
Distritos industriales (72% impermeables)		81	88	91	93
Residencial (3):					
Tamaño promedio del lote	Porcentaje promedio impermeable (4)				
1/8 acre o menos	65	77	85	90	92
1/4 acre	38	61	75	83	87
1/3 acre	30	57	72	81	86
1/2 acre	25	54	70	80	85
1 acre	20	51	68	79	84
Parqueaderos pavimentados, techos, accesos, etc. (5)		98	98	98	98
Calles y carreteras:	Pavimentados con cunetas y alcantarillados (5)	98	98	98	98
	Grava	76	85	89	91
	Tierra	72	82	87	89

1. Para una descripción más detallada de los números de curva para usos agrícolas de la tierra, remitirse a Soil Conservation Service, 1972, Cap. 9

2. Una buena cubierta está protegida del pastizaje, y los desechos del retiro de la cubierta del suelo.

3. Los números de curva se calculan suponiendo que la escorrentía desde las casas de los accesos se dirige hacia la calle, con un mínimo del agua del techo dirigida hacia el césped donde puede ocurrir infiltración adicional.

4. Las áreas permeables restantes (césped) se consideran como pastizales en buena condición para estos números de curva

5. En algunos países con climas más cálidos se puede utilizar 95 como número de curva

Fuente: [20]

3.5.4. Obtención del caudal con HEC – HMS

El programa HEC – HMS es un programa de simulación hidrológica ya sea lineal o semidistribuida, desarrollado para estimar las hidrógrafas de salida en una cuenca o varias subcuencas y esto lo realiza a partir de ciertas condiciones que se le configuran, para el caso de este estudio se manejó para el cálculo de caudal todo con los métodos del SCS. Los insumos que se necesitan para el cálculo del caudal son:

- Hietograma de precipitación correspondiente a la cuenca, previamente desarrollado con ayuda de las IDF y el método de bloques alternos.
- Área correspondiente a la cuenca o a las subcuencas en este caso.
- Número de curva, CN, para cada una de las subcuencas.
- Tiempo de retardo. El cual equivale al 60% de tiempo de concentración.

Estos datos serán suministrados al programa y al ejecutarlo, el programa nos dará resultados como el caudal pico y el hidrograma unitario sintético.

3.6. Ecuación universal de pérdidas de suelo.

Entre los métodos y ecuaciones utilizados está la ecuación universal de pérdidas de suelo desarrollada por Smith y Wischmeier [21] El cual es un modelo paramétrico que permite la evaluación de las pérdidas de suelo, incluyendo tanto la erosión laminar como la erosión en surcos mediante la expresión:

$$A = R * K * L * S * C * P \quad (\text{Ecuación 10})$$

Donde:

A = Es la pérdida de suelo por unidad de superficie (Ton ha⁻¹ año).

R = Factor lluvia, es el número del índice de erosión pluvial, EI_{30} , en el periodo considerado y mide la fuerza erosiva de determinada precipitación. ($MJ\ mm\ ha^{-1}\ hora^{-1}$)

K = Factor erosionabilidad del suelo, es el valor de la erosión por unidad de índice de erosión pluvial, para un suelo determinado, con una pendiente del 9% y una longitud de declive de 22.1 m. ($ton\ m^2\ hora\ m^{-3}\ ton^{-1}\ cm^{-1}$)

L = Factor longitud de la ladera es la relación entre la pérdida de suelo para una longitud determinada y la pérdida en una longitud de 22.1 m del mismo tipo de suelo (adimensional).

S = Factor pendiente, es la relación entre las pérdidas para una pendiente determinada y las pérdidas para una pendiente del 9% del mismo tipo de suelo (adimensional)

C = factor cultivo y ordenación, la relación entre las pérdidas de suelo en un terreno cultivado en condiciones específicas y las pérdidas correspondientes para ese suelo sin cultivo (adimensional).

P = factor prácticas de conservación del suelo, la relación entre las pérdidas de suelo con cultivo a nivel, en fajas y en terrazas, y las pérdidas de suelo correspondientes a un cultivo en surcos según la pendiente (adimensional).

3.6.1. Índice de erosión pluvial – R

El índice de erosión pluvial es un índice numérico que expresa el potencial de la lluvia para causar erosión en el suelo, esto combinando el desprendimiento de las partículas y la capacidad de transporte de dichas basándose en la interacción dada entre la energía total de la tormenta y la intensidad máxima. [22].

Wischmeier y Smith en 1978 para cuantificar el efecto erosivo de las lluvias debido a la intensidad de la misma proponen la siguiente ecuación:

$$R = E * I_{30} \quad (\text{Ecuación 11})$$

Donde “R” es el índice de erosividad de la lluvia ($\text{MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$); “E” corresponde a la energía cinética del aguacero e “I₃₀” es la intensidad máxima en 30 minutos de aguacero (mm/h). Así mismo la energía cinética del aguacero “E” ($\text{MJ ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$) se calcula de acuerdo a De María (1994) como:

$$E = 0.119 + 0.0873 \log I \quad (\text{Ecuación 12})$$

Donde “I” es la intensidad para cada intervalo en mm h^{-1} .

Para modelar la erosión es recomendable que se cuente con información de más de 20 años, esto con el fin de que se tenga una buena captación de la variación climatológica que se ha dado en la zona de estudio [22]

Los datos para intensidad fueron determinados gracias a las IDF de cada estación y con estas se aplicaron las anteriores ecuaciones, para dar como resultado los valores “R” para cada una de las estaciones y luego se generó la representación espacial de la información utilizando el software ArcGIS 10.2.2 ®, en el cual se ejecutó el algoritmo de interpolación “Spline”.

3.6.2. Índice de erodabilidad del suelo – K

El factor K, también llamado factor de erodabilidad, “es una descripción cuantitativa que indica la susceptibilidad del suelo a ser erosionado” [23], para su cálculo se necesita tener información del terreno tal como lo es: contenido de arena, arcilla, limos, materia orgánica. Para su estimación Williams aporta la siguiente ecuación:

$$K = f_{csand} * f_{cl-si} * f_{orgc} * f_{hisand} \quad (\text{Ecuación 13})$$

Dónde: f_{csand} , contenido de arena gruesa, f_{cl-si} , contenido de arcilla – limo, f_{orgc} , contenido de carbono orgánico y f_{hisand} , contenido de arena fina. El factor K tiende a disminuir cuando el

suelo está compuesto por una alta cantidad de arena, arcilla y limo o carbono orgánico y en caso contrario (bajo contenido) aumenta. Estos factores se calculan de la siguiente forma:

$$f_{csand} = \left(0.2 + 0.3 * \exp \left[-0.256 * m_s * \left(1 - \frac{m_{silt}}{100} \right) \right] \right) \quad (\text{Ecuación 14})$$

$$f_{cl-si} = \left(\frac{m_{silt}}{m_c + m_{silt}} \right)^{0.3} \quad (\text{Ecuación 15})$$

$$f_{csand} = \left(1 - \frac{0.25 * orgC}{orgC + \exp[3.72 - 2.95 * orgC]} \right) \quad (\text{Ecuación 16})$$

$$f_{cl-si} = \left(1 - \frac{0.7 * \left(1 - \frac{m_s}{100} \right)}{\left(1 - \frac{m_s}{100} \right) + \exp[-5.51 + 22.9 * \left(1 - \frac{m_s}{100} \right)]} \right) \quad (\text{Ecuación 17})$$

Dónde: m_s es el contenido de arena del suelo (partículas de 0.05 – 2.00 mm de diámetro) [%]; m_{silt} es el contenido de limos (partículas de 0.002 – 0.05 mm de diámetro) [%]; m_c es el contenido de arcilla (partículas < 0.002 mm de diámetro) [%]; $orgC$ es el contenido de carbono orgánico [%]. [24]

Por último se hace la inclusión del factor k , el cual lógicamente está delimitado por los polígonos del DSMW, y se hace su representación espacial mediante el software ArcGIS 10.2.2 ®.

3.6.3. Factores topográficos l y s

En este factor se relaciona la afectación que tiene la longitud “ L ” y la inclinación “ S ” en la erosión del suelo, propuesto por Foster y Wischmeier en 1974 (Foster y Wischmeier, 1974; Wischmeier y Smith, 1978; Renard et al., 1997), El modelo matemático para calcularlo es el siguiente:

$$LS = \sum_{j=1}^N \frac{S_j \lambda_j^{m+1} - S_j \lambda_{j-1}^{m+1}}{(\lambda_j - \lambda_{j-1})^{(22.13)^m}} \quad (\text{Ecuación 18})$$

Donde “sj” es el factor de inclinación de la pendiente para el segmento j-ésimo pendiente; “λj” es la longitud de la parte superior de la pendiente para el extremo inferior del segmento j-ésimo; “m” es el exponente del factor de longitud de la pendiente. En el caso de las pendientes que tienen una inclinación irregular (convexa, cóncava o complejo), el factor se estima por una técnica en la que la pendiente se divide en segmentos de pendiente uniforme.

3.6.3.1. Factor L

Muchos autores (Moore y Burc 1986, 1992; Desmet y Govers 1996; mitasova et al., 1996) han demostrado que la influencia de la forma del terreno en el flujo del agua se puede apreciar mejor cuando el factor de longitud de pendiente (L) se reemplaza por una unidad de zona contribuyente cuesta arriba. Si los segmentos de pendiente son representados como celdas raster, la unidad de zona contribuyente cuesta arriba para cada celda raster es igual a la división del área de la zona contribuyente cuesta arriba entre la distancia que cubre el flujo del agua dentro de la celda raster.

El objetivo de la segmentación de la pendiente, de acuerdo con sus valores de inclinación, fue modelar el impacto de la curvatura del terreno sobre la erosión en la dirección de la pendiente máxima (es decir, el flujo de agua superficial). Muchos autores (MOORE y BURCH 1986, 1992; DESMET y GOVERS 1996; MITASOVA et al., 1996) han demostrado que la influencia de la forma del terreno en el flujo de agua superficial se considera mejor cuando el factor de longitud de pendiente (L) se reemplaza por una unidad zona contribuyente cuesta arriba Si los segmentos de pendiente se representan como celdas de trama, la unidad

El área contribuyente cuesta arriba para cada celda raster es igual a la división del área contribuyente ascendente de la celda por la distancia que cubre el flujo de agua dentro de la celda rasterizada. Por tal razón DESMET y GOVERS (1996) sugieren un método modificado

para estimar el factor L para una sola celda raster en sistemas GIS. Toman en cuenta la posibilidad de reemplazar el valor de la longitud de la pendiente por un área contribuyente cuesta arriba [25] lo cual encaja perfectamente con la metodología que se emplea en este trabajo para estimar los valores de erosión USLE, además de permitir a su vez la elaboración de la cartografía de dicho factor, el ecuación que describe este factor es la siguiente:

$$L_{(i,j)} = \frac{(A_{(i,j)} + D^2)^{m+1} - A_{(i,j)}^{m+1}}{x^m * D^{m+2} * (22.13)^m} \text{ (Ecuación 19)}$$

Donde “D” es la resolución del raster o tamaño del pixel, “A_(i,j)” es la unidad de zona contribuyente cuesta arriba o acumulación del flujo (i,j), “x” es el coeficiente de corrección de la longitud de flujo dentro de la celda raster, en función de la dirección del flujo y es estimado con base al aspecto del terreno. [25]

3.6.3.2. Factor S

El factor de inclinación de la pendiente (S) se calcula utilizando el siguiente modelo matemático (Wischmeier y Smith 1978):

$$S = 65.41 \sin^2(q) + 4.56 \sin(q) + 0.65 \text{ (Ecuación 20)}$$

Donde “q” es la inclinación de la pendiente o slope.

Otra forma de determinar este factor es por el método propuesto por McCool; Brown; Foster et al. (1987).

$$S_{(i,j)} = \begin{cases} 10.8 \sin(q)_{(i,j)} + 0.03 & \tan(q)_{(i,j)} < 0.09 \\ 16.8 \sin(q)_{(i,j)} - 0.5 & \tan(q)_{(i,j)} \geq 0.09 \end{cases} \text{ (Ecuación 21)}$$

3.6.4. Factor cobertura vegetal del suelo – C

Representa los efectos de la cobertura sobre el suelo y su relación con la erosión que se presentará en dicho, la cobertura vegetal ofrece una protección al reducir el impacto de las gotas de lluvia y de acuerdo al tipo de cobertura se puede generar una reducción del proceso erosivo, en el cual la cobertura que mejor se comporte tendrá un valor de C más bajo (cercano a cero (0)) y donde hay cobertura pésima o simplemente no hay los valores serán cercanos a 1 (Renard et al., 1997). Los valores publicados para “C” varían desde 0,0005 para las áreas forestales con cobertura del suelo 100% hasta 1 para las zonas de suelo desnudo (Departamento de Agricultura de EE.UU., 1977) citado por [26]

Con la información que se tenía de cobertura y su representación espacial se hizo el correspondiente importe a Arc GIS 10.2.2 ® y se les asigno el valor C de acuerdo a la cobertura, estos valores de C fueron adaptados de los valores de C propuestos por [27] dentro de su metodología y se pueden apreciar en la siguiente tabla:

Tabla 3-3. Constantes para el factor "C" de acuerdo al tipo de cobertura del suelo.

Cobertura	Factor C
Tejido urbano	0.1
Bosques	0.2
Mosaico de pastos y espacios naturales	0.4
Ríos (50m)	1.0

Fuente: Adaptado de [27]

3.6.5. Factor de prácticas de conservación – P

Corresponde a los efectos de la gestión o manejo que tiene el suelo [28] el factor P al igual que el factor “C” contribuye a la mitigación de la erosión. Debido a la escasa información disponible sobre las prácticas de manejo dadas en la zona de estudio, se consideró un método alternativo en el cual se determina el factor P a partir de la cobertura del terreno tomando como referencia la metodología diseñada por [29], quienes clasifican y asignan valores de “P” a cinco clases como se observa en la Tabla 3-4.

Tabla 3-4. Constantes para el factor "P" de acuerdo a la clase de cobertura terrestre.

Clases de Cobertura Terrestre	Factor P
Tierras de uso agrícola	0.4
Cuerpos de agua	0.5
Área de árbol revestido	0.1
Superficie construida y/o zonas urbanas	1.0
Desierto y zonas con grado de degradación alto	1.0

Fuente: [29]

3.7. Socavación.

La socavación en un cauce se rige por un equilibrio entre el aporte sólido que se recibe y se evacua, es decir el porcentaje de material que se sedimenta en una sección y el material que se transporta y es removido de dicha sección. Para tener un estimado de la capacidad de arrastre en una sección se debe relacionar la velocidad media del agua (V_r) con la velocidad media requerida para arrastrar partículas del fondo (V_e), el cociente de V_r/V_e nos indicará la capacidad de arrastre. V_r depende de las características hidráulicas del cuerpo hídrico (pendiente, rugosidad y profundidad de la lámina de agua) en tanto que V_e depende meramente de las características del material del fondo y la profundidad de la lámina de agua [10].

El cálculo por el que se opta es el realizado por L. A. Maza, quien adopta el criterio de Lischtván – Lebediev. Dicho criterio supone que el ancho de la sección será el mismo durante el proceso erosivo y requiere la siguiente información como insumo:

- Caudal máximo y profundidad de la corriente correspondiente a dicha creciente de diseño, el cual es obtenido mediante la modelación en HEC-HMS.
- Perfil topográfico de las secciones en las que se identificó un mayor potencial de socavación (mediante visitas de campo y de acuerdo a los cálculos de erosión) y fue elaborado con la unión de un DEM Alos Palsar 12.5x12.5 y puntos tomados con GPS.
- Características del material del fondo (peso específico seco o características granulométricas)

Ya que la socavación es afectada por las características geomecánicas del material, maza propone una clasificación de los cauces entorno a dicho criterio, los cuales ocasionarán distintos cambios en las ecuaciones utilizadas para el cálculo de la socavación.

TIPO DE CAUCE	MATERIAL DE FONDO	DISTRIBUCIÓN DE MATERIALES EN EL FONDO
Definido	Cohesivo	Homogéneo
		Heterogéneo
	No Cohesivo	Homogéneo
		Heterogéneo
NO Definido	Cohesivo	Homogéneo
		Heterogéneo
	No Cohesivo	Homogéneo
		Heterogéneo

Figura 3-2. Clasificación para la socavación general. Fuente: [10]

3.7.1. Socavación en suelos cohesivos homogéneos – sección recta

Teniendo en cuenta que se determinará el descenso del fondo del cauce para un caudal de diseño y la elevación de la superficie del flujo para estas condiciones, la velocidad erosiva (**Ve**) puede calcularse de la siguiente manera:

$$V_e = 0,60\gamma_d^{1,18}\beta\psi H_s^x \quad (\text{Ecuación 22})$$

Donde:

Ve = Velocidad media de erosión del fondo [m/s].

γ_d = Peso específico seco que se encuentra a la profundidad H_s [ton/m³].

β = Coeficiente que depende del período de retorno (Tr) de la creciente de diseño.

$$\beta = 0,0973 \log Tr + 0,79 \quad (\text{Ecuación 23})$$

Tr = Período de retorno [años].

H_s = Profundidad de la lámina de agua, medida desde la superficie del agua hasta el fondo erosionado, para Q_d [m].

X = Exponente variable función de γ_d :

$$X = 0,1363\gamma_d^2 - 0,58\gamma_d + 0,893 \quad (\text{Ecuación 24})$$

ψ = depende del peso específico de la mezcla agua-materiales en suspensión.

$$\psi = 1,51\gamma_{mez} - 0,54 \quad (\text{Ecuación 25})$$

γ_{mez} = peso específico de la mezcla agua-materiales en suspensión [ton/m³].

Este cálculo se efectúa suponiendo que el caudal unitario (ΔQ) de una franja vertical de ancho (ΔB), para la sección en estudio, permanece constante mientras dura el proceso erosivo (Figura 3-3)

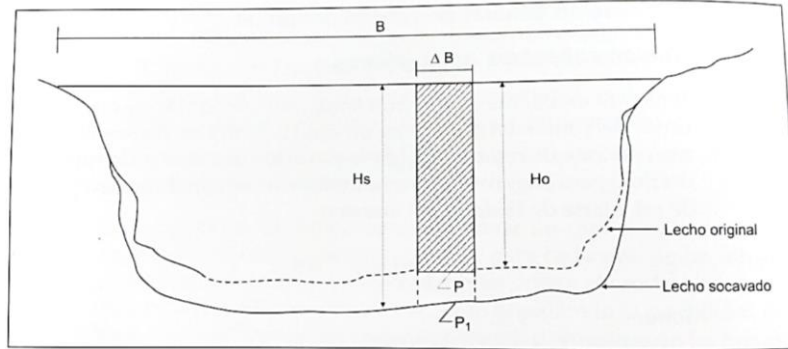


Figura 3-3. Socavación general en cauces definidos. Fuente: [10]

La velocidad media de erosión del fondo (V_e) nos sirve como marco de referencia para compararlo con la velocidad media real de la corriente (V_r), y saber si habrá o no socavación general, es decir si V_e es inferior a V_r no habrá socavación y si es mayor habrá socavación.

En cuanto a la socavación, se calcula mediante el siguiente modelo matemático:

$$H_s = \left(\frac{\alpha H_0^{5/3}}{0,6 \gamma_d^{1,18} \psi \beta} \right)^{\frac{1}{1+x}} \quad (\text{Ecuación 26})$$

Donde:

α = Es una constante, que se obtiene con la siguiente ecuación:

$$\alpha = \frac{Q_d}{\mu H_m^{5/3} B_e} \quad (\text{Ecuación 27})$$

Medidas de mitigación al efecto de socavación que se presenta en el caño Buque, entre el puente ubicado en la vía Bogotá a 1km del túnel Buenavista al puente de la Av. 40 cerca de la Cll. 15, aplicando soluciones de ingeniería

Q_d = Caudal de diseño. [m^3/s]

B_e = Ancho efectivo de la sección, en la superficie libre correspondiente al Q_d [m]

μ = Coeficiente de contracción (en caso de que la haya) es afectado por el ancho efectivo y la velocidad media del agua (ver Tabla 3-5).

Tabla 3-5. Coeficiente de contracción μ .

Velocidad media en la sección m/s	Longitud libre entre dos pilas, m												
	10	13	16	18	21	25	30	42	52	63	106	124	200
<1.0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1.0	0.96	0.97	0.98	0.99	0.99	0.99	1	1	1	1	1	1	1
1.5	0.94	0.96	0.97	0.97	0.97	0.98	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	1
2.0	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
2.5	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
3.0	0.89	0.91	0.93	0.94	0.95	0.96	0.96	0.97	0.98	0.98	0.99	0.99	0.99
3.5	0.87	0.9	0.92	0.93	0.94	0.95	0.96	0.97	0.98	0.98	0.99	0.99	0.99
>4.0	0.85	0.89	0.91	0.92	0.93	0.94	0.95	0.96	0.97	0.98	0.99	0.99	0.99

Fuente: [10]

La socavación esperada se obtiene al restarle a H_s el valor H_0 , que corresponde a la profundidad de la lámina de agua en las condiciones iniciales.

3.7.2. Socavación en suelos no cohesivos homogéneos – sección recta

En este tipo de suelos se utiliza la siguiente ecuación para el cálculo de la velocidad erosiva V_e :

$$V_e = 0,68\beta d_m^{0,28}\psi H_s^z \quad (\text{Ecuación 28})$$

Donde:

V_e = Velocidad media de erosión del fondo [m/s].

d_m = Diámetro medio de las partículas del material granular [mm].

$$d_m = 0,01 \sum d_i P_i \quad (\text{Ecuación 29})$$

Donde:

D_i = Diámetro medio de una fracción en la curva granulométrica de la muestra analizada [mm].

P_i = Peso representado en porcentaje, es decir, el peso de la fracción con respecto al peso total de la muestra (porcentaje retenido). Las fracciones escogidas no deben ser necesariamente iguales entre sí.

β = Coeficiente que depende del período de retorno (Tr) de la crecienta de diseño. (se calcula de la misma forma que en suelos cohesivos homogéneos (ver $\beta = 0,0973 \log Tr + 0,79$ (Ecuación 23)).

H_s = Profundidad de la lámina de agua medida desde la superficie del agua (para Q_d) hasta el fondo erosionado [m].

z = Exponente variable, función del diámetro medio de las partículas del material granular.

$$z = -0,0089 \log^2 d_m - 0,041 \log d_m + 0,395 \quad (\text{Ecuación 30})$$

Al aplicar la condición de equilibrio, $V_r = V_e$, y despejando H_s , profundidad máxima de la lámina de agua que se presenta durante el proceso de erosión, se tiene:

$$H_s = \left(\frac{\alpha H_0^{5/3}}{0,68 \beta \psi d_m^{0,28}} \right)^{\frac{1}{1+z}} \quad (\text{Ecuación 31})$$

De donde se puede obtener la profundidad de socavación.

3.7.3. Socavación en suelos no homogéneos

Cuando en una sección transversal se presentan diferentes estratos, tanto cohesivos como no cohesivos, se emplean las mismas ecuaciones para el cálculo de H_s en cada punto, pero se requiere efectuar un proceso de tanteos. [10]

Para este tanteo se debe tener el perfil estratigráfico de la sección en estudio y para cada punto de esta se calcula el valor de H_s , se parte de suponer que la socavación solo estará presente en el primer estrato, si esto se cumple se deja así y si no se pasa a hacer los cálculos con el siguiente estrato y así sucesivamente hasta que H_s encaje en el estrato que se está tomando de prueba.

3.7.4. Socavación en suelos cohesivos homogéneos – sección curva

El cauce de un río sufre alteraciones debido a muchas causas, una de las cuales corresponde a la acción erosiva que se presenta en el extradós de una curva (efecto de la fuerza centrífuga). También, por ejemplo, al disminuir la velocidad en una zona aumenta el depósito de materiales, etc., y en especial cuando el flujo no es permanente (caudal variable), la acción erosiva y la capacidad de transporte varían todo el tiempo. [10]

Para el cálculo de la erosión en una curva se puede utilizar el criterio de Altunin, el cual busca determinar la profundidad máxima que se produce en la curva en función de la profundidad media del tramo recto. [10]

La fórmula de Altunin es:

$$H_{m\acute{a}x} = \varepsilon_i H_{rec} \quad (\text{Ecuación 32})$$

Donde:

$H_{m\acute{a}x}$ = Máxima profundidad que se presenta en un punto cualquiera de la curva [m].

ε_i = Coeficiente que depende de la relación B/r. El subíndice depende de si se trata de socavación de aguas medias (i = 1) o aguas máximas (i = 2) (ver Tabla 3-6. Coeficiente epsilon para el cálculo de la socavación en curvas.).

r = Radio de la curva medida al centro del cauce [m].

H_{rec} = Profundidad media de la lámina de agua en el tramo recto [m].

Tabla 3-6. Coeficiente epsilon para el cálculo de la socavación en curvas.

B/r	1.00	0.70	0.50	0.33	0.25	0.20	0.16	0.00
e1	3.00	2.69	1.60	1.43	1.33	1.27	1.24	1.00
e2	-	-	3.00	2.57	2.20	1.84	1.48	1.27

Fuente: [10]

3.7.5. Socavación al pie de estribos

Para el cálculo de la socavación en estribos, en general se utilizan las fórmulas de Field, Liu y Alia y Artamonov; este último es más versátil y permite calcular además la socavación en espolones. [10]

El método field se basa en una carta de diseño para socavación de equilibrio la cual se construyó utilizando los métodos de Liu y Alia para muros verticales y estribos de tablero vertical. Por ende es meramente una aproximación de dicho método, tiende a ser un tanto ambiguo ya que se suple de diversas curvas para determinar los factores necesarios para identificar la socavación. Por otro lado el método de Liu y Alia utiliza una ecuación que resulta del análisis dimensional y estudios de laboratorios, en condiciones de transporte

continuo de sedimentos. Por último Artamanov propone una ecuación que depende de varios factores, entre los cuales destacan la relación entre el caudal teóricamente interceptado por el estribo o espigón y el caudal total que transporta el cauce, el talud que tienen los lados del estribo y el ángulo formado por la dirección de la corriente y el eje longitudinal de la obra. [10]

Para este proyecto se manejó el método de Artamanov, debido a que la información que este requiere es compatible con la que se tiene disponible, además de que el método Liu y Alia y el método Field que deriva de este, están enfocados en condiciones de transporte continuo de sedimentos, condición que no cumple el caño buque.

La profundidad de la lámina de agua, incluyendo la profundidad de socavación al pie del estribo, es:

$$D_s = P_\alpha P_q P_R H_0 \quad (\text{Ecuación 33})$$

Dónde: “Ds” es la socavación total al pie del estribo, medida desde la superficie libre del agua [m], “Pq” es el coeficiente que depende de la relación entre Q_1/Q , siendo Q_1 , el caudal que teóricamente pasaría por el lugar ocupado por el estribo si éste no existiera, y Q, el caudal total que escurre por el río, “Pq” se determina de la siguiente manera:

$$P_q = 1.4675 + 6.55238 \left(\frac{Q_1}{Q} \right) - 4.0238 \left(\frac{Q_1}{Q} \right)^2 \quad (\text{Ecuación 34})$$

“ P_α ” es el coeficiente que depende del ángulo que forma el eje de la obra con la dirección de la corriente (Tabla 3-7), “ P_R ” el coeficiente que depende del talud que tiene los lados de la obra (Tabla 3-8) y “ H_0 ” es la profundidad de la lámina de agua en el sitio junto al estribo, antes de la erosión [m].

Medidas de mitigación al efecto de socavación que se presenta en el caño Buque, entre el puente ubicado en la vía Bogotá a 1km del túnel Buenavista al puente de la Av. 40 cerca de la Cll. 15, aplicando soluciones de ingeniería

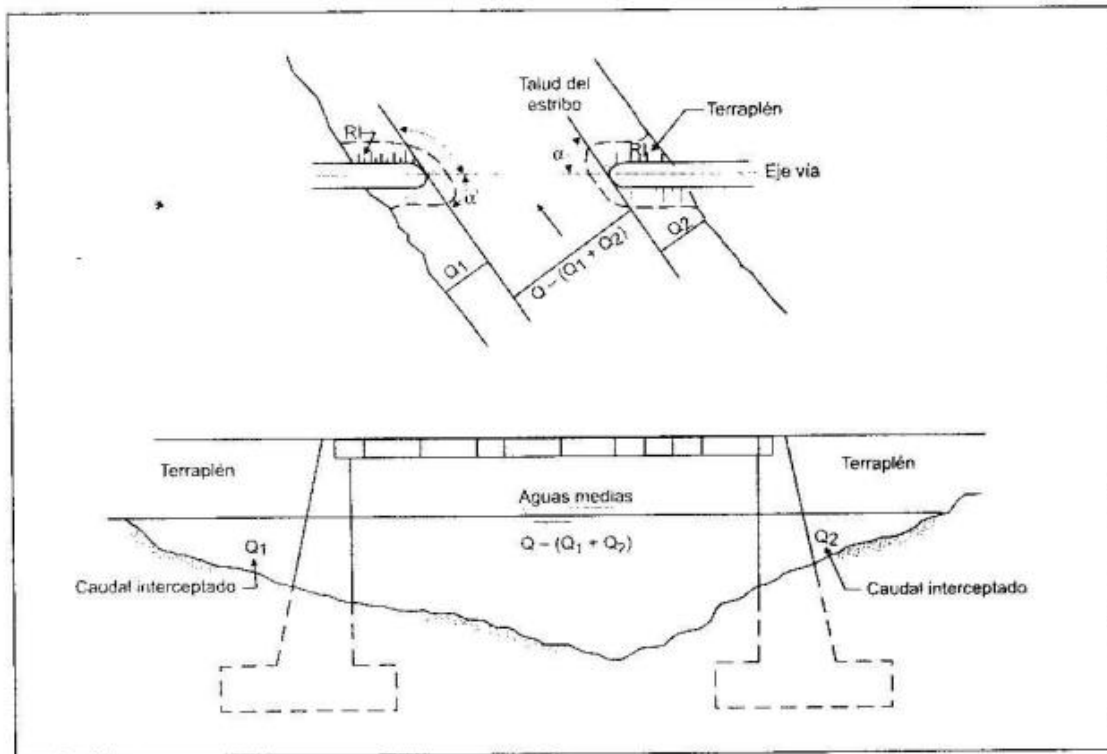


Figura 3-4. Método Artamanov, interceptación del flujo por los estribos dentro del canal.

Fuente: [10]

Tabla 3-7. Coeficiente P_{α} , en función del ángulo α que forma el eje de la obra en la dirección de la corriente.

α	20°	60°	90°	120°	150°
P_{α}	0.84	0.94	1.00	1.07	1.188

Fuente: [10]

Tabla 3-8. Coeficiente P_R , en función del talud R de los lados de la obra.

Talud R	0.0	0.5	1.0	1.5	2.0	30
P_R	1.0	0.91	0.85	0.83	0.61	0.50

Fuente: [10]

3.8. Obras de mitigación

Los gaviones son una de las obras de mitigación más aplicadas en el medio hidráulico desde hace más de un siglo debido a su gran versatilidad y resistencia [30]. Además son obras muy “simples”, fáciles de construir, ya que no necesitan mano de obra especializada y su instalación es rápida. El diseño de los gaviones se hace en su inicio de una forma empírica ideando una forma que se ajuste al cauce del río y para el presente estudio se consideró que la base de la estructura no abarcara más del 20% del ancho de la sección del caño para que su afectación en la dinámica fluvial de la corriente fuera la menor posible, sin dar lugar a efectos contraproducentes (ocasionar socavación, que es lo que se busca mitigar) a causa de la contracción del cauce.

Luego de su diseño, se procede a comprobar su funcionalidad chequeando los factores de seguridad al volcamiento, deslizamiento según lo estipulado en la NSR-10 para estructuras de contención (ver Tabla 3-9) y además se debe verificar que el esfuerzo máximo presente en el gavión sea inferior a la capacidad portante del terreno.

Tabla 3-9. Factores de seguridad para Estructuras de Contención.

Factor de seguridad	
Deslizamiento	≥ 1.6
Volcamiento	≥ 3.0

Fuente: Adaptado NSR-10, Título H

Para determinar estos factores de seguridad se debe saber la magnitud y altura de acción de las distintas fuerzas que pueden afectar la estructura como lo son: Peso propio, Empuje activo, Empuje pasivo y Empuje hidrostático (ver Figura 3-5). Estos factores no son obtenidos en laboratorio sino que son calculados con base en las características del suelo, del gavión y de la lámina de agua.

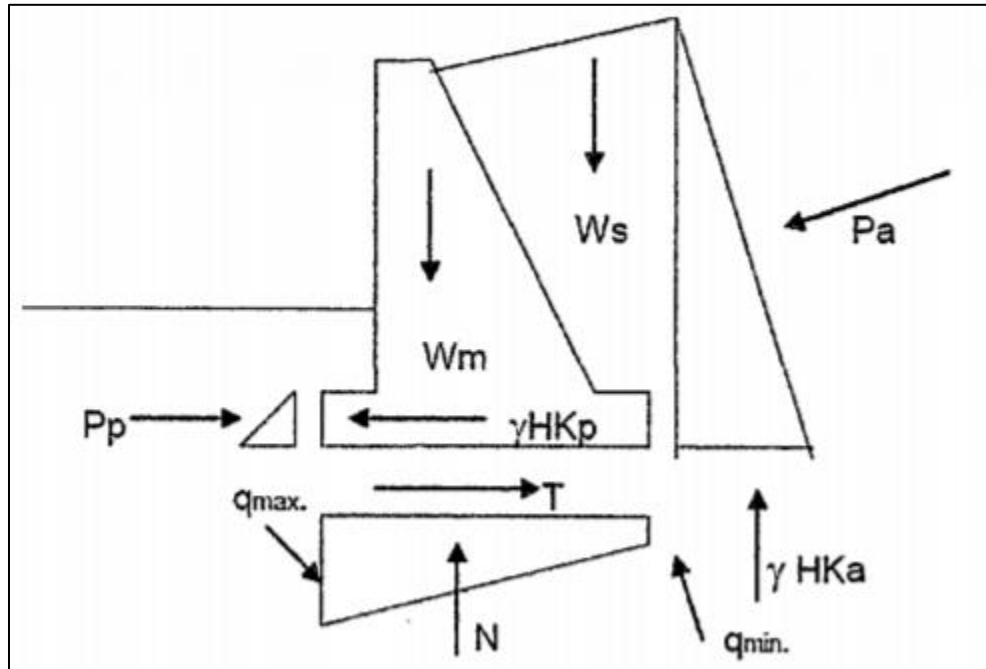


Figura 3-5. Diagrama de fuerzas en un muro a gravedad. Fuente: [31]

3.8.1. Empuje activo

Es el empuje generado por el terreno que es determinado de acuerdo al ángulo formado por la tierra con la horizontal y el ángulo de fricción interna del mismo suelo. La ecuación que propone Rankine para el cálculo del empuje activo es:

$$Ea = \frac{1}{2} Ka \gamma h^2 \text{ (Ecuación 35)}$$

Donde “ka” es el coeficiente de presión activa $Ka = \cos(\delta) \frac{\cos(\delta) - \sqrt{\cos^2(\delta) - \cos^2(\phi)}}{\cos(\delta) + \sqrt{\cos^2(\delta) - \cos^2(\phi)}}$ (Ecuación 36), “γ” peso específico del suelo y “h” la altura del gavión.

$$Ka = \cos(\delta) \frac{\cos(\delta) - \sqrt{\cos^2(\delta) - \cos^2(\phi)}}{\cos(\delta) + \sqrt{\cos^2(\delta) - \cos^2(\phi)}} \text{ (Ecuación 36)}$$

3.8.2. Empuje pasivo

Es el efecto que tiene el muro sobre el terreno, solo es aplicable cuando parte de la estructura de contención está bajo la cota del terreno. Al igual que para el empuje activo, Rankine propone una ecuación:

$$Ep = \frac{1}{2} k_p \gamma h^2 \text{ (Ecuación 37)}$$

$$Kp = \cos(\delta) \frac{\cos(\delta) + \sqrt{\cos^2(\delta) - \cos^2(\phi)}}{\cos(\delta) - \sqrt{\cos^2(\delta) - \cos^2(\phi)}} \text{ (Ecuación 38)}$$

3.8.3. Factor de seguridad al deslizamiento

Para el análisis de estabilidad contra deslizamiento se debe dividir la fuerza resistente entre el empuje activo horizontal, entre mayor sea este menor será la capacidad de deslizamiento y por tanto se estaría garantizando su funcionalidad. Se calcula de la siguiente forma:

$$FS_d = \frac{Fr}{Ea_{horz}} = \frac{F_{verticales}}{F_{horizontales}} = \frac{(Fe + Ea \sin(\delta))\mu + 2/3 B C + Ep}{Ea \cos(\delta)} \text{ (Ecuación 39)}$$

3.8.4. Factor de seguridad al volcamiento

Tal como lo dice su nombre, este factor de seguridad se encarga de corroborar la tendencia del gavión a no girar sobre su “pie” o base, entre mayor sea el factor de seguridad menor será la tendencia del gavión a voltearse sobre su eje. Para su cálculo se deben tener en cuenta los momentos ocasionados por las fuerzas estabilizadoras como por las fuerzas de volcamiento (que por lo general están asociadas al empuje activo):

$$FS_v = \frac{\sum M_{estabilizadores}}{\sum M_{volcamiento}} \text{ (Ecuación 40)}$$

3.8.5. Factor de seguridad de capacidad de carga

“Es importante no sobrepasar la capacidad del suelo para absorber carga, o sea su capacidad soporte.” [32] La importancia de este factor radica en que si sobrepasamos la carga que es capaz de absorber el suelo se van a comenzar a observar fallas o incluso el hundimiento de la estructura, cambiando en cierta medida su relación con el cauce.

Para verificar el cumplimiento de esto, se procede a hallar la distancia a la que está aplicada la fuerza resultante vertical, siendo “X” la distancia desde uno de los extremos en la cual se aplicará la sumatoria de fuerzas verticales, así mismo se haya la excentricidad en la que se está incurriendo con la aplicación de esta.

$$x = \frac{B}{2} - \frac{(Mr - Mv)}{N} \text{ (Ecuación 41)}$$

“X” en muros de contención es la misma excentricidad, sin embargo los gaviones debido a su flexibilidad, evitando que se lleguen a valore elevados en la tensión de tracción, ya que se reduce la sección de trabajo de la base. [32] Por esto la excentricidad real será:

$$e = \frac{B}{2} - x \text{ (Ecuación 42)}$$

Ya teniendo la excentricidad, se procede a seleccionar uno de los dos métodos para calcular $q_{\max}$ el cual debe ser menor a la capacidad portante del suelo:

$$\text{Para } e > B/6: \quad q_{\max} = \frac{B}{3} - \frac{Fe}{7.5 q_u} \text{ (Ecuación 43)}$$

$$\text{Para } B/6 < e < e_{\max} \quad q_{\max} = \frac{4Fe}{3B - 6e} \text{ (Ecuación 44)}$$

3.9. Softwares.

3.9.1. ArcGIS®

ArcGIS® es un completo sistema que permite recopilar, organizar, administrar, analizar, compartir y distribuir información geográfica. Como la plataforma líder mundial para crear y utilizar sistemas de información geográfica (SIG), ArcGIS® es utilizada por personas de todo el mundo para poner el conocimiento geográfico al servicio de los sectores del gobierno, la empresa, la ciencia, la educación y los medios. ArcGIS® permite publicar la información geográfica para que esté accesible para cualquier usuario. El sistema está disponible en cualquier lugar a través de navegadores Web, dispositivos móviles como smartphones y equipos de escritorio. Con este programa se hace todo lo referente a la cartografía de las diferentes variables que influyen en la erosión y que residen en la cuenca.

3.9.2. HEC-RAS

Es un programa desarrollado por U.S. Army Corps of Engineers. Es un programa numérico con bordes de canal movibles diseñado para simular y predecir cambios en los perfiles del río, tasa de transporte de sedimentos y otros parámetros. [13] Con este se hace una simulación del comportamiento de la cuenca para una serie de eventos extremos y con las medidas de mitigación necesarias, permitiéndonos identificar la socavación en la cuenca antes y después.

3.9.3. HEC-HMS

El programa HEC-HMS (Hydrologic Modeling System), desarrollado por el Hydrologic Engineering Center del U.S Corps of Engineers, es un programa de simulación hidrológica tipo evento, lineal y semidistribuido, desarrollado para estimar las hidrógrafas de salida en una cuenca o varias subcuencas (caudales máximos y tiempos al pico) a partir de condiciones

extremas de lluvias, aplicando para ello algunos de los métodos de cálculo de hietogramas de diseño, pérdidas por infiltración, flujo base y conversión en escorrentía directa que han alcanzado cierta popularidad en los Estados Unidos y por extensión en nuestro país. (Cañón, B. J., 2010) citado por: [33]

3.10. Descripción de etapas y tareas

3.10.1. Etapa 1 – caracterización

En esta fase se hace todo lo referente a recolección de información pertinente y que aporte al desarrollo de este proyecto, esta información será tanto información bibliográfica, cartográfica solicitada al IGAC, meteorológica solicitada al IDEAM y además se hará trabajo de campo para la identificación de puntos críticos en el tramo elegido del caño Buque, los cuales son de gran importancia en la dinámica fluvial del caño, y el levantamiento topográfico con ayuda de un GPS Garmin 64s para tener una batimetría adecuada que permita identificar mejor la socavación y teniendo así una concepción más clara de la cuenca y así poder describirla adecuadamente.

3.10.2. Etapa 2 – cálculos y simulaciones

Con la información obtenida en la fase 1 se harán cálculos y simulaciones que permitan identificar el comportamiento del cuerpo hídrico caño Buque que nos consentirá determinar la socavación que evidencia este comportamiento y así poder determinar las medidas de mitigación óptimas para frenar dicho fenómeno y evitar futuros daños.

Primero se determinará la socavación a causa de la precipitación, esto por medio del análisis la información meteorológica, suministrada por el IDEAM, para la obtención de las curvas intensidad, duración, frecuencia (IDF) de la cuenca media caño Buque, estas IDF se utilizarán para calcular la energía cinética con la cual caen las gotas de agua y las cuales son el insumo

principal para que se presente la socavación, luego procedemos a modelar dicha cuenca en ArcGIS con la información ya calculada y lo cual nos permitirá identificar la erosión pluvial. Después procedemos a determinar la socavación causada por el flujo del agua, la cual se suple también de la información meteorológica y de la batimetría del caño, con la información meteorológica se identificarán los caudales extremos, la batimetría y los caudales extremos se le suministrarán al software HEC-RAS y en este haremos la simulación del comportamiento del cauce del caño e identificaremos la socavación por el flujo del agua. Para culminar esta etapa se propondrán distintas obras civiles y medidas de mitigación que permitan hacer frente a la socavación, buscando que esta sea la mínima, para que no haya afectación en las construcciones que se encuentran dentro de los márgenes de las riberas del caño.

3.10.3. Etapa 3 – entregables

En ésta última etapa se espera realizar el proyecto de investigación, dando las conclusiones pertinentes en cuanto a los resultados dados en la anterior etapa y con la ayuda de softwares como ArcGIS se realizará la cartografía referente a la socavación presente en la cuenca media caño Buque, antes y después de la implementación de las medidas de mitigación óptimas.

Capítulo 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1. Geomorfología

La cuenca caño Buque tiene un área aproximada de 5.825 km² lo que la clasifica como una microcuenca, es de forma alargada, poco sinuosa, tiene una densidad de drenaje moderada y su pendiente promedio del cauce es 4% (pendiente baja), sin embargo dicha pendiente no es muy representativa si la comparamos con la pendiente de cada subcuenca por la gran variación que se observa entre las características de las mismas, lo que más resalta es el cambio abrupto entre las características de la cuenca alta y media sin que haya una aparente transición, esto porque se pasa de montaña a piedemonte, lo cual ocasiona a su vez que haya una variación en la forma de las subcuencas (ver Tabla 4-1 y Fuente: Autor

Tabla 4-2).

Tabla 4-1. Resumen de parámetros geomorfológicos.

	PARÁMETRO	VALOR	INTERPRETACIÓN
GENERAL	Área	5.8252 km ²	Microcuenca
	Perímetro	20.4954 km	N.A.
	Longitud Axial	8.3313 km	N.A.
	Longitud Cauce Principal	10.1156 km	N.A.
	Orientación Predominante	NW - SE	N.A.
FORMA	Elongación	0.2691	Cuenca Alargada
	Relación de Circularidad	0.1743	Cuenca Alargada
	Índice de Gravelius	2.3777	Cuenca Alargada
	Sinuosidad	1.2142	Baja sinuosidad
RELIEVE	Cota Mínima	1300 m	N.A.
	Cota Máxima	388 m	N.A.
	Pendiente	4 %	Baja
DRENAJE	Longitud total Drenaje	17.0978 km	N.A.
	Densidad de Drenaje	2.9351	Moderada

Medidas de mitigación al efecto de socavación que se presenta en el caño Buque, entre el puente ubicado en la vía Bogotá a 1km del túnel Buenavista al puente de la Av. 40 cerca de la Cll. 15, aplicando soluciones de ingeniería

	PARÁMETRO	VALOR	INTERPRETACIÓN
	Tiempo de Concentración	201.8275 min	N.A.

Fuente: Autor

Tabla 4-2. Resumen de parámetros geomorfológicos para las subcuencas.

		CUENCA ALTA		CUENCA MEDIA		CUENCA BAJA	
	PARÁMETRO		INTERPRETACIÓN		INTERPRETACIÓN		INTERPRETACIÓN
GENERAL	Área	2.6617 km2	Microcuenca	2.0772 km2	Microcuenca	1.0863 km2	Microcuenca
	Perimetro	7.4312 km	N.A.	9.8471 km	N.A.	5.7233 km	N.A.
	Longitud Axial	2.6804 km	N.A.	3.7098 km	N.A.	2.2577 km	N.A.
	Longitud Cauce Ppal	2.9545 km	N.A.	4.4585 km	N.A.	2.6854 km	N.A.
	Orientación Predominante	NW - SE	N.A.	NW - SE	N.A.	NW - SE	N.A.
FORMA	Elongación	0.6229	Cuenca no tan alargada	0.3646	Cuenca Alargada	0.4378	Cuenca Alargada
	Relación de Circularidad	0.6057	Cuenca semicircular	0.2692	Cuenca Alargada	0.4167	Cuenca Alargada
	Índice de Gravelius	1.2754	Cuenca oval redonda	1.9131	Cuenca Alargada	1.5375	Cuenca oval oblonga
	Sinuosidad	1.1023	Baja sinuosidad	1.2018	Baja sinuosidad	1.1894	Baja sinuosidad
RELIEV	Cota Mínima	1300 m	N.A.	630 m	N.A.	430 m	N.A.
	Cota Máxima	630 m	N.A.	430 m	N.A.	388 m	N.A.
	Pendiente	19.14 %	Alta	4.01 %	Baja	1.55 %	Baja
DRENAJE	Longitud total Drenaje	6.3988 km	N.A.	6.3223 km	N.A.	3.1628 km	N.A.
	Densidad de Drenaje	2.4040	Moderada	3.0436	Moderada	2.9115	Moderada
	Tiempo de Concentración	55.58 min	N.A.	119.85 min	N.A.	117.03 min	N.A.

Fuente: Autor

4.2. Suelo de la cuenca.

De acuerdo a los sondeos realizados en el año 2000 por el SGC se identificó que en el tramo elegido de la cuenca caño Buque hay dos tipos de suelos, identificados por este estudio como suelos tipo 1 y tipo 2 (ver Figura 4-1).

El perfil tipo 1 es un perfil bien diferenciado en donde predomina un limo arcilloso de colores amarilla rojiza, amarilla ocre y café oscura; en el perfil tipo 2 se agruparon aquellos suelos que exhibían claramente un origen fluvio-torrencial, en donde bloques angulosos de tamaños diversos y una disposición caótica se encontraban embebidos en una matriz limo-gravo-arcillosa, no obstante que en algunos casos parecían tener cierto grado de estratificación. Y en cuanto a sus características geofísicas están registradas en las siguientes tablas:

Medidas de mitigación al efecto de socavación que se presenta en el caño Buque, entre el puente ubicado en la vía Bogotá a 1km del túnel Buenavista al puente de la Av. 40 cerca de la Cll. 15, aplicando soluciones de ingeniería

Tabla 4-3. Características suelo tipo 1.

ESTUDIOS PERTENECIENTES AL PERFIL TIPO 1													
Parámetro	LL (%)	LP (%)	IP (%)	IL	IC	γ (gr/cm ²)	γ_d (gr/cm ²)	Wn (%)	% Grava	% Arena	% Finos	qu (kg/cm ²)	N60 golpes/pie
Datos	166.00	163.00	163.00	114.00	114.00	90.00	54.00	227.00	201.00	200.00	200.00	90.00	521.00
Mínimo	16.91	3.50	0.10	-12.00	-2.72	1.50	1.31	2.05	0.00	3.50	0.10	0.33	1.50
Promedio	32.24	19.24	13.16	-0.67	1.67	1.96	1.65	18.28	30.80	38.89	30.29	1.90	11.29
Mediana	30.40	20.10	10.00	-0.09	1.09	2.00	1.64	18.50	34.00	35.35	23.75	1.79	9.00
Desviación estandar	8.05	6.43	9.14	1.94	1.94	0.16	0.15	7.88	22.64	16.78	24.20	0.88	6.44
Varianza	64.81	41.36	83.61	3.74	3.74	0.03	0.02	62.12	512.60	281.60	585.50	0.77	52.93
Coefficiente de variación	0.25	0.33	0.69	2.90	1.16	0.08	0.09	0.43	0.74	0.43	0.80	0.45	0.57
Coefficiente de asimetría	0.58	-0.06	1.33	-3.09	3.09	-0.94	0.04	0.01	-0.06	0.94	0.88	0.49	0.67

Fuente: [34]

Tabla 4-4. Características suelo tipo 2.

ESTUDIOS PERTENECIENTES AL PERFIL TIPO 2													
Parámetro	LL (%)	LP (%)	IP (%)	IL	IC	γ (gr/cm ²)	γ_d (gr/cm ²)	Wn (%)	% Grava	% Arena	% Finos	qu (kg/cm ²)	N60 golpes/pie
Datos	53.00	52.00	52.00	6.00	6.00	23.00		112.00	69.00	69.00	69.00		14.00
Mínimo	22.00	17.01	2.30	-6.38	1.11	1.72		4.60	0.00	11.20	3.10		21.00
Máximo	61.20	53.60	22.30	-0.11	7.38	2.00		31.60	77.00	64.40	84.70		43.50
Promedio	31.51	23.33	8.32	-2.64	3.64	1.86		12.36	46.62	27.66	25.71		32.63
Mediana	30.20	22.40	8.47	-1.55	2.55	1.87		12.10	59.50	24.20	14.80		34.50
Desviación estandar	6.53	5.79	3.75	2.55	2.55	0.06		4.76	26.50	11.95	21.41		6.62
Varianza	42.63	33.58	14.04	6.51	6.51	0.00		22.64	702.30	142.90	458.50		43.77
Coefficiente de variación	0.21	0.25	0.45	0.97	0.70	0.03		0.38	0.57	0.43	0.83		0.20
Coefficiente de asimetría	2.24	3.77	1.17	-0.84	0.84	0.03		1.80	-0.86	1.29	1.46		-0.38

Fuente: [34]

Además, también en el estudio del SGC, se sabe que los suelos en la zona de estudio son en su mayoría homogéneos con una homogeneidad mayor al 60%, esto fue identificado con base en el mapa de curvas de isovalores que se elaboró en el 2000 (ver Figura 4-2. Mapa de isovalores de índice de homogeneidad promedio.) gracias a los sondeos y estudios realizados en Villavicencio.

Medidas de mitigación al efecto de socavación que se presenta en el caño Buque, entre el puente ubicado en la vía Bogotá a 1km del túnel Buenavista al puente de la Av. 40 cerca de la Cll. 15, aplicando soluciones de ingeniería

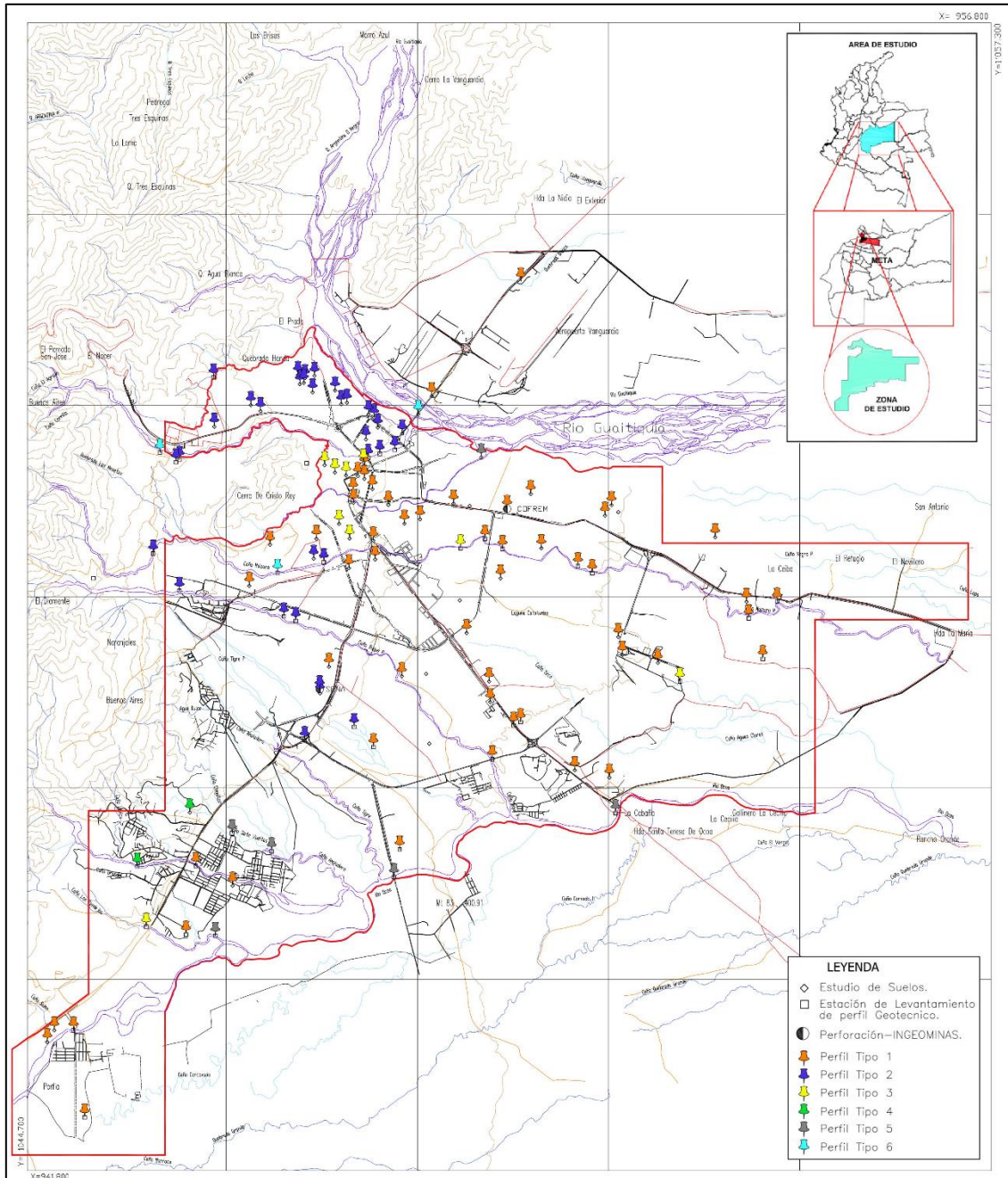


Figura 4-1. Mapa de localización de información geotécnica y exploraciones de campo de la ciudad de Villavicencio. Fuente: [34]

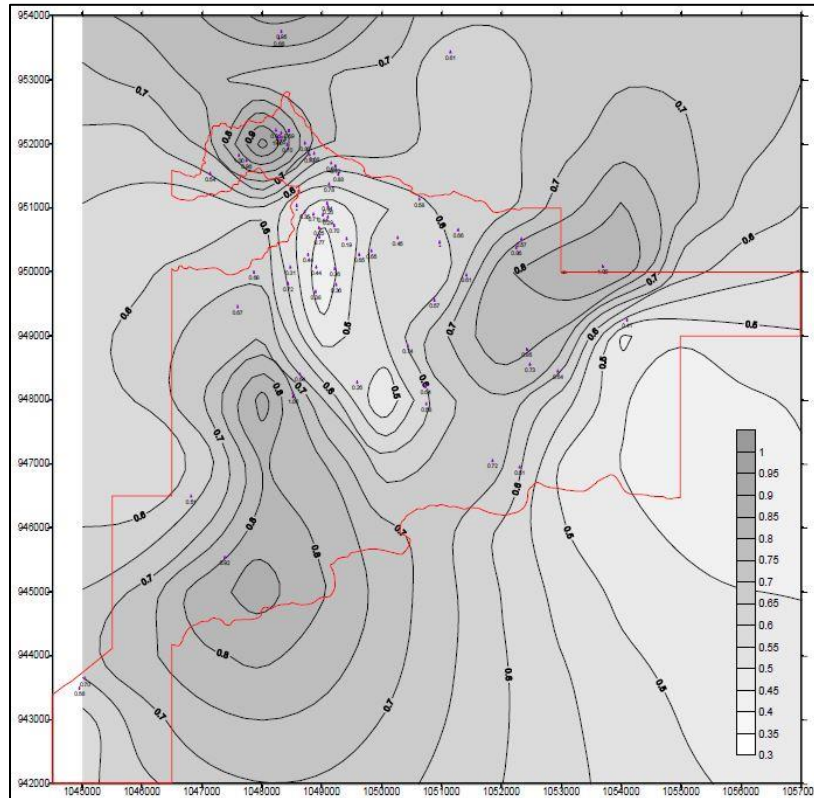


Figura 4-2. Mapa de isovalores de índice de homogeneidad promedio. Fuente: Autor

4.3. Cobertura de la cuenca.

En el mapa de cobertura y el diagrama correspondiente (ver Figura 4-3 y Figura 4-4) se puede observar como el uso del suelo en su mayoría es tejido boscoso y tejido urbano, esto a pesar de que las cuencas media y baja son mayormente urbanas, pero gracias a la cuenca alta la cual posee la mayor área y en su mayoría está constituida por bosque sin urbanizar. Para la ronda se tomaron valores de 30 m hacia cada lado, dando cumplimiento al artículo 3° del decreto 1449 de 1997, el cual, con el fin de la protección y conservación de bosques, dice que los propietarios de los predios están obligados a destinar “Una faja no inferior a 30 metros de ancho, paralela a las líneas de mareas máximas, a cada lado de los cauces de los ríos, quebradas y arroyos”.

Medidas de mitigación al efecto de socavación que se presenta en el caño Buque, entre el puente ubicado en la vía Bogotá a 1km del túnel Buenavista al puente de la Av. 40 cerca de la Cll. 15, aplicando soluciones de ingeniería

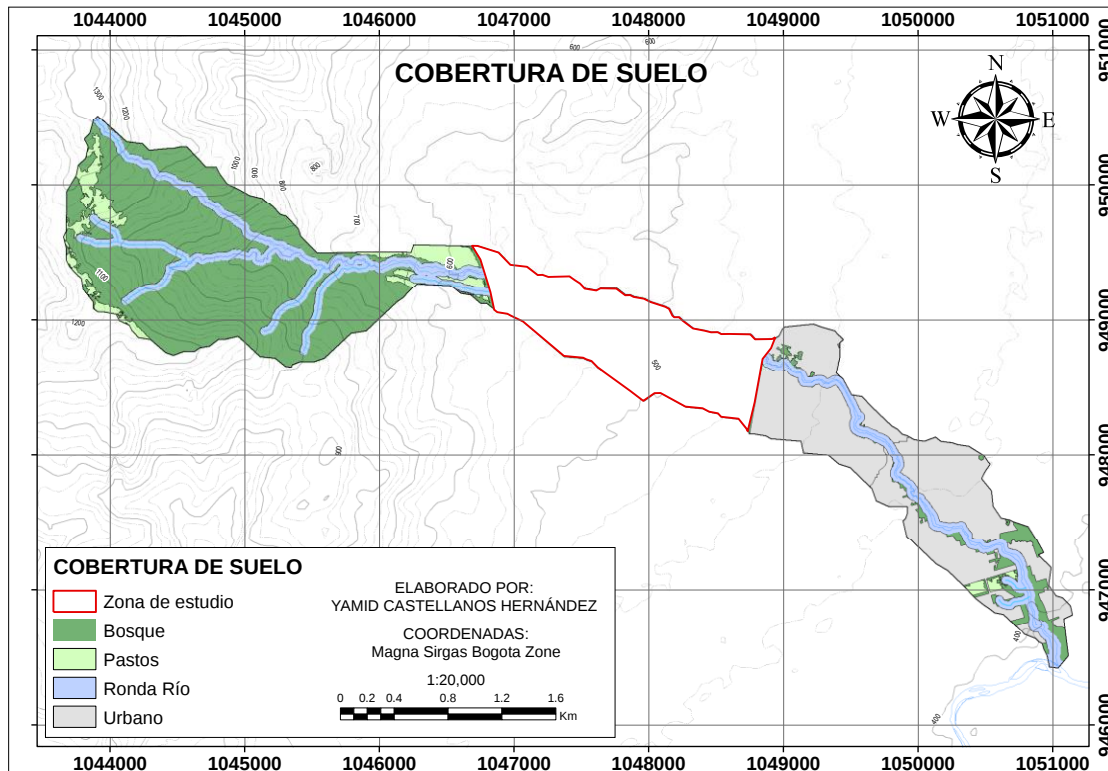


Figura 4-3. Mapa de Cobertura de suelo Caño Buque. Fuente: Autor

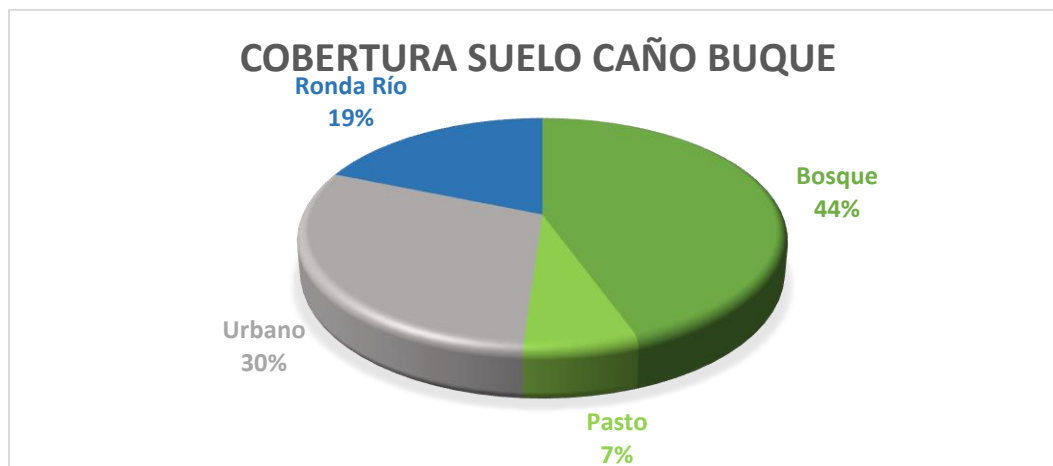


Figura 4-4. Diagrama porcentual de la cobertura del suelo. Fuente: Autor

4.4. Climatología

4.4.1. Precipitación

De acuerdo a los valores registrados por la estación Unillanos del IDEAM se estableció que la precipitación (de acuerdo a los promedios totales mensuales de precipitación, ver Figura 4-5) tiene un comportamiento monomodal, presentando mayores precipitaciones en Abril, Mayo y Junio y menores precipitaciones en Diciembre, Enero y Febrero.

Remitimos a la información de los máximos valores de precipitación en 24 horas, se puede observar en la Figura 4-6 como el comportamiento es bimodal pero mantiene la tendencia de que los mayores valores son obtenidos en Abril, Mayo y Junio y los menores en Diciembre, Enero y Febrero.

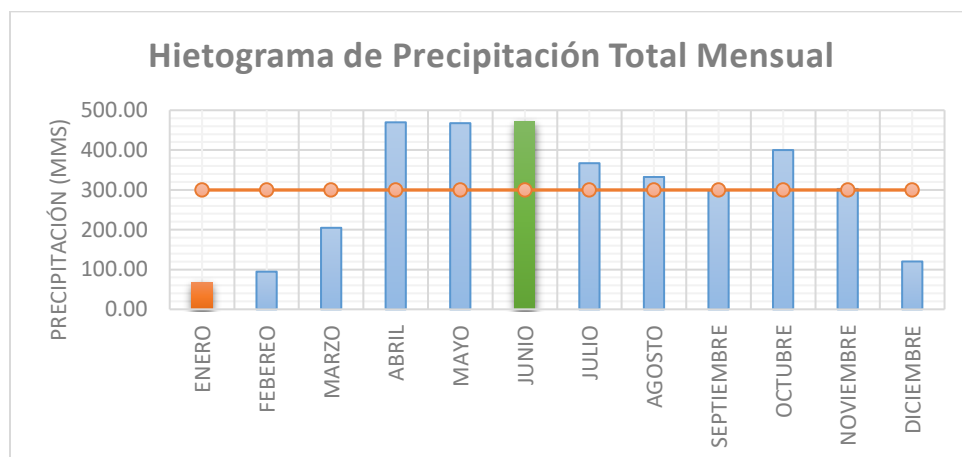


Figura 4-5. Valores promedio de Totales Mensuales de Precipitación. Fuente: Autor

Medidas de mitigación al efecto de socavación que se presenta en el caño Buque, entre el puente ubicado en la vía Bogotá a 1km del túnel Buenavista al puente de la Av. 40 cerca de la Cll. 15, aplicando soluciones de ingeniería

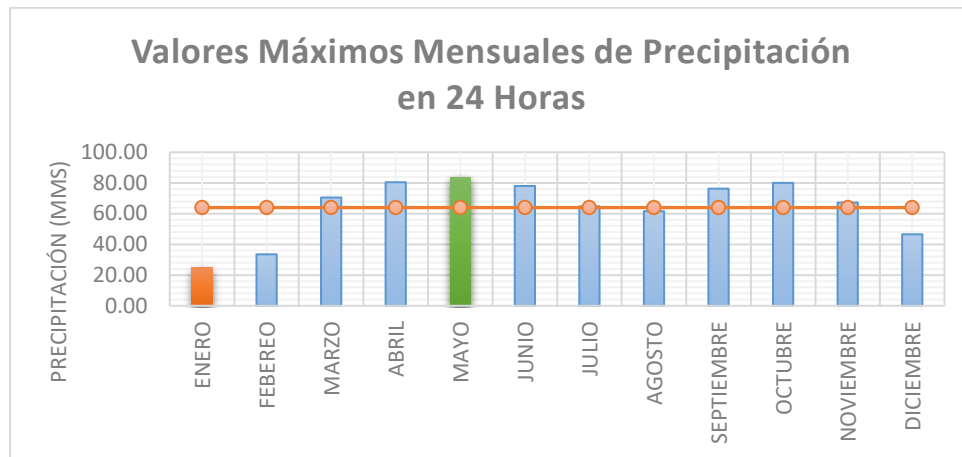


Figura 4-6. Valores promedio de Máximos Mensuales de Precipitación. Fuente: Autor

4.4.2. Temperatura

La temperatura tanto para sus valores medios y máximos tiene un comportamiento monomodal muy similar (ver Figura 4-7 y Figura 4-8), casi idéntico, teniendo su máximo en el mes de Febrero y el mínimo en el mes de Julio. Teniendo una temperatura media de 25.6 °C y una media máxima de 33°C connotando que el ambiente en el que se encuentra la cuenca es cálido.

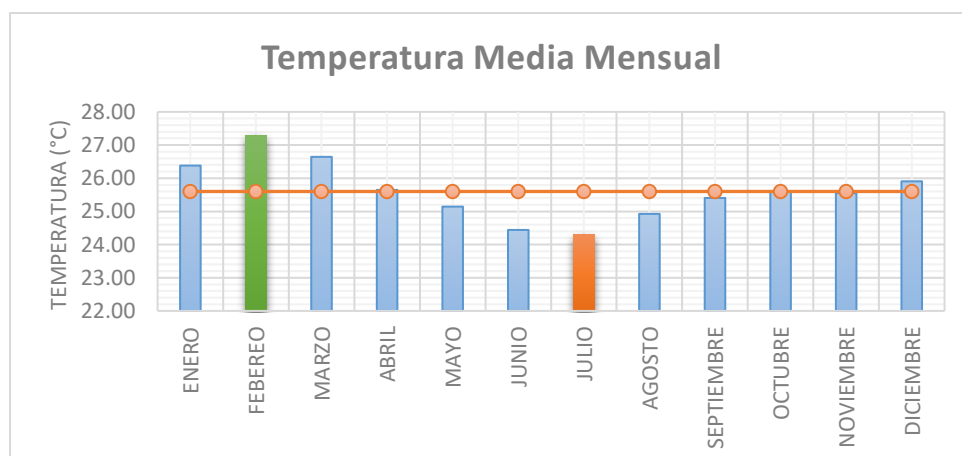


Figura 4-7. Valores promedio de Medios Mensuales de Temperatura. Fuente: Autor

Medidas de mitigación al efecto de socavación que se presenta en el caño Buque, entre el puente ubicado en la vía Bogotá a 1km del túnel Buenavista al puente de la Av. 40 cerca de la Cll. 15, aplicando soluciones de ingeniería

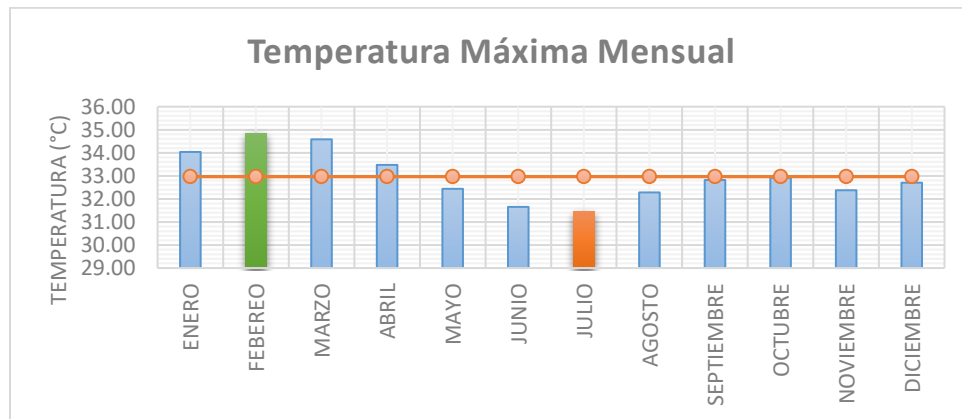


Figura 4-8. Valores promedio Máximos Mensuales de Temperatura. Fuente: Autor

4.4.3. Humedad relativa

La humedad relativa del territorio es de un clima húmedo, nunca desciende del 70%, lo cual favorece el desarrollo de nubes y la precipitación. Siendo el mayor valor de humedad del 85%, en Junio y Julio, y el menor de 72% en Febrero.

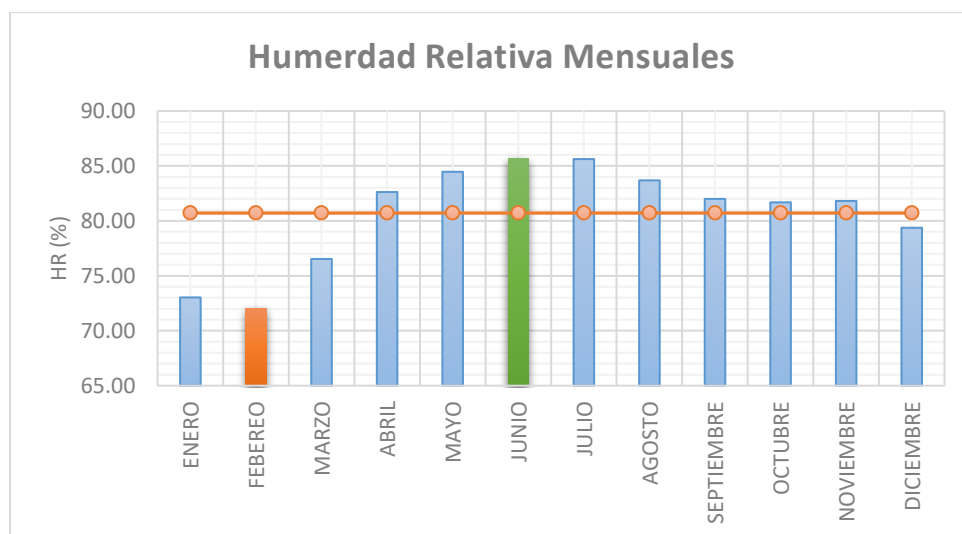


Figura 4-9. Valores promedio Mensuales de Humedad Relativa. Fuente: Autor

4.4.4. Evaporación

La evaporación media mensual tiene un comportamiento monomodal y es relativamente alta si la comparamos con la precipitación media mensual (ver Figura 4-5 y Figura 4-10), en los meses de Diciembre, Enero y Febrero, que son los meses con menor precipitación, incluso excede los valores de precipitación, y en los demás meses fluctúa entre el 50% y el 20% de la lluvia.

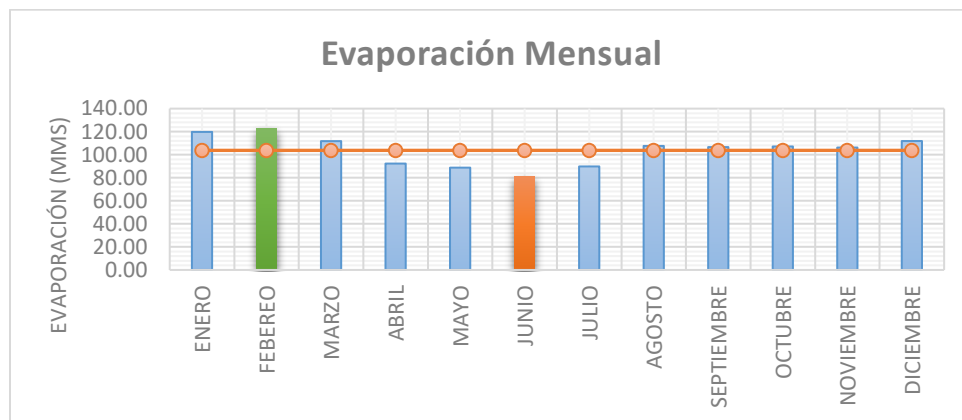


Figura 4-10. Valores promedio Mensuales de Evaporación. Fuente: Autor

4.5. Cálculo de caudal.

4.5.1. Curvas IDF

Como se decía en el capítulo anterior, las IDF fueron calculadas siguiendo el método elaborado por Díaz Granados en 1998; la información de la estación del Aeropuerto Vanguardia ya que es la que cuenta con una mayor cantidad de datos reales, debido a su buen funcionamiento (ver Figura 4-11). Se puede observar como a medida que aumenta el periodo de retorno se obtiene una mayor intensidad, por esto se toma el periodo de retorno de 100 años, buscando determinar la mayor intensidad posible y por ende una mayor amenaza.

Medidas de mitigación al efecto de socavación que se presenta en el caño Buque, entre el puente ubicado en la vía Bogotá a 1km del túnel Buenavista al puente de la Av. 40 cerca de la Cll. 15, aplicando soluciones de ingeniería

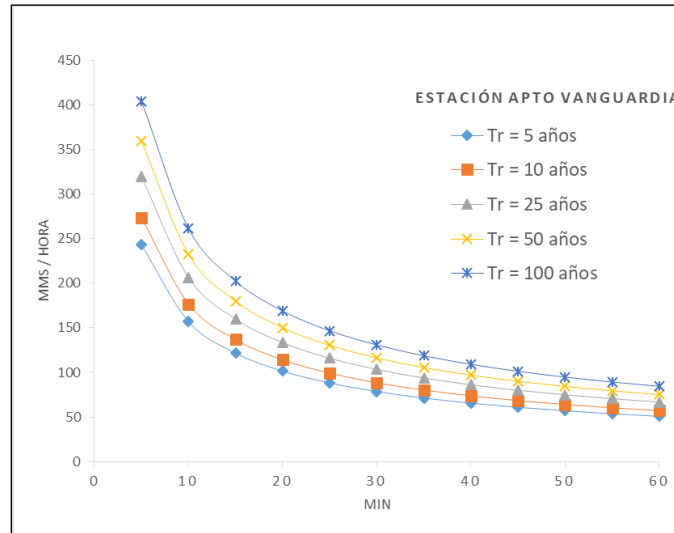


Figura 4-11. Curvas IDF para la estación del Aeropuerto Vanguardia. Fuente: Autor

4.5.2. Hietograma unitario de precipitación por bloques alternos.

El hietograma unitario de precipitación muestra la distribución de la cantidad de agua que cae en lapsos de 5 min, presentándose la mayor cantidad en los primeros 5 minutos y a partir de dicho lapso comienza a decrecer conforme al descenso de la intensidad.

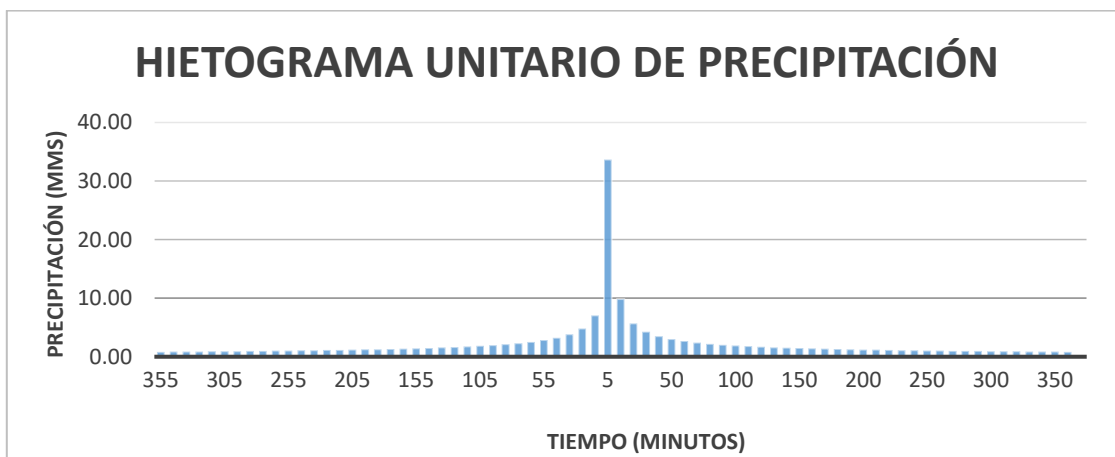


Figura 4-12. Hietograma Unitario de Precipitación. Fuente: Autor

4.5.3. Número de curva.

En general el número de curva fue alto (ver Tabla 4-5), esto indica que hay baja infiltración y mayor escorrentía superficial. Se obtuvo que a medida que se iba bajando en la cuenca, pasando de la cuenca alta a la baja, el número de curva aumentaba ya que hay una mayor cobertura urbana y una menor cobertura vegetal, lo cual no favorece el proceso de infiltración. Se muestra un número de curva general, sin embargo para el cálculo del caudal presente en el proceso erosivo del tramo elegido se utilizó solo el caudal aportado por la cuenca alta para ser más precisos y no sobreestimarlos.

Tabla 4-5. Cálculo del Número de Curva, cuenca Caño Buque.

ID	Área (km ²)	CN II	A*CN II (km ²)
Alto Buque	2.6617	70.2308	186.9340
Medio Buque	2.0772	88.1413	183.0892
Bajo Buque	1.0863	91.7360	99.6552
	5.8253		469.6783
CN		80.6278937	

Fuente: Autor

4.5.4. Modelación en HEC-HMS para obtención de caudal.

Con ayuda del software HEC-HMS se calcularon los caudales pico que aportaba cada una de las subcuencas siendo afectado este valor por: El hietograma unitario de precipitación, el área de la subcuenca, el periodo de retorno elegido, el número de curva y el tiempo de retardo (el cual equivale al 60% del tiempo de concentración). Estos datos fueron suministrados al software y se obtuvo los siguientes resultados:

Medidas de mitigación al efecto de socavación que se presenta en el caño Buque, entre el puente ubicado en la vía Bogotá a 1km del túnel Buenavista al puente de la Av. 40 cerca de la Cll. 15, aplicando soluciones de ingeniería

Tabla 4-6. Resultados HEC-HMS.

Elementos Hidrológicos	Área de Drenaje (KM2)	Descarga (M3/S)	Pico	Volumen (1000 M3)
Cuenca_alta_CB	2.6617	40.9		82.52
Tramo A-B	2.6617	40.9		82.52
Cuenca_media_CB	2.0772	29.5		108.65
Junction-1	4.7389	61.1		93.97
Tramo B-C	4.7389	61.1		93.97
Cuenca_baja_CB	1.0863	16.6		118.29
Salida	5.8253	74.6		98.51

Fuente: Autor

De estos datos solo se consideró el caudal aportado por la cuenca alta, es decir $40.9 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, el cual se espera que se obtenga a las 3 horas y media de iniciado el aguacero (ver Figura 4-13).

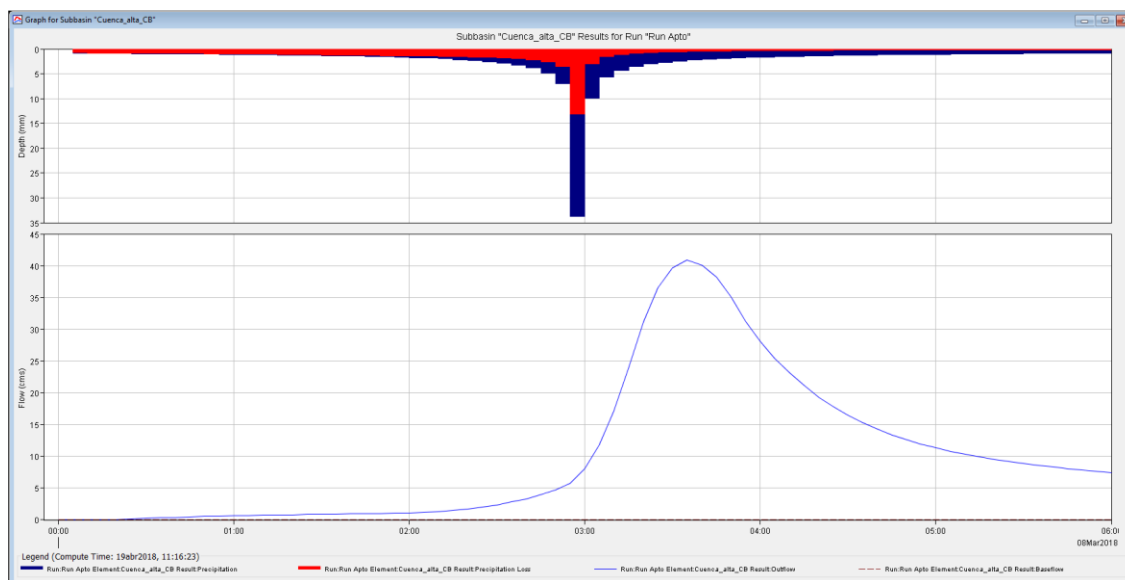


Figura 4-13. Hidrograma sintético resultante. Fuente: Autor

4.6. Erosión (USLE)

4.6.1. Factor R

La cuenca Caño Buque presenta altos volúmenes de precipitación anual que están en un rango aproximado de 2900 a 4300 mm. Los valores obtenidos de “R” oscilan entre 44.74 y 52.45 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ (ver Figura 4-14).

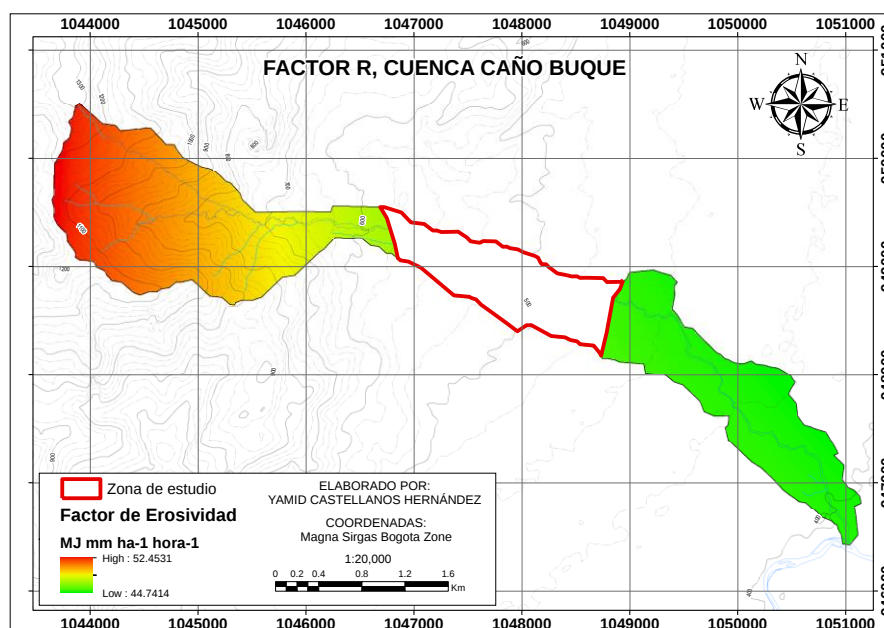


Figura 4-14. Mapa Factor de Erosividad R.¹ Fuente: Autor

4.6.2. Factor k

El factor de erodabilidad al ser determinado con base en el DSMW el cual es de una escala muy grande y la cuenca al ser pequeña, hace que se divida la cuenca en solo dos valores de factor K: 0.014 y 0.016 (ver Figura 4-15).

¹ Para ver mapa ampliado, remitirse al Anexo E.

Medidas de mitigación al efecto de socavación que se presenta en el caño Buque, entre el puente ubicado en la vía Bogotá a 1km del túnel Buenavista al puente de la Av. 40 cerca de la Cll. 15, aplicando soluciones de ingeniería

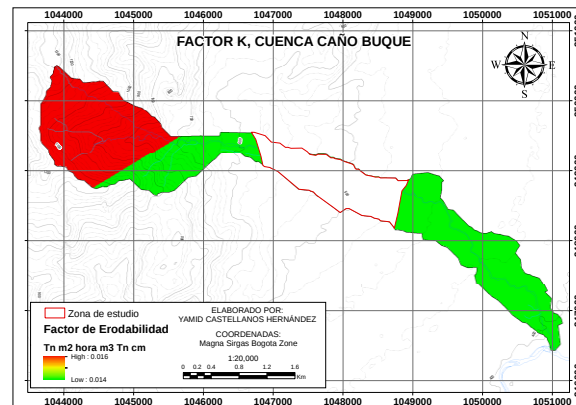


Figura 4-15. Mapa Factor de Erodabilidad K.² Fuente: Autor

4.6.3. Factor LS

En la Figura 4-16 se puede observar la incidencia que tiene el factor topográfico en el proceso erosivo de la cuenca caño Buque. El factor LS en la cuenca varía de 0.38 a 1371.38, se puede ver como los altos valores se dan a lo largo del cauce del caño, y a su alrededor el factor es bajo debido a que la inclinación y longitud es baja.

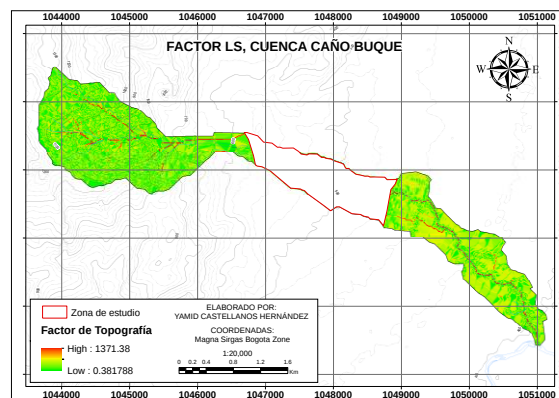


Figura 4-16. Mapa de los factores topográficos LS.³ Fuente: Autor

² Para ver mapa ampliado, remitirse al Anexo F.

³ Para ver mapa ampliado, remitirse al Anexo G.

4.6.4. Factor C

Los valores del factor de cobertura varían de 0.2 a 1.0 de los cuales se puede decir que los valores inferiores a 0.4 corresponden a zonas donde la cobertura brinda una gran protección contra la erosión y por tanto los mayores valores (cerca de 1.0) son asignados a coberturas con baja protección contra la erosión como lo son zonas descubiertas sin ningún tipo de cobertura o simplemente con una cobertura muy pobre. En ese orden de ideas, en la ronda del caño y en la zona urbanizada vamos a tener valores altos y en dónde están los árboles tendremos bajos valores que mitigan la erosión.

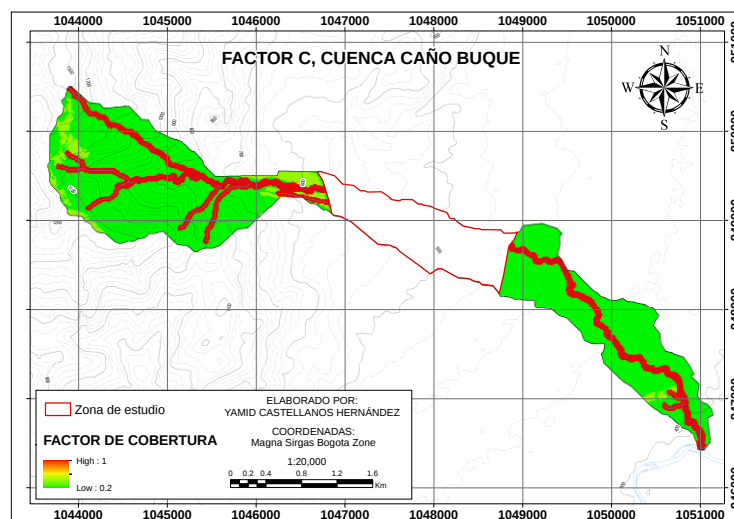


Figura 4-17. Factor de Cobertura de suelo C.⁴ Fuente: Autor

4.6.5. Factor P

El factor de Prácticas de conservación no varía mucho respecto al Factor C debido a que como se dijo en el capítulo anterior, en vez de investigar que prácticas de conservación se podían dar en la zona, lo que se hizo fue calcularlo de acuerdo a la cobertura del suelo. Este

⁴ Para ver mapa ampliado, remitirse al Anexo H.

parámetro oscila entre 0.1 y 1 y tiene las mismas condiciones que el factor C, es decir, donde hay tejido urbano lógicamente no tiene prácticas de conservación que disminuyan la erosión lo cual se castiga con un factor de 1, es decir que no afecta en nada a la erosión presente en la cuenca, y en donde hay bosques lo esperado es que haya buenas prácticas de conservación que mitiguen en gran parte el fenómeno erosivo, por ende, se tienen menores valores.

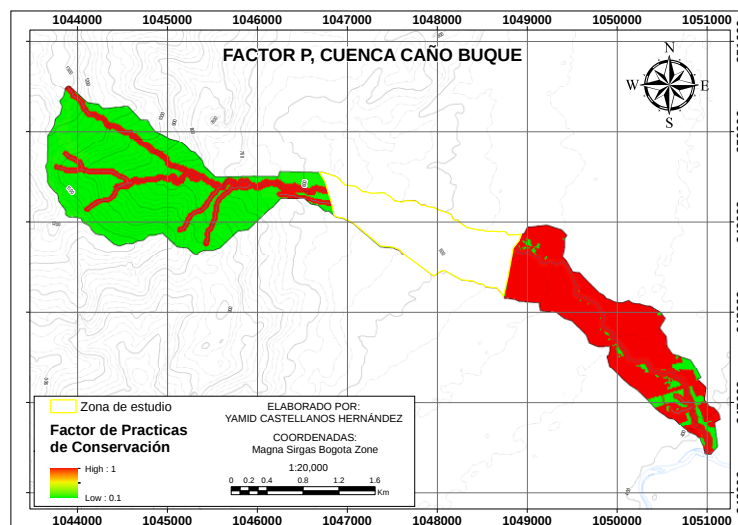


Figura 4-18. Factor de Prácticas de Conservación de suelo P.⁵ Fuente: Autor

4.6.6. Erosión real

La erosión real resulta de realizar la multiplicación entre los factores anteriormente presentados, está en un rango de 0 a 527.2 teniendo en su mayoría del cauce una pérdida de suelo severa a catastrófica (mayores a 15 Tn ha⁻¹ al año) y a los alrededores del cauce valores de erosión de normal a moderado (menores a 15 Tn ha⁻¹ al año) (ver Figura 4-19).

⁵ Para ver mapa ampliado, remitirse al Anexo I.

Medidas de mitigación al efecto de socavación que se presenta en el caño Buque, entre el puente ubicado en la vía Bogotá a 1km del túnel Buenavista al puente de la Av. 40 cerca de la Cll. 15, aplicando soluciones de ingeniería

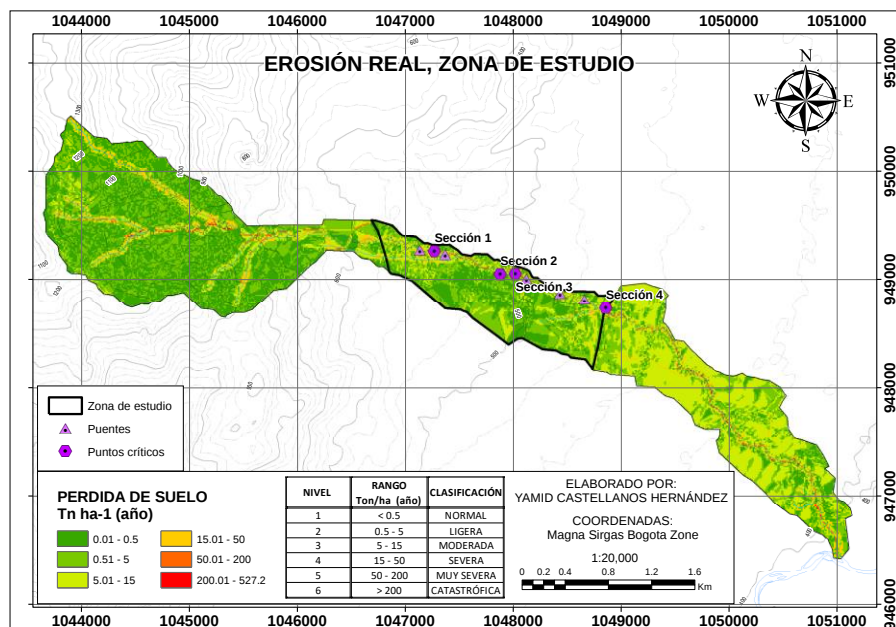


Figura 4-19. Mapa erosión cuenca Caño Buque. Fuente: Autor⁶

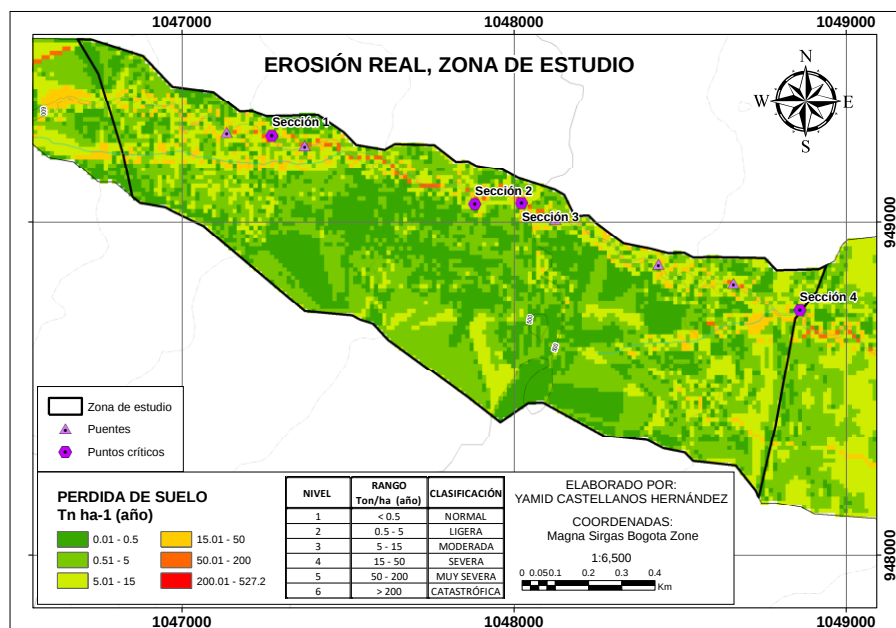


Figura 4-20. Mapa erosión, zona de estudio. Fuente: Autor

⁶ Para ver mapa ampliado, remitirse al Anexo J.

4.6.7. Erosión potencial

La erosión potencial se calcula de igual forma que la erosión real, pero difiere en que se consideran los valores de los factores de cobertura y prácticas de conservación como parámetros nulos o iguales a 1, supuesto de que todo está urbanizado o que simplemente el terreno no tiene cobertura que haga frente a la acción erosiva, generando un mayor potencial erosivo. Los valores de la erosión potencial de la cuenca caño Buque fluctúan entre 0 y 1054.4 (valor máximo que equivale a casi el doble de la erosión real) en su mayoría la cuenca presenta erosión severa y en el cauce muy severa y catastrófica (ver Figura 4-21 y Figura 4-22).

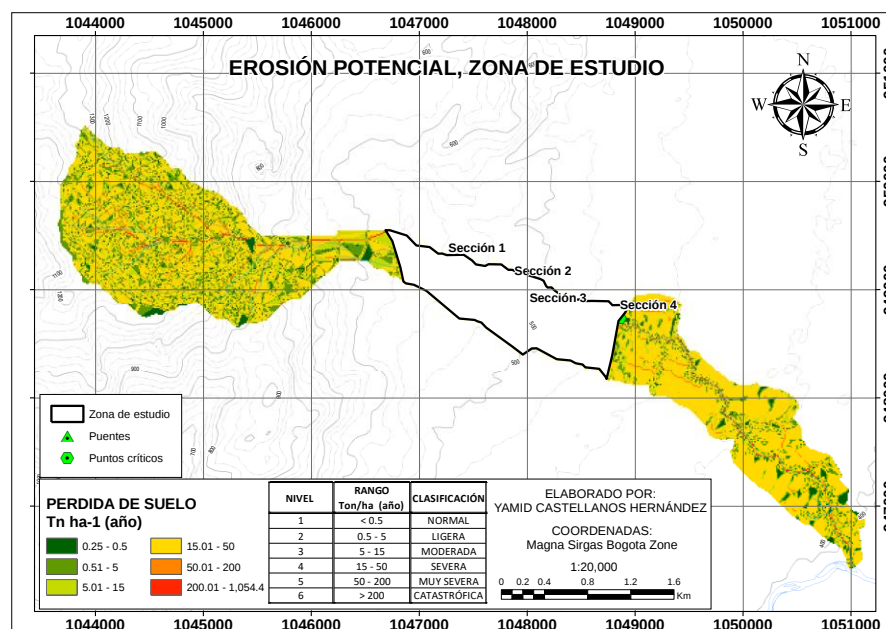


Figura 4-21. Mapa Erosión potencial de la cuenca Caño Buque.⁷ Fuente: Autor

⁷ Para ver mapa ampliado, remitirse al Anexo K.

Medidas de mitigación al efecto de socavación que se presenta en el caño Buque, entre el puente ubicado en la vía Bogotá a 1km del túnel Buenavista al puente de la Av. 40 cerca de la Cll. 15, aplicando soluciones de ingeniería

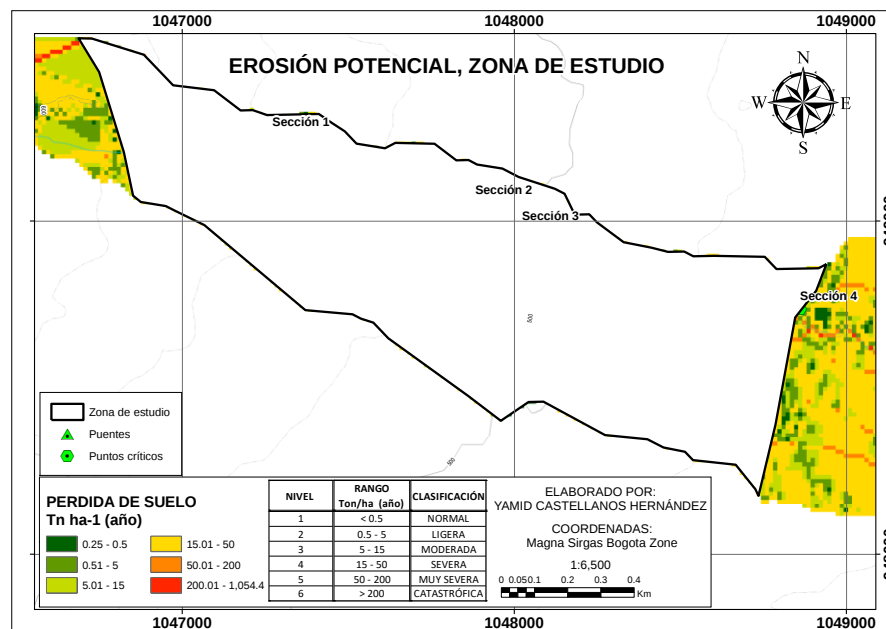


Figura 4-22. Mapa Erosión potencial de la cuenca Caño Buque. Fuente: Autor

4.7. Socavación.

La identificación de la socavación es un proceso puntual que se realizó en 4 secciones elegidas, del tramo vía Bogotá – Av. 40, en las cuales por medio de visitas de campo se les identificó un gran potencial erosivo y la información calculada de erosión. Estas secciones son: Dos rectas, una curva y un puente. Buscando abarcar la mayor cantidad de escenarios en los que se presenta este fenómeno y tener un mejor muestreo. Además de las 4 secciones seleccionadas, se determinó la socavación en cada uno de los puentes presentes a lo largo de este tramo, esto porque son estructuras de cuidado que si llegan a quedar inhábiles repercuten en la sociedad y para observar la forma en que se ve afectada una sección con la instauración de una estructura en su cauce.

Para todas las secciones se tomó el caudal aportado por la cuenca alta $40.9 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ y los valores de ancho, altura de lámina de agua y área de agua en las secciones se identificaron a partir de los resultados de la simulación en HEC-RAS (ver Tabla 4-7).

Medidas de mitigación al efecto de socavación que se presenta en el caño Buque, entre el puente ubicado en la vía Bogotá a 1km del túnel Buenavista al puente de la Av. 40 cerca de la Cll. 15, aplicando soluciones de ingeniería

Tabla 4-7. Parámetros para el cálculo de socavación.

ID SECCIÓN	PERIODO DE RETORNO [años]	CAUDAL [m ³ /s]	ÁREA [m ²]	ANCHO [m]	ALTURA MEDIA [m]	V _{prom} [m/s]	Y _d [Ton/m ³]	Y _{mez} [Ton/m ³]	μ	α	β	ψ	x
sección 1	100	40.900	18.0575	13.9340	1.296	2.265	1.655	1.050	1.000	1.906	0.985	1.046	0.305
sección 2	100	40.900	65.1635	32.6700	1.995	0.628	1.655	1.050	1.000	0.396	0.985	1.046	0.305
sección 3	100	40.900	11.6139	9.4000	1.236	3.522	1.655	1.050	1.000	3.059	0.985	1.046	0.305
sección 4.1	100	40.900	26.3447	14.1940	1.856	1.552	1.657	1.050	1.000	1.028	0.985	1.046	0.305
sección 4.2	100	40.900	13.3945	9.0000	1.488	3.053	1.657	1.050	0.899	2.605	0.985	1.046	0.305
sección 4.3	100	40.900	11.5225	9.0000	1.280	3.550	1.657	1.050	0.881	3.416	0.985	1.046	0.305
sección 4.4	100	40.900	13.2961	13.7960	0.964	3.076	1.657	1.050	1.000	3.153	0.985	1.046	0.305
sección 5.1	100	40.900	17.1265	18.8290	0.910	2.388	1.655	1.050	1.000	2.544	0.985	1.046	0.305
sección 5.2	100	40.900	16.2847	16.0000	1.018	2.512	1.655	1.050	0.940	2.641	0.985	1.046	0.305
sección 5.3	100	40.900	16.1087	16.0000	1.007	2.539	1.655	1.050	0.939	2.691	0.985	1.046	0.305
sección 5.4	100	40.900	14.3109	17.2754	0.828	2.858	1.655	1.050	1.000	3.240	0.985	1.046	0.305
sección 6.1	100	40.900	21.3445	12.2130	1.748	1.916	1.655	1.050	1.000	1.321	0.985	1.046	0.305
sección 6.2	100	40.900	12.4527	8.0000	1.557	3.284	1.655	1.050	0.903	2.708	0.985	1.046	0.305
sección 6.3	100	40.900	11.0927	8.0000	1.387	3.687	1.655	1.050	0.890	3.332	0.985	1.046	0.305
sección 6.4	100	40.900	13.9586	11.9586	1.167	2.930	1.655	1.050	1.000	2.643	0.985	1.046	0.305
sección 7.1	100	40.900	17.1645	11.7980	1.455	2.383	1.655	1.050	1.000	1.856	0.985	1.046	0.305
sección 7.2	100	40.900	13.1348	10.0000	1.313	3.114	1.655	1.050	0.885	2.932	0.985	1.046	0.305
sección 7.3	100	40.900	12.2648	10.0000	1.226	3.335	1.655	1.050	0.877	3.320	0.985	1.046	0.305
sección 7.4	100	40.900	12.5496	11.5090	1.090	3.259	1.655	1.050	1.000	3.076	0.985	1.046	0.305
sección 8.1	100	40.900	64.4472	40.0930	1.607	0.635	1.657	1.050	1.000	0.462	0.985	1.046	0.305
sección 8.2	100	40.900	45.9885	39.5440	1.163	0.889	1.657	1.050	1.000	0.804	0.985	1.046	0.305
sección 8.3	100	40.900	45.9094	39.4882	1.163	0.891	1.657	1.050	1.000	0.806	0.985	1.046	0.305
sección 8.4	100	40.900	64.0459	39.7870	1.610	0.639	1.657	1.050	1.000	0.465	0.985	1.046	0.305
sección 9.1	100	40.900	31.4632	15.5320	2.026	1.300	1.657	1.050	1.000	0.812	0.985	1.046	0.305
sección 9.2	100	40.900	27.8395	13.0000	2.142	1.469	1.657	1.050	0.961	0.921	0.985	1.046	0.305
sección 9.3	100	40.900	27.8135	13.0000	2.140	1.471	1.657	1.050	0.961	0.922	0.985	1.046	0.305
sección 9.4	100	40.900	31.2617	15.5211	2.014	1.308	1.657	1.050	1.000	0.820	0.985	1.046	0.305

Fuente: Autor

4.7.1. Sección 1 (recta)

Esta sección tiene una longitud aproximada de 20 m y está ubicada a 100 m al nor–occidente del puente que cruza al caño Buque en la carrera 47 (ver Figura 4-23). Fue seleccionada al observar que en el margen izquierdo del caño tiene una pendiente pronunciada, aproximadamente de 90°, y una altura próxima a los 10 m, lo cual hace que está ladera sea inestable y susceptible a colapsar, además de que ya se observa un avance en el proceso de socavación (ver Figura 4-24). Se identificó un volumen de socavación de 223.28 m³ teniendo una altura máxima de socavación de 1.05 m.

Medidas de mitigación al efecto de socavación que se presenta en el caño Buque, entre el puente ubicado en la vía Bogotá a 1km del túnel Buenavista al puente de la Av. 40 cerca de la Cll. 15, aplicando soluciones de ingeniería



Figura 4-23. Mapa de ubicación, sección 1. Fuente: Autor



Figura 4-24. Sección 1, tramo recto. Fuente: Autor

En esta sección la profundidad máxima de socavación fue de 1.05m y la menor fue de 0.71m y se identificó un volumen de socavación de 223.28 m³ (ver Tabla 4-8 y Figura 4-25).

Medidas de mitigación al efecto de socavación que se presenta en el caño Buque, entre el puente ubicado en la vía Bogotá a 1km del túnel Buenavista al puente de la Av. 40 cerca de la Cll. 15, aplicando soluciones de ingeniería

Tabla 4-8. Cálculo se socavación en la sección 1.

SECCIÓN 1	H0 [m]	α	β	ψ	γ_d [Ton/m3]	x	Hs [m]	Soc. Gen [m]
0.0000	0.0000	1.9055	0.9846	1.0455	1.6554	0.3047	0.0000	0.0000
0.0000	1.2100	1.9055	0.9846	1.0455	1.6554	0.3047	1.9177	0.7077
3.7390	1.2130	1.9055	0.9846	1.0455	1.6554	0.3047	1.9238	0.7108
7.7940	1.2150	1.9055	0.9846	1.0455	1.6554	0.3047	1.9278	0.7128
9.6900	1.5090	1.9055	0.9846	1.0455	1.6554	0.3047	2.5427	1.0337
10.2370	1.4080	1.9055	0.9846	1.0455	1.6554	0.3047	2.3273	0.9193
12.0010	1.5200	1.9055	0.9846	1.0455	1.6554	0.3047	2.5664	1.0464
13.9300	1.2200	1.9055	0.9846	1.0455	1.6554	0.3047	1.9380	0.7180
13.9330	0.0000	1.9055	0.9846	1.0455	1.6554	0.3047	0.0000	0.0000

Fuente: Autor

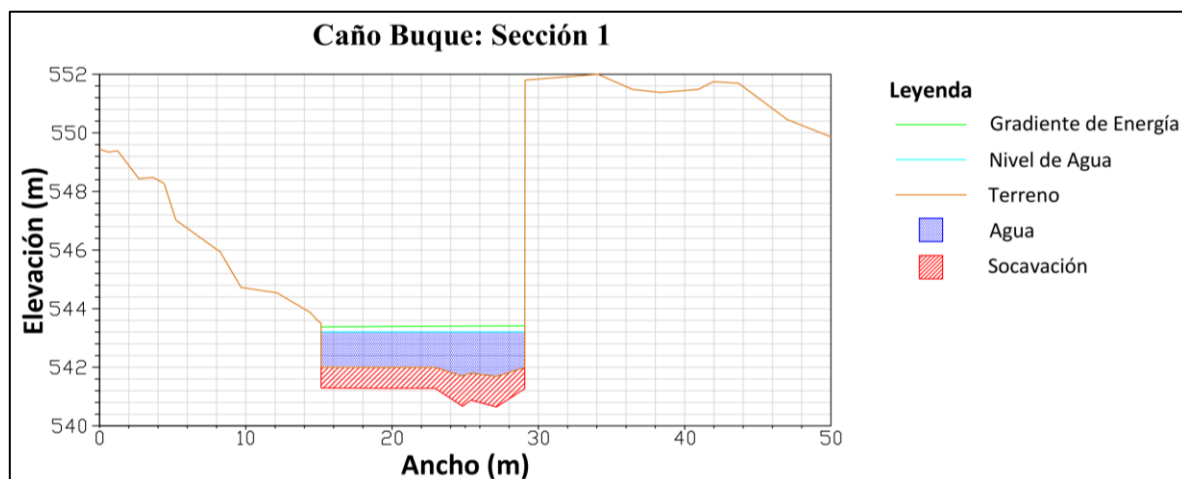


Figura 4-25. Socavación presente en la sección 1. Fuente: Autor

4.7.2. Sección 2 (curva)

Esta sección está ubicada a 215 m al occidente del puente que cruza el caño buque en la carrera 44 (ver Figura 4-26); en la segunda sección se observó un deterioro avanzado del margen derecho, en el cual había evidencia de que la erosión y la socavación habían hecho caer un árbol (ver Figura 4-27), razón suficiente como para evaluar dicha sección.

El cálculo de la socavación en esta sección es diferente en la medida de que al utilizar el método de socavación general para una recta los resultados fueron negativos (ver Tabla 4-9), indicando que no hay socavación, esto debido al descenso de la velocidad en la curva, sin embargo al considerar que es una curva, método en el que se indica una profundidad máxima de socavación basado en la sección recta más próxima. La profundidad máxima de socavación para esta curva es de 3.2 m y un volumen de socavación de 197.39 m³ (ver Tabla 4-9 y Figura 4-28).



Figura 4-26. Mapa de ubicación, sección 2. Fuente: Autor

Medidas de mitigación al efecto de socavación que se presenta en el caño Buque, entre el puente ubicado en la vía Bogotá a 1km del túnel Buenavista al puente de la Av. 40 cerca de la Cll. 15, aplicando soluciones de ingeniería



Figura 4-27. Sección 2, curva con deslizamiento. Fuente: Autor

Tabla 4-9. Cálculo de socavación en recta y curva sección 2.

SECCIÓN 2	Método sección en recta, normal								Considerando curva		
	H0 [m]	α	β	ψ	Yd [Ton/m3]	x	Hs [m]	Soc. Gen [m]	H0 [m]	Hs [m]	Socav. [m]
0	0	0.3961	0.9846	1.0455	1.6554	0.3047	0.0000	0.0000	0	3.203	3.203
2.411	1.931	0.3961	0.9846	1.0455	1.6554	0.3047	1.0453	-0.8857	1.931	3.203	1.272
3.109	2.38	0.3961	0.9846	1.0455	1.6554	0.3047	1.3652	-1.0148	2.38	3.203	0.823
22.901	2.38	0.3961	0.9846	1.0455	1.6554	0.3047	1.3652	-1.0148	2.38	3.203	0.823
25.827	1.919	0.3961	0.9846	1.0455	1.6554	0.3047	1.0370	-0.8820	1.919	3.203	1.284
28.677	1.443	0.3961	0.9846	1.0455	1.6554	0.3047	0.7205	-0.7225	1.443	3.203	1.760
29.139	1.38	0.3961	0.9846	1.0455	1.6554	0.3047	0.6805	-0.6995	1.38	3.203	1.823
29.65	1.21	0.3961	0.9846	1.0455	1.6554	0.3047	0.5753	-0.6347	1.21	3.203	1.993
30.102	1.029	0.3961	0.9846	1.0455	1.6554	0.3047	0.4678	-0.5612	1.029	3.203	2.174
31.722	0.38	0.3961	0.9846	1.0455	1.6554	0.3047	0.1310	-0.2490	0.38	3.203	2.823
32.67	0	0.3961	0.9846	1.0455	1.6554	0.3047	0.0000	0.0000	0	3.203	3.203

Fuente: Autor

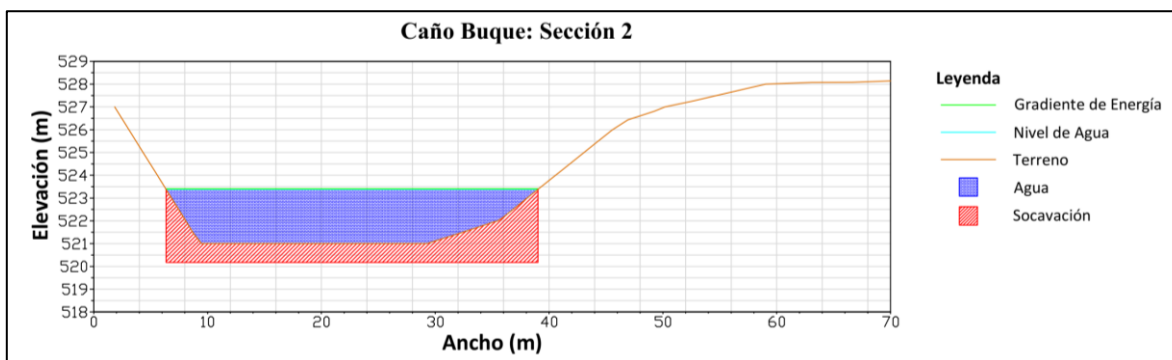


Figura 4-28. Socavación presente en la sección 2. Fuente: Autor

4.7.3. Sección 3 (recta)

Esta sección tiene una longitud de 7 m y se ubicada a 80 m al occidente del puente que cruza el caño buque en la carrera 44 (ver Figura 4-29), al igual que la primera sección es una sección que está en un transcurso recto del caño, por tanto, se calcula de la misma forma. Se considera de nuevo una sección recta porque a diferencia de la sección 1, en esta sección hay evidencia de daños ocasionados por el cauce (ver Figura 4-30) que sin duda es producto de la socavación. La mayor altura de socavación es de 3.05 m y el volumen de socavación equivale a 112.43 m³ (ver Tabla 4-10 y Figura 4-31) el cual es menor a los anteriores, pero es considerable debido a que hay una reducción en el área del cauce que ocasiona mayores velocidades que favorece el fenómeno de socavación.

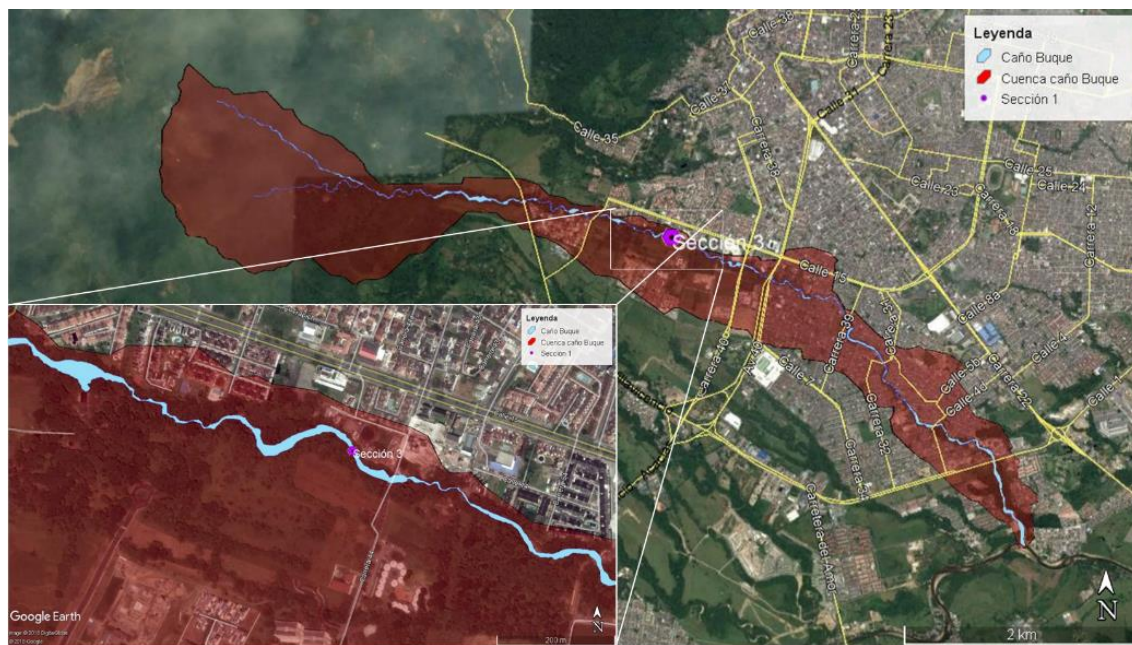


Figura 4-29. Mapa de ubicación, sección 3. Fuente: Autor

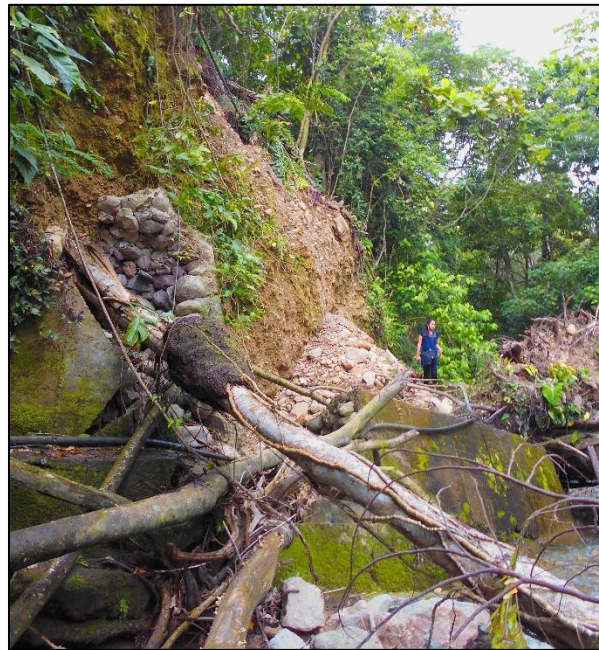


Figura 4-30. Desprendimiento ocasionado por el flujo del caño Buque, sección 3. Fuente: Autor

Tabla 4-10. Cálculo de la socavación en Sección 3.

sección 3	H0 [m]	α	β	ψ	γ_d [Ton/m3]	x	Hs [m]	Soc. [m]	Gen
0	0	3.0585	0.9846	1.0455	1.6554	0.3047	0.0000	0.0000	
2.068	0.79	3.0585	0.9846	1.0455	1.6554	0.3047	1.5987	0.8087	
3.05	1.166	3.0585	0.9846	1.0455	1.6554	0.3047	2.6287	1.4627	
6.894	1.858	3.0585	0.9846	1.0455	1.6554	0.3047	4.7667	2.9087	
7.225	1.918	3.0585	0.9846	1.0455	1.6554	0.3047	4.9642	3.0462	
7.846	1.918	3.0585	0.9846	1.0455	1.6554	0.3047	4.9642	3.0462	
9.341	1.035	3.0585	0.9846	1.0455	1.6554	0.3047	2.2575	1.2225	
9.342	0.035	3.0585	0.9846	1.0455	1.6554	0.3047	0.0298	-0.0052	
9.4	0	3.0585	0.9846	1.0455	1.6554	0.3047	0.0000	0.0000	

Fuente: Autor

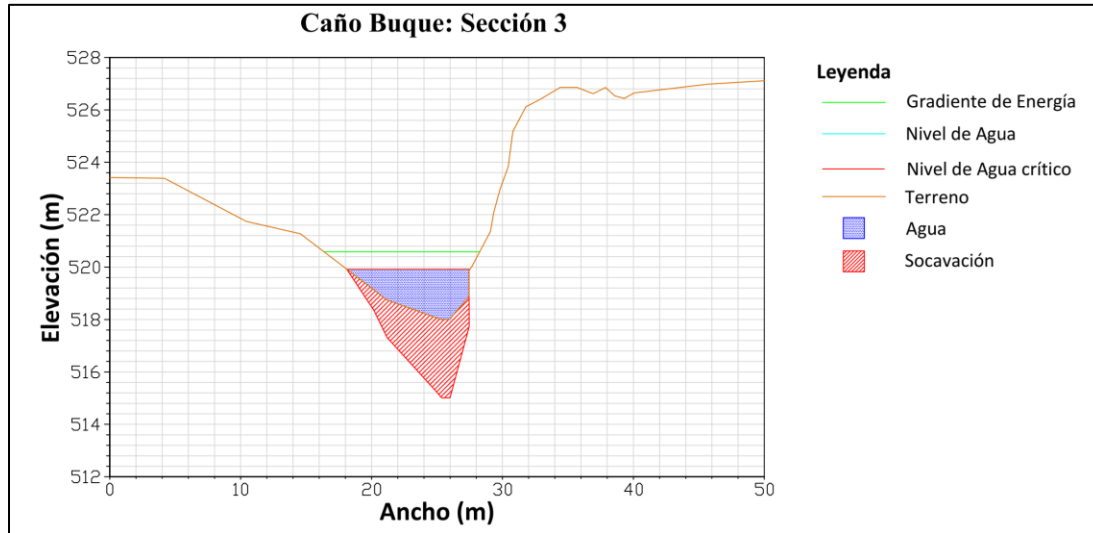


Figura 4-31. Socavación en la sección 3. Fuente: Autor

4.7.4. Sección 4 (puente)

El puente de la Av. 40 está situado de forma perpendicular al flujo del agua, en este puente ya se puede observar la pérdida de suelo a causa de la socavación (ver Figura 4-33); Para observar mejor el fenómeno de socavación y su relación con la instauración de un puente se consideraron cuatro (4) momentos de socavación: momento aguas arriba con puente (4.1), aguas arriba sin puente (4.2), aguas abajo con puente (4.3) y aguas abajo sin puente (4.4). Con esta división se pudo corroborar que con la implementación del puente, al contraerse la sección característica del caño, la socavación aumenta debido al aumento de velocidad y altura de lámina de agua (ver Tabla 4-11 y Figura 4-34). La sección aguas arriba sin el puente presenta una socavación de máximo de 41cm y un volumen de socavación de 15.93m^3 . Al instaurar el puente este máximo pasa a ser de 1.86m sin contar los estribos en los cuales se presenta una socavación máxima de 4.69m y con un volumen total de socavación de 604.04m^3 , los estribos presentan alturas mayores de socavación debido a la oposición directa que le hacen al flujo continuo del agua. Este patrón se observa en todos los puentes dependiendo de la relación entre el ancho sin contraer y ancho resultante de la contracción, a mayor contracción hay una mayor profundidad de socavación.

Medidas de mitigación al efecto de socavación que se presenta en el caño Buque, entre el puente ubicado en la vía Bogotá a 1km del túnel Buenavista al puente de la Av. 40 cerca de la Cl. 15, aplicando soluciones de ingeniería

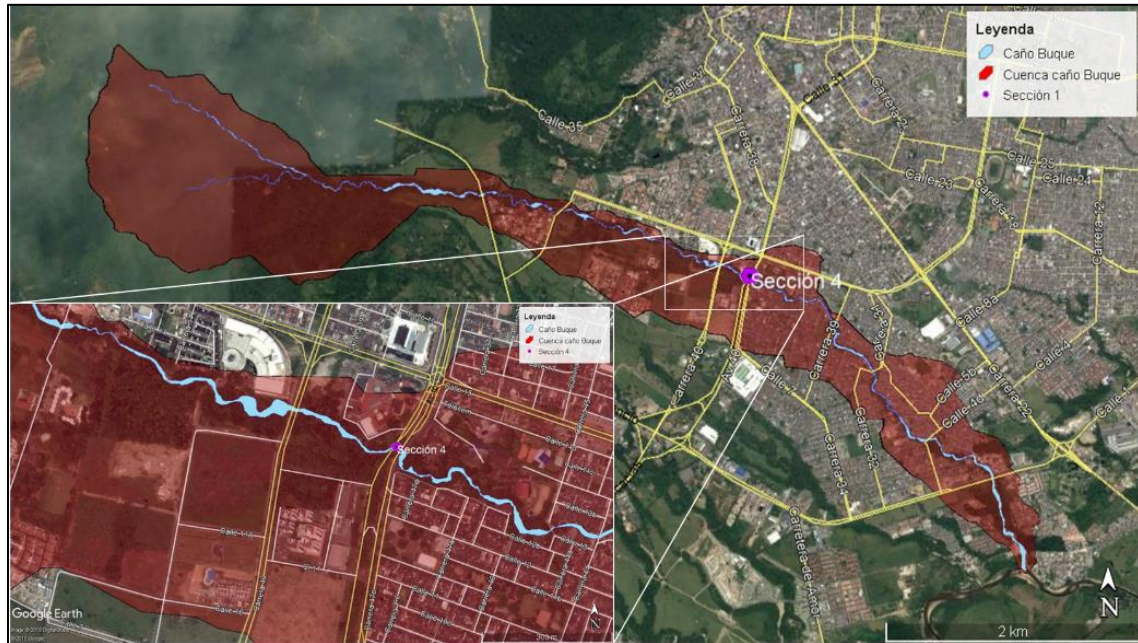


Figura 4-32. Mapa de ubicación, sección 4. Fuente: Autor



Figura 4-33. Socavación en estribo del puente de la Av. 40 cerca a la calle 15. Fuente: Autor

Medidas de mitigación al efecto de socavación que se presenta en el caño Buque, entre el puente ubicado en la vía Bogotá a 1km del túnel Buenavista al puente de la Av. 40 cerca de la Cll. 15, aplicando soluciones de ingeniería

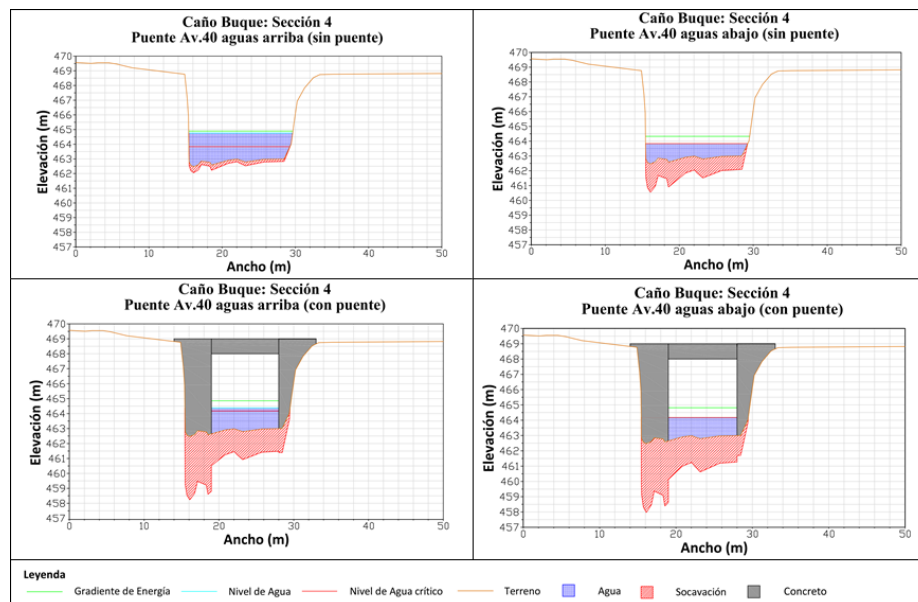


Figura 4-34. Socavación en la sección 4. Fuente: Autor

Tabla 4-11. Cálculo de la socavación en terreno natural y estribos, Puente Av.40 Aguas arriba (sin puente).

SECCIÓN 4.1	H0 [m]	α	β	ψ	γ_d [Ton/m ³]	x	Hs [m]	Soc. Gen [m]
0	0	1.0279	0.9846	1.0455	1.6571	0.3045	0.0000	0.0000
0.057	1.973	1.0279	0.9846	1.0455	1.6571	0.3045	2.2297	0.2567
0.288	2.203	1.0279	0.9846	1.0455	1.6571	0.3045	2.5670	0.3640
0.672	2.299	1.0279	0.9846	1.0455	1.6571	0.3045	2.7108	0.4118
1.326	2.165	1.0279	0.9846	1.0455	1.6571	0.3045	2.5106	0.3456
1.71	1.915	1.0279	0.9846	1.0455	1.6571	0.3045	2.1463	0.2313
2.882	1.992	1.0279	0.9846	1.0455	1.6571	0.3045	2.2572	0.2652
3.113	2.184	1.0279	0.9846	1.0455	1.6571	0.3045	2.5388	0.3548
5.4	1.857	1.0279	0.9846	1.0455	1.6571	0.3045	2.0636	0.2066
6.61	1.78	1.0279	0.9846	1.0455	1.6571	0.3045	1.9549	0.1749
7.014	1.857	1.0279	0.9846	1.0455	1.6571	0.3045	2.0636	0.2066
7.744	1.973	1.0279	0.9846	1.0455	1.6571	0.3045	2.2297	0.2567
8.878	1.896	1.0279	0.9846	1.0455	1.6571	0.3045	2.1191	0.2231
10.272	1.796	1.0279	0.9846	1.0455	1.6571	0.3045	1.9774	0.1814
13.036	1.766	1.0279	0.9846	1.0455	1.6571	0.3045	1.9353	0.1693
13.99	0.742	1.0279	0.9846	1.0455	1.6571	0.3045	0.6392	-0.1028
14.194	0	1.0279	0.9846	1.0455	1.6571	0.3045	0.0000	0.0000

Fuente: Autor.

Medidas de mitigación al efecto de socavación que se presenta en el caño Buque, entre el puente ubicado en la vía Bogotá a 1km del túnel Buenavista al puente de la Av. 40 cerca de la Cll. 15, aplicando soluciones de ingeniería

Tabla 4-12. Cálculo de la socavación en terreno natural y estribos, Puente Av.40 Aguas arriba (con puente).

SOCAVACIÓN EN TERRENO NATURAL								
SECCIÓN 4.2	H0 [m]	α	β	ψ	γ_d [Ton/m3]	x	Hs [m]	Soc. Gen [m]
3.556	0	2.6054	0.9846	1.0455	1.6571	0.3045	0.0000	0.0000
3.556	1.737	2.6054	0.9846	1.0455	1.6571	0.3045	3.8653	2.1283
5.393	1.474	2.6054	0.9846	1.0455	1.6571	0.3045	3.1339	1.6599
6.603	1.397	2.6054	0.9846	1.0455	1.6571	0.3045	2.9263	1.5293
7.007	1.474	2.6054	0.9846	1.0455	1.6571	0.3045	3.1339	1.6599
7.737	1.59	2.6054	0.9846	1.0455	1.6571	0.3045	3.4524	1.8624
8.871	1.513	2.6054	0.9846	1.0455	1.6571	0.3045	3.2402	1.7272
10.265	1.413	2.6054	0.9846	1.0455	1.6571	0.3045	2.9692	1.5562
12.556	1.388	2.6054	0.9846	1.0455	1.6571	0.3045	2.9022	1.5142
12.556	0	2.6054	0.9846	1.0455	1.6571	0.3045	0.0000	0.0000

SOCAVACIÓN EN ESTRIBOS							
Área [m2]	Q1 [m3/s]	Pq	P α	Pr	Ho (m)	Ds (m)	Soc. Gen [m]
6.0315	18.4171	3.6021	1	1	0	0	0.0000
					1.590	5.727	4.1374
					1.820	6.556	4.7359
					1.916	6.902	4.9857
					1.782	6.419	4.6370
					1.532	5.518	3.9864
					1.609	5.796	4.1868
					1.801	6.487	4.6864
1.5032	4.5900	2.1522	1	1	1.737	6.257	4.5199
					1.388	2.987	1.5992
					1.383	2.976	1.5934
					0.359	0.773	0.4136
					0	0	0.0000

Fuente: Autor.

Medidas de mitigación al efecto de socavación que se presenta en el caño Buque, entre el puente ubicado en la vía Bogotá a 1km del túnel Buenavista al puente de la Av. 40 cerca de la Cll. 15, aplicando soluciones de ingeniería

Tabla 4-13. Cálculo de la socavación en terreno natural y estribos, Puente Av.40 Aguas abajo (con puente).

SOCAVACIÓN EN TERRENO NATURAL								
SECCIÓN 4.3	H0 [m]	α	β	ψ	γ_d [Ton/m3]	x	Hs [m]	Soc. Gen [m]
3.552	0	3.4163	0.9846	1.0455	1.6571	0.3045	0.0000	0.0000
3.552	1.529	3.4163	0.9846	1.0455	1.6571	0.3045	4.0422	2.5132
5.389	1.266	3.4163	0.9846	1.0455	1.6571	0.3045	3.1761	1.9101
6.599	1.189	3.4163	0.9846	1.0455	1.6571	0.3045	2.9314	1.7424
7.003	1.266	3.4163	0.9846	1.0455	1.6571	0.3045	3.1761	1.9101
7.733	1.382	3.4163	0.9846	1.0455	1.6571	0.3045	3.5525	2.1705
8.867	1.305	3.4163	0.9846	1.0455	1.6571	0.3045	3.3016	1.9966
10.261	1.205	3.4163	0.9846	1.0455	1.6571	0.3045	2.9819	1.7769
12.552	1.18	3.4163	0.9846	1.0455	1.6571	0.3045	2.9031	1.7231
12.552	0	3.4163	0.9846	1.0455	1.6571	0.3045	0.0000	0.0000

SOCAVACIÓN EN ESTRIBOS							
Área [m2]	Q1 [m3/s]	Pq	P α	Pr	Ho (m)	Ds (m)	Soc. Gen [m]
5.3057	18.8330	3.6315	1	1	0	0	0.0000
					1.175	4.267	3.0920
					1.382	5.019	3.6367
					1.612	5.854	4.2419
					1.708	6.203	4.4946
					1.574	5.716	4.1420
					1.324	4.808	3.4841
					1.401	5.088	3.6867
					1.593	5.785	4.1919
					1.529	5.552	4.0233
1.1919	4.2307	2.1022	1	1	1.180	2.481	1.3007
					1.175	2.470	1.2951
					0.151	0.317	0.1664
					0	0	0.0000

Fuente: Autor.

Tabla 4-14. Cálculo de la socavación en terreno natural y estribos, Puente Av.40 Aguas abajo (sin puente)

SECCIÓN 4.4	H0 [m]	α	β	ψ	γ_d [Ton/m3]	x	Hs [m]	Soc. Gen [m]
0	0	3.1527	0.9846	1.0455	1.6571	0.3045	0.0000	0.0000
0.005	0.836	3.1527	0.9846	1.0455	1.6571	0.3045	1.7575	0.9215
0.039	1.043	3.1527	0.9846	1.0455	1.6571	0.3045	2.3316	1.2886
0.27	1.273	3.1527	0.9846	1.0455	1.6571	0.3045	3.0076	1.7346
0.654	1.369	3.1527	0.9846	1.0455	1.6571	0.3045	3.3003	1.9313
1.308	1.235	3.1527	0.9846	1.0455	1.6571	0.3045	2.8934	1.6584
1.692	0.985	3.1527	0.9846	1.0455	1.6571	0.3045	2.1672	1.1822
2.864	1.062	3.1527	0.9846	1.0455	1.6571	0.3045	2.3860	1.3240
3.095	1.254	3.1527	0.9846	1.0455	1.6571	0.3045	2.9504	1.6964
5.382	0.927	3.1527	0.9846	1.0455	1.6571	0.3045	2.0055	1.0785
6.592	0.85	3.1527	0.9846	1.0455	1.6571	0.3045	1.7952	0.9452
6.996	0.927	3.1527	0.9846	1.0455	1.6571	0.3045	2.0055	1.0785
7.726	1.043	3.1527	0.9846	1.0455	1.6571	0.3045	2.3316	1.2886
8.86	0.966	3.1527	0.9846	1.0455	1.6571	0.3045	2.1139	1.1479
10.254	0.866	3.1527	0.9846	1.0455	1.6571	0.3045	1.8385	0.9725
13.018	0.836	3.1527	0.9846	1.0455	1.6571	0.3045	1.7575	0.9215
13.796	0	3.1527	0.9846	1.0455	1.6571	0.3045	0.0000	0.0000

Fuente: Autor.

Las gráficas y cálculos de la sección 5 a la 9 (puentes presentes en el tramo) se encuentran en el anexo C, no se incluyeron en el documento ya que su socavación es calculada de la misma forma que en la sección 4. En estas secciones se observó el mismo desarrollo de la socavación que la sección 4 teniendo un aumento considerable en el volumen de socavación y mayor profundidad de socavación en los estribos.

4.8. Obras de mitigación

Para el diseño de gaviones se tiene que conocer distintas propiedades del suelo como lo son el peso específico del suelo y del gavión, el ángulo de fricción interna, la capacidad portante del suelo, entre otros. Los estudios de suelos que se tomaron como referencia del área de estudio no tenían información referente a capacidad de carga “qu”, cohesión “C” ni ángulo de fricción interna, sin embargo con base a la bibliografía estudiada, hay valores que con el tiempo y las investigaciones hechas se han ido correlacionando de acuerdo a las características del suelo con las que si se contaba y gracias a esto se elaboró la siguiente tabla:

Tabla 4-15. Características de las Arcillas (suelos cohesivos)

Arcilla	N ₇₀	qu (kg/cm ²)	C (kg/cm ²)	Angulo de fricción interna	Observación
Muy Blanda	0 - 2	< 0.25	< 0.125	0°	Se deforma entre los dedos cuando se aprieta.
Blanda	3 - 5	0.25 - 0.5	0.125 - 0.25	0 - 2°	Se deforma fácilmente al apretar.
Media	6 - 9	0.5 - 1.0	0.25 - 0.50	2 - 4°	-
Compacta	10 - 16	1.0 - 2.0	0.5 - 1.0	4 - 6°	Difícil de deformar al apretar con la mano.
Muy Compacta	17 - 30	2.0 - 4.0	1.0 - 2.0	6 - 12°	Muy difícil de deformar con las manos.
Dura	> 30	> 4.0	> 2.0	> 14°	Casi imposible de deformar por las manos.

Fuente: Autor, basado en [35], [36],

De acuerdo a la Tabla 4-15 se le asignaron valores de cohesión y ángulo de fricción interna a los dos tipos de suelos anteriormente mencionados y además se agregó la capacidad de carga última al suelo tipo dos (2) que no contaba con dicho valor (ver Tabla 4-16).

Tabla 4-16. Capacidad portante, cohesión y ángulo de fricción interna de los tipos de suelo de la cuenca caño Buque.

Tipo de suelo	N60	N70	qu (kg/cm ²)	C (kg/cm ²)	Angulo de fricción interna
1	11.29	13.17	1.90	0.95	14.09
2	32.63	38.07	5.48	2.74	8.91

Fuente: Autor, basado en [35], [36].

Para la mitigación de la socavación en las cuatro secciones críticas o principales, se diseñaron tres (3) tipos de gaviones que difieren en cuanto a forma y tamaño para cumplir con los factores de seguridad establecidos por la NSR 10 (ver Figura 4-35).

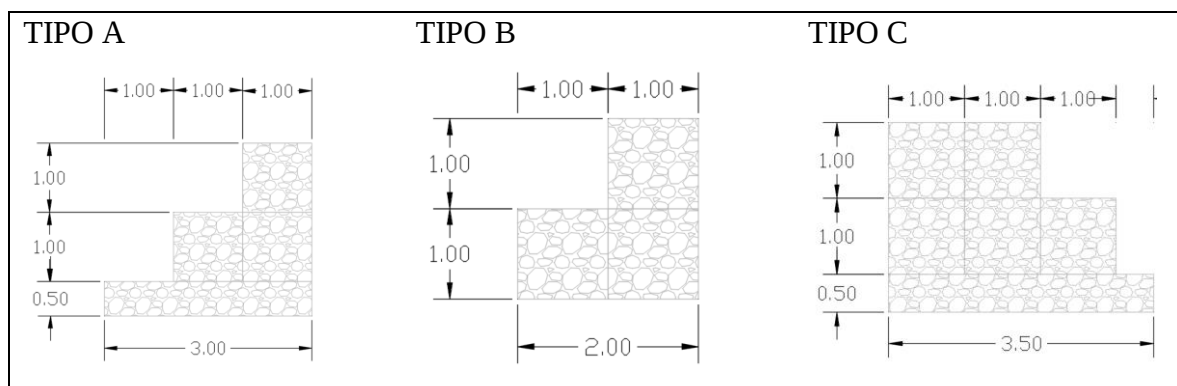


Figura 4-35. Tipos de gavión empleados. Fuente: Autor

En la sección 1, se propuso el gavión tipo A en la margen izquierda del caño para así frenar el deterioro que se observó en el talud que ronda los 10 metros de altura y los 20 metros de largo, para prevenir así un posible colapso (ver Figura 4-36).

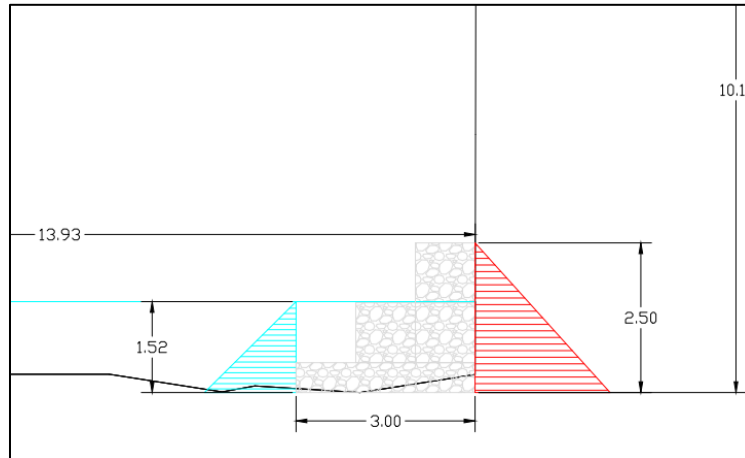


Figura 4-36. Sección 1, con gavión tipo A. Fuente: Autor

En la sección 2, se adoptó el gavión tipo C al margen izquierdo donde había un derrumbe de un árbol y el cual se atribuyó al alto fenómeno erosivo desarrollado en dicho punto además de ser el lado externo de la curva lo que hace que reciba una mayor carga (ver Figura 4-37).

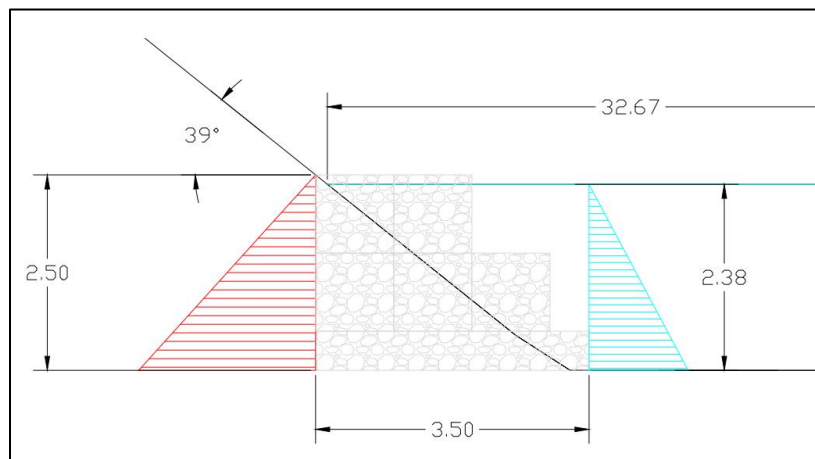


Figura 4-37. Sección 2, con gavión tipo C. Fuente: Autor

Para la sección 3 al ser de un ancho menor al de las otras secciones, se optó por un gavión más pequeño el tipo B, para así no afectar en gran medida la dinámica fluvial del caño (ver Figura 4-38).

Medidas de mitigación al efecto de socavación que se presenta en el caño Buque, entre el puente ubicado en la vía Bogotá a 1km del túnel Buenavista al puente de la Av. 40 cerca de la Cll. 15, aplicando soluciones de ingeniería

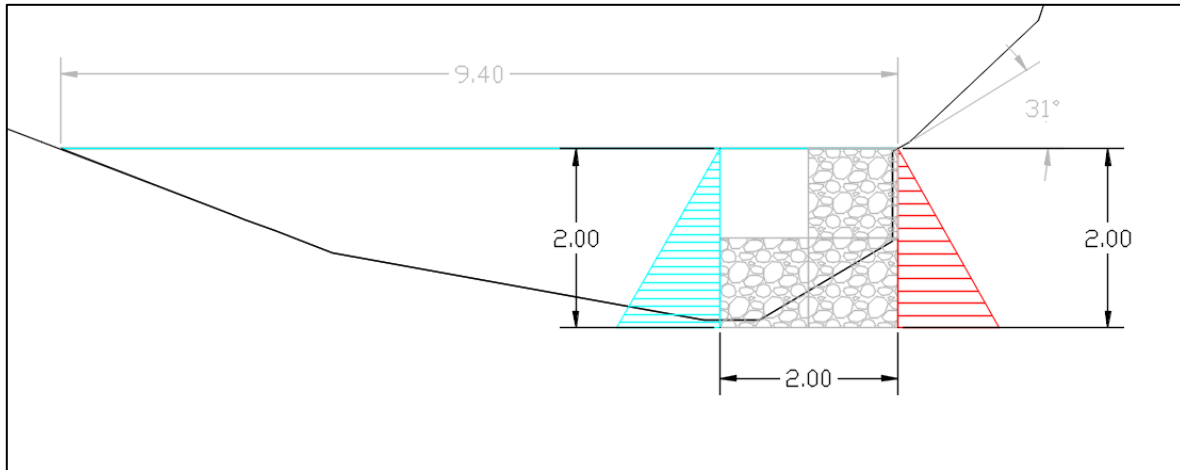


Figura 4-38. Sección 3, gavión tipo B. Fuente: Autor

Por último a la sección 4, que se podría considerar la más complicada por tener mayor socavación a causa del puente, se decidió poner un gavión tipo A al margen derecho y uno tipo B al margen izquierdo, ambos con 5 metros de longitud, ubicándolos aguas arriba del puente para así reducir gradualmente la velocidad antes de llegar a la zona del puente y mitigar de esta forma la socavación que se desarrolla en esta sección (ver **Figura 4-39**).

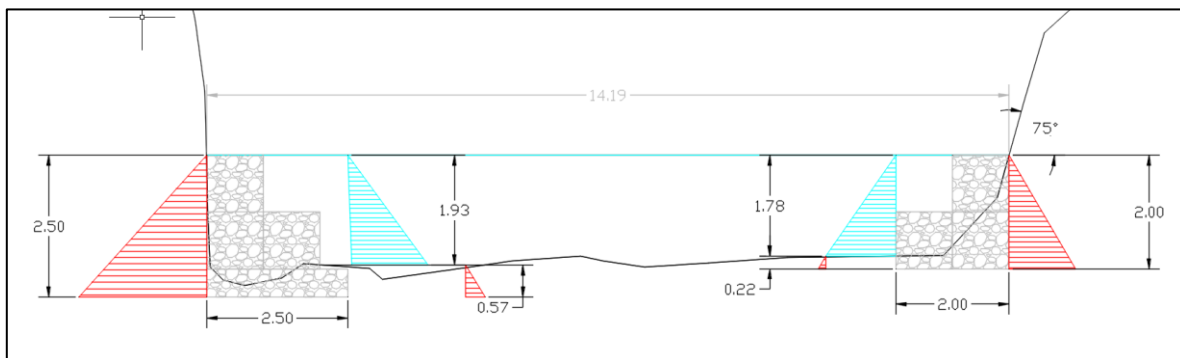


Figura 4-39. Sección 4, puente Av. 40, gaviones tipo A y tipo B. Fuente: Autor

Capítulo 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Con base en los resultados obtenidos se puede concluir que el caño Buque tiene un proceso de erosión y socavación muy alto en la cuenca alta y media debido al alto volumen de agua que maneja, a causa de su alta pendiente y precipitación, además de esto se puede inferir que si llega a darse un evento extremo, sería en los meses de Abril, Mayo y Junio (meses en los cuales la precipitación es mayor y la evaporación menor) facilitando la acumulación de agua, favoreciendo que haya un mayor caudal y por tanto que el fenómeno de socavación aumente y se asemeje al descrito en el documento.

El que se hayan determinado altos valores de socavación y de erosión evidencian que las obras de mitigación en el cauce del caño Buque son necesarias para estar preparados frente a un evento extremo que podría suceder y poner en riesgo las edificaciones y personas que se encuentren en el margen de la ladera del cuerpo hídrico. Así mismo queda claro que este tipo de estudios son muy importantes en la labor del ingeniero en el caso de que se quiera hacer una obra aledaña al cauce de un cuerpo hídrico en donde es pertinente hacer estos estudios para estar preparados y evitar que haya daños a futuro.

En cuanto a las recomendaciones, hay tanto a futuros estudios de investigación como a la implementación de un proyecto como este en la realidad. En futuros proyectos se debe intentar contar con información más precisa como lo es: Estudios de suelos, recolección de información topográfica, medición de caudales in situ. Esto con el fin de que se tenga un estudio más acercado a lo real y que si es posible pueda ser utilizado realmente, además de que es mucho más sencillo desarrollar un proyecto pequeño con datos reales, ya que por lo general no se encuentra mucha información en línea. Y con respecto a la implementación de un proyecto de obras de mitigación en la realidad, algo que se pudo ver en las visitas de campo a caño Buque fue que había muchas obras de mitigación deterioradas (ver anexo D) y este deterioro no precisamente porque hubieran cumplido su vida útil o haya habido un evento extremo, sino porque no se les hace el mantenimiento adecuado, hay que tener en cuenta que estas obras de mitigación al estar en permanente contacto con el agua deben tener

Medidas de mitigación al efecto de socavación que se presenta en el caño Buque, entre el puente ubicado en la vía Bogotá a 1km del túnel Buenavista al puente de la Av. 40 cerca de la Cll. 15, aplicando soluciones de ingeniería

mantenimientos más seguidos que ayuden a que no se dé un deterioro tan acelerado y logren cumplir su vida útil sin tener muchos desperdicios.

Capítulo 6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Cormacarena, Reglamentación Caño Buque, Villavicencio, 2007.
- [2] «Llanera.com un solo llano,» 18 05 2016. [En línea]. Available: <https://llanera.com/?id=21853>.
- [3] M. Correa, «Ideam declara la alerta roja en cuatro regiones por fuertes lluvias,» *El Colombiano*, 17 Noviembre 2014.
- [4] J. Gómez y J. Montoya, *NOTICIAS CARACOL*, 2017.
- [5] Redacción EL TIEMPO, «En Villavicencio un torrencial aguacero dejó 6.000 víctimas en 2 horas,» *EL TIEMPO*, 15 Septiembre 2016.
- [6] Redacción Nacional, «Según Ideam, temporada de lluvias se extendería hasta junio,» *EL ESPECTADOR*, 15 Mayo 2017.
- [7] J. Viúdez, «El clima extremo cuesta 148.000 millones al año y va a más,» *El PAÍS*, 18 Noviembre 2013.
- [8] «hsbnoticias.com,» 4 Mayo 2017. [En línea]. Available: <http://hsbnoticias.com/noticias/politica/sin-medidas-el-rio-ariari-podria-llevarse-la-meta-guavia-301117>.
- [9] «hsbnoticias.com,» 22 Mayo 2017. [En línea]. Available: <http://hsbnoticias.com/noticias/politica/video-el-rio-ariari-dejo-incomunicados-los-departamentos-d-307694>.
- [10] H. Rodríguez, *HIDRÁULICA FLUVIAL Fundamentos y Aplicaciones SOCAVACIÓN*, Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería, 2010.
- [11] J. Almorox Alonso, A. López Bermúdez y S. Rafaelli, *La degradación de los suelos por erosión hídrica. métodos de estimación*, vol. IV, Murcia: EDITUM GAIA, 2008.

- [12] W. S. Merrit, R. A. Letcher y A. J. Jackeman, «A review of erosion and sediment transport models.,» *J. Enviromental Modelling and Software*, nº 18, pp. 761-799, 2003.
- [13] J. Suárez, CONTROL DE EROSIÓN EN ZONAS TROPICALES, Bucaramanga: U industrial de Santander, 2001.
- [14] Universidad del Valle; Asociación de Ingenieros del Valle, XIII seminario nacional de hidráulica e hidrología. tomo I y II., Cali, 1998.
- [15] Y. Álvares, S. Montoya, D. Rendón y J. Caballero, «Análisis y diagnóstico de los fenómenos de inestabilidad que afectan el sector “La Bonita”, Amagá, Antioquia, Colombia,» *Boletín de ciencia de la tierra*, pp. 35-44, Abril 2015.
- [16] J. Arango, «OBRAS DE REDUCCIÓN Y MITIGACIÓN DE RIESGOS EN EL DEPARTAMENTO DE CALDAS,» CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DE CALDAS CORPOCALDAS, Manizales, 2006.
- [17] D. F. Campos Aranda, «Procesos del Ciclo Hidrológico,» Editorial Universitaria Potosina, San Luis Potosí, 1998.
- [18] E. Pulgarín, «Fórmulas regionales para la estimación de curvas intensidad-frecuenciaduración-duración basadas en las propiedades de escala de la lluvia (Región Andina Colombiana),» Medellín, 2009.
- [19] R. Vargas y M. Diaz, «Curvas Sintéticas Regionalizadas de Intensidad-Duración-Frecuencia para Colombia,» *Revista de ingeniería Uniandes*, pp. 1-13, 1998.
- [20] V. T. Chow, D. R. Maidment y L. W. Mays, *Applied Hydrology*, McGraw - Hill, 1987.
- [21] F. López y G. Fernández, Restauración hidrológico forestal de cuencas y control de la erosión : ingeniería medioambiental, Madrid: Tragsa : Tragsatec, 1998.
- [22] M. Da Siilva, M. Naves, N. Curi, A. Oliveira, J. Avanzi y N. Lloyd, Water erosion risk prediction in eucalyptus plantanions, Lavras: Scielo, 2014.

- [23] F. Ramírez, E. Hincapie, Sadeghian, siavosh y U. Pérez, «Erosividad de las lluvias en la zona cafetera central y occidental del departamento de Caldas,» *Cenicafé*, pp. 40-52, 2007.
- [24] R. Wawer, E. Nowocien y B. Podolski, «Real an Calculated Kusle Erodibility Factor for Selected Polish Soils,» *Polish Journal of Environmental Studies*, pp. 655-658, 2005.
- [25] W. Drzewiecki, P. Wezyk, M. Pierzchalski y B. Szafranska, «Quantitative and Qualitative Assessment of Soil Erosion Risk in Malopolska (Poland) Supported by Object-Based Analysis of High-Resolution Satellite Images.,» *Pure Appl. Geophys.*, pp. 867-895, 2014.
- [26] K. Meusburger, N. Konz, M. Schaub y C. Alewell, «Soil erosion modelled with USLE and PESERA using QuickBird derived vegetation parameters in an alpine catchment,» *Science Direct*, pp. 208-215, 2010.
- [27] D. Ceballos y L. Toro, «Evaluación de la susceptibilidad a la erosión por el cambio de cobertura debido a la minería, en el Municipio de Anorí, Antioquia, Colombia,» *Revista Gestión y Ambiente*, pp. 51-64, 2012.
- [28] K. Renard, G. Foster, G. Weesies, D. McCool y D. Yoder, Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning With the Revised Universal Soil Loss Equation, Washington D.C., 1997.
- [29] C. Devatha, V. Deshpande y M. Renukaprasad, «Estimation of Soil loss using USLE model for Kulhan Watershed Chattisgarh- A case study,» *scienceDirect*, pp. 1429-1436, 2015.
- [30] A. Rocha, Introducción a la Hidráulica Fluvial, Lima: EDUNI, 1998.
- [31] S. Rojas Martinez, «Diseño de muros de contención sector la Aguada Comuna de Corral,» Valdivia, 2009.
- [32] R. Cochachin, «Diseño de Muro de Gaviones para la Protección de la Margen Izquierda

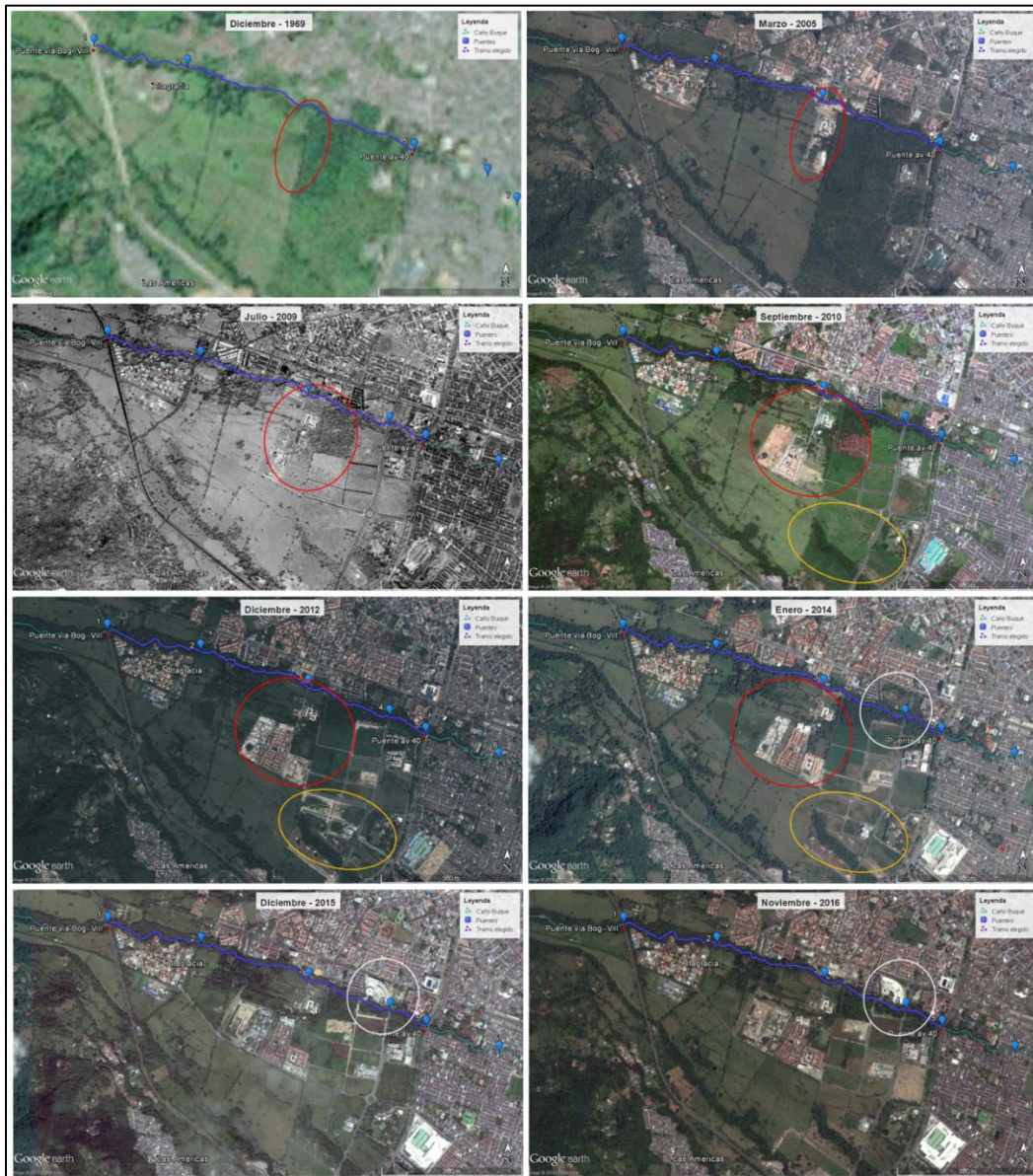
del Río Mosna en el Tramo km: 17+000 al km: 17+330 en el Distrito de Chavín, aplicando HEC RAS, 2013,» Huaraz, 2014.

- [33] R. Quimbay, J. Miranda y L. Robles, «Diseño de la Metodología para Determinar Caudales Característicos Mensuales Multianuales en una Cuenca Rural no Instrumentada a través del Programa HEC-HMS,» Bogotá D.C., 2014.
- [34] Servicio Geológico Colombiano, Zonificación Integral por Amenazas Naturales para la Ciudad de Villavicencio - Meta, vol. II, Bogotá D.C., 2001.
- [35] J. Bowles, Foundation Analysis And Design, McGraw-Hill, 1997.
- [36] C. Crespo, Mecánica de Suelos y Cimentaciones, México: Limusa Noriega Editores, 2004.
- [37] S. Villa, «Modelación de la Erosión Hídrica a Escala de Cuenca en la Zona Alta de la Quebrada la García, Municipio de Bello, Antioquia,» Medellín, 2012.
- [38] L. P. Vega, «Evaluación de la Erosión Hídrica Superficial por Parcelas Experimentales en Suelos Desnudos de la Región de Coquimbo,» Talca, 2008.
- [39] F. Ramírez, E. Hincapié y S. Sadeghian, «Erodabilidad de los Suelos de la Zona Central Cafetera del Departamento de Caldas,» *Cenicafé*, pp. 58-71, 2009.
- [40] B. Das, Fundamentos de Ingeniería de Cimentaciones, CENGAGE Learning, 2012.

Medidas de mitigación al efecto de socavación que se presenta en el caño Buque, entre el puente ubicado en la vía Bogotá a 1km del túnel Buenavista al puente de la Av. 40 cerca de la Cll. 15, aplicando soluciones de ingeniería

ANEXOS

Anexo A Regresión multitemporal, evidenciando crecimiento urbano en zonas aledañas al caño buque, elaborada a partir de imagen © 2018 CNES / AIRBUS



Fuente: Autor

Medidas de mitigación al efecto de socavación que se presenta en el caño Buque, entre el puente ubicado en la vía Bogotá a 1km del túnel Buenavista al puente de la Av. 40 cerca de la Cll. 15, aplicando soluciones de ingeniería

Anexo B Ubicación del tramo seleccionado y del caño buque. Elaborado a partir de IMAGEN

© 2018 CNES / AIRBUS



Fuente: Autor

Medidas de mitigación al efecto de socavación que se presenta en el caño Buque, entre el puente ubicado en la vía Bogotá a 1km del túnel Buenavista al puente de la Av. 40 cerca de la Cll. 15, aplicando soluciones de ingeniería

Anexo C SOCAVACIÓN EN LOS PUENTES PRESENTES EN LA ZONA.

SECCIÓN 5: Puente interno del condominio Altagracia

SECCIÓN 5.1	H0 [m]	α	β	ψ	γ_d [Ton/m ³]	x	Hs [m]	Soc. Gen [m]
0	0	2.5439	0.9846	1.046	1.6554	0.3047	0	0
2.99	0.493	2.5439	0.9846	1.046	1.6554	0.3047	0.7601	0.2671
3.379	0.563	2.5439	0.9846	1.046	1.6554	0.3047	0.9005	0.3375
3.886	0.665	2.5439	0.9846	1.046	1.6554	0.3047	1.114	0.449
9.674	1.404	2.5439	0.9846	1.046	1.6554	0.3047	2.8937	1.4897
11.977	1.665	2.5439	0.9846	1.046	1.6554	0.3047	3.5978	1.9328
12.543	1.678	2.5439	0.9846	1.046	1.6554	0.3047	3.6338	1.9558
13.031	1.665	2.5439	0.9846	1.046	1.6554	0.3047	3.5978	1.9328
15.781	0.806	2.5439	0.9846	1.046	1.6554	0.3047	1.4241	0.6181
16.221	0.666	2.5439	0.9846	1.046	1.6554	0.3047	1.1161	0.4501
16.224	0.665	2.5439	0.9846	1.046	1.6554	0.3047	1.114	0.449
16.23	0.663	2.5439	0.9846	1.046	1.6554	0.3047	1.1097	0.4467
16.231	0.663	2.5439	0.9846	1.046	1.6554	0.3047	1.1097	0.4467
18.829	0	2.5439	0.9846	1.046	1.6554	0.3047	0	0

Medidas de mitigación al efecto de socavación que se presenta en el caño Buque, entre el puente ubicado en la vía Bogotá a 1km del túnel Buenavista al puente de la Av. 40 cerca de la Cll. 15, aplicando soluciones de ingeniería

SOCAVACIÓN EN TERRENO NATURAL								
SECCIÓN 5.2	H0 [m]	α	β	ψ	γ_d [Ton/m3]	x	Hs [m]	Soc. Gen [m]
2.169	0	2.6413	0.9846	1.046	1.6554	0.3047	0	0
2.169	0.358	2.6413	0.9846	1.046	1.6554	0.3047	0.5198	0.1618
2.851	0.47	2.6413	0.9846	1.046	1.6554	0.3047	0.7359	0.2659
3.24	0.54	2.6413	0.9846	1.046	1.6554	0.3047	0.8788	0.3388
3.747	0.642	2.6413	0.9846	1.046	1.6554	0.3047	1.0961	0.4541
9.535	1.381	2.6413	0.9846	1.046	1.6554	0.3047	2.9161	1.5351
11.838	1.642	2.6413	0.9846	1.046	1.6554	0.3047	3.6378	1.9958
12.404	1.655	2.6413	0.9846	1.046	1.6554	0.3047	3.6746	2.0196
12.892	1.642	2.6413	0.9846	1.046	1.6554	0.3047	3.6378	1.9958
15.642	0.783	2.6413	0.9846	1.046	1.6554	0.3047	1.4126	0.6296
16.082	0.643	2.6413	0.9846	1.046	1.6554	0.3047	1.0983	0.4553
16.085	0.642	2.6413	0.9846	1.046	1.6554	0.3047	1.0961	0.4541
16.091	0.64	2.6413	0.9846	1.046	1.6554	0.3047	1.0918	0.4518
16.092	0.64	2.6413	0.9846	1.046	1.6554	0.3047	1.0918	0.4518
18.169	0.11	2.6413	0.9846	1.046	1.6554	0.3047	0.1151	0.0051
18.169	0	2.6413	0.9846	1.046	1.6554	0.3047	0	0

SOCAVACIÓN EN ESTRIBOS							
Área [m2]	Q1 [m3/s]	Pq	P α	Pr	Ho (m)	Ds (m)	Soc. Gen [m]
0.3878	0.92610983	1.614	1	1	0	0	0
					0.3576	0.5771	0.2195
0.0236	0.05927281	1.477	1	1	0.1151	0.17	0.0549
					0	0	0

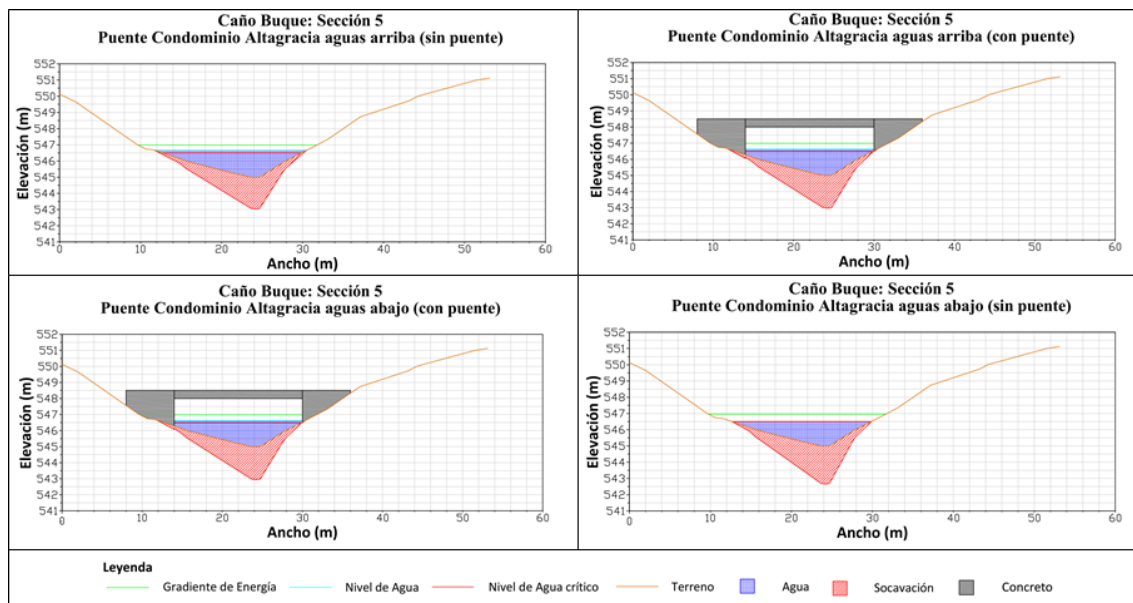
Medidas de mitigación al efecto de socavación que se presenta en el caño Buque, entre el puente ubicado en la vía Bogotá a 1km del túnel Buenavista al puente de la Av. 40 cerca de la Cll. 15, aplicando soluciones de ingeniería

SOCAVACIÓN EN TERRENO NATURAL								
SECCIÓN 5.3	H0 [m]	α	β	ψ	γ_d [Ton/m ³]	x	Hs [m]	Soc. Gen [m]
2.102	0	2.6911	0.9846	1.046	1.6554	0.3047	0	0
2.102	0.347	2.6911	0.9846	1.046	1.6554	0.3047	0.5067	0.1597
2.784	0.459	2.6911	0.9846	1.046	1.6554	0.3047	0.7243	0.2653
3.173	0.529	2.6911	0.9846	1.046	1.6554	0.3047	0.8683	0.3393
3.68	0.631	2.6911	0.9846	1.046	1.6554	0.3047	1.0877	0.4567
9.468	1.37	2.6911	0.9846	1.046	1.6554	0.3047	2.9281	1.5581
11.771	1.631	2.6911	0.9846	1.046	1.6554	0.3047	3.6587	2.0277
12.337	1.644	2.6911	0.9846	1.046	1.6554	0.3047	3.696	2.052
12.825	1.631	2.6911	0.9846	1.046	1.6554	0.3047	3.6587	2.0277
15.575	0.772	2.6911	0.9846	1.046	1.6554	0.3047	1.4073	0.6353
16.015	0.632	2.6911	0.9846	1.046	1.6554	0.3047	1.0899	0.4579
16.018	0.631	2.6911	0.9846	1.046	1.6554	0.3047	1.0877	0.4567
16.024	0.629	2.6911	0.9846	1.046	1.6554	0.3047	1.0833	0.4543
16.025	0.629	2.6911	0.9846	1.046	1.6554	0.3047	1.0833	0.4543
18.102	0.099	2.6911	0.9846	1.046	1.6554	0.3047	0.1021	0.0031
18.102	0	2.6911	0.9846	1.046	1.6554	0.3047	0	0

SOCAVACIÓN EN ESTRIBOS							
Área [m ²]	Q1 [m ³ /s]	Pq	P α	Pr	Ho (m)	Ds (m)	Soc. Gen [m]
0.3642	0.9247	1.614	1	1	0	0	0
					0.3466	0.5593	0.2127
0.0192	0.0487	1.475	1	1	0.0989	0.1459	0.047
					0	0	0

Medidas de mitigación al efecto de socavación que se presenta en el caño Buque, entre el puente ubicado en la vía Bogotá a 1km del túnel Buenavista al puente de la Av. 40 cerca de la Cll. 15, aplicando soluciones de ingeniería

SECCIÓN 5.4	H0 [m]	α	β	ψ	γ_d [Ton/m3]	x	Hs [m]	Soc. Gen [m]
0	0	3.2401	0.9846	1.046	1.6554	0.3047	0	0
2.047	0.337	3.2401	0.9846	1.046	1.6554	0.3047	0.5628	0.2258
2.436	0.407	3.2401	0.9846	1.046	1.6554	0.3047	0.7162	0.3092
2.943	0.509	3.2401	0.9846	1.046	1.6554	0.3047	0.953	0.444
8.731	1.248	3.2401	0.9846	1.046	1.6554	0.3047	2.9967	1.7487
11.034	1.509	3.2401	0.9846	1.046	1.6554	0.3047	3.8194	2.3104
11.6	1.522	3.2401	0.9846	1.046	1.6554	0.3047	3.8615	2.3395
12.088	1.509	3.2401	0.9846	1.046	1.6554	0.3047	3.8194	2.3104
14.838	0.65	3.2401	0.9846	1.046	1.6554	0.3047	1.3024	0.6524
15.278	0.51	3.2401	0.9846	1.046	1.6554	0.3047	0.9554	0.4454
15.281	0.509	3.2401	0.9846	1.046	1.6554	0.3047	0.953	0.444
15.287	0.507	3.2401	0.9846	1.046	1.6554	0.3047	0.9482	0.4412
15.288	0.507	3.2401	0.9846	1.046	1.6554	0.3047	0.9482	0.4412
17.275	0	3.2401	0.9846	1.046	1.6554	0.3047	0	0



Medidas de mitigación al efecto de socavación que se presenta en el caño Buque, entre el puente ubicado en la vía Bogotá a 1km del túnel Buenavista al puente de la Av. 40 cerca de la Cll. 15, aplicando soluciones de ingeniería

SECCIÓN 6: Puente de la carrera 47.

SECCIÓN 6.1	H0 [m]	α	β	ψ	Yd [Ton/m3]	x	Hs [m]	Soc. Gen [m]
0	0	1.3207	0.9846	1.046	1.6554	0.3047	0	0
0.234	0.952	1.3207	0.9846	1.046	1.6554	0.3047	1.0659	0.1139
4.583	1.95	1.3207	0.9846	1.046	1.6554	0.3047	2.6637	0.7137
5.637	1.974	1.3207	0.9846	1.046	1.6554	0.3047	2.7057	0.7317
6.437	1.992	1.3207	0.9846	1.046	1.6554	0.3047	2.7372	0.7452
7.137	2.008	1.3207	0.9846	1.046	1.6554	0.3047	2.7654	0.7574
7.411	2.015	1.3207	0.9846	1.046	1.6554	0.3047	2.7777	0.7627
8.004	2.019	1.3207	0.9846	1.046	1.6554	0.3047	2.7847	0.7657
11.969	1.957	1.3207	0.9846	1.046	1.6554	0.3047	2.676	0.719
12.213	0	1.3207	0.9846	1.046	1.6554	0.3047	0	0

SOCAVACIÓN EN TERRENO NATURAL

SECCIÓN 6.2	H0 [m]	α	β	ψ	Yd [Ton/m3]	x	Hs [m]	Soc. Gen [m]
3.337	0	2.7084	0.9846	1.046	1.6554	0.3047	0	0
3.337	1.278	2.7084	0.9846	1.046	1.6554	0.3047	2.6924	1.4144
4.483	1.541	2.7084	0.9846	1.046	1.6554	0.3047	3.4195	1.8785
5.537	1.565	2.7084	0.9846	1.046	1.6554	0.3047	3.4877	1.9227
6.337	1.583	2.7084	0.9846	1.046	1.6554	0.3047	3.539	1.956
7.311	1.606	2.7084	0.9846	1.046	1.6554	0.3047	3.6048	1.9988
7.904	1.61	2.7084	0.9846	1.046	1.6554	0.3047	3.6163	2.0063
11.337	1.556	2.7084	0.9846	1.046	1.6554	0.3047	3.4621	1.9061
11.337	0	2.7084	0.9846	1.046	1.6554	0.3047	0	0

SOCAVACIÓN EN ESTRIBOS

Área [m2]	Q1 [m3/s]	Pq	P α	Pr	Ho (m)	Ds (m)	Soc. Gen [m]
2.9526	9.6976	2.795	1	1	0	0	0
					0.543	1.51763	0.9746
					1.278	3.57187	2.2939
0.9741	3.1994	1.955	1	1	1.556	3.04265	1.4867
					1.548	3.02701	1.479
					0	0	0

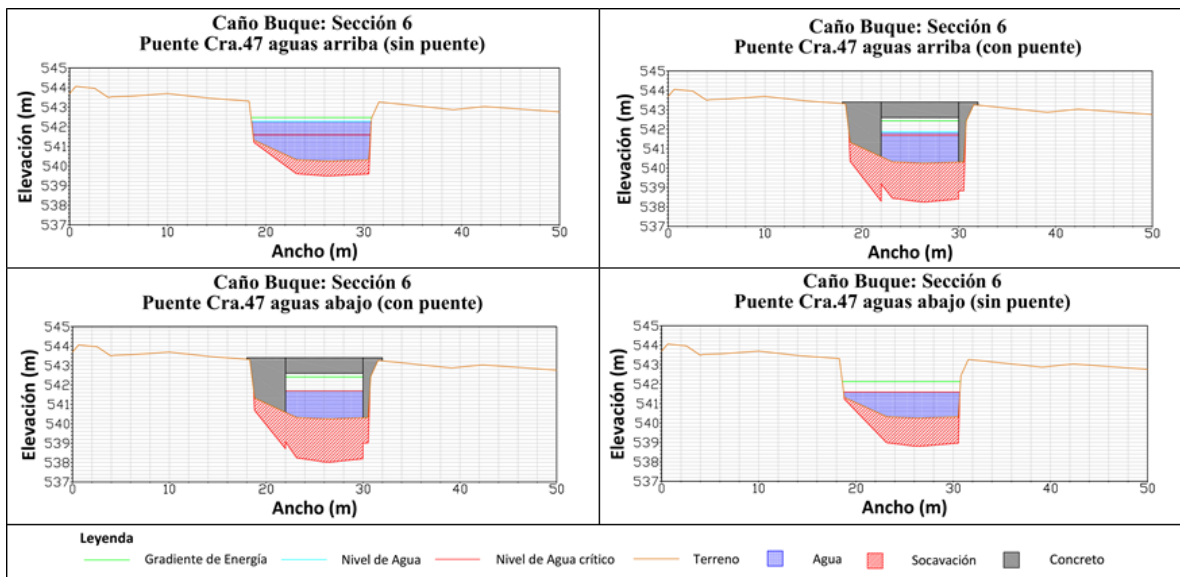
Medidas de mitigación al efecto de socavación que se presenta en el caño Buque, entre el puente ubicado en la vía Bogotá a 1km del túnel Buenavista al puente de la Av. 40 cerca de la Cll. 15, aplicando soluciones de ingeniería

SOCAVACIÓN EN TERRENO NATURAL								
SECCIÓN 6.3	H0 [m]	α	β	ψ	γ_d [Ton/m3]	x	Hs [m]	Soc. Gen [m]
3.295	0	3.3316	0.9846	1.046	1.6554	0.3047	0	0
3.295	1.108	3.3316	0.9846	1.046	1.6554	0.3047	2.6297	1.5217
4.441	1.371	3.3316	0.9846	1.046	1.6554	0.3047	3.4519	2.0809
5.495	1.395	3.3316	0.9846	1.046	1.6554	0.3047	3.5293	2.1343
6.295	1.413	3.3316	0.9846	1.046	1.6554	0.3047	3.5875	2.1745
7.269	1.436	3.3316	0.9846	1.046	1.6554	0.3047	3.6623	2.2263
7.862	1.44	3.3316	0.9846	1.046	1.6554	0.3047	3.6753	2.2353
11.295	1.386	3.3316	0.9846	1.046	1.6554	0.3047	3.5002	2.1142
11.295	0	3.3316	0.9846	1.046	1.6554	0.3047	0	0

SOCAVACIÓN EN ESTRIBOS							
Área [m2]	Q1 [m3/s]	Pq	P α	Pr	Ho (m)	Ds (m)	Soc. Gen [m]
2.389	8.8085	2.692	1	1	0	0	0
					0.373	1.00413	0.6311
					1.108	2.98277	1.8748
0.8529	3.1447	1.948	1	1	1.3859	2.69906	1.3132
					1.378	2.68367	1.3057
					0	0	0

Medidas de mitigación al efecto de socavación que se presenta en el caño Buque, entre el puente ubicado en la vía Bogotá a 1km del túnel Buenavista al puente de la Av. 40 cerca de la Cll. 15, aplicando soluciones de ingeniería

SECCIÓN 6.4	H0 [m]	α	β	ψ	γ_d [Ton/m3]	x	Hs [m]	Soc. Gen [m]
0	0	2.6431	0.9846	1.046	1.6554	0.3047	0	0
0.065	0.265	2.6431	0.9846	1.046	1.6554	0.3047	0.3541	0.0891
4.414	1.263	2.6431	0.9846	1.046	1.6554	0.3047	2.603	1.34
5.468	1.287	2.6431	0.9846	1.046	1.6554	0.3047	2.6663	1.3793
6.268	1.305	2.6431	0.9846	1.046	1.6554	0.3047	2.7141	1.4091
6.968	1.321	2.6431	0.9846	1.046	1.6554	0.3047	2.7566	1.4356
7.242	1.328	2.6431	0.9846	1.046	1.6554	0.3047	2.7753	1.4473
7.835	1.332	2.6431	0.9846	1.046	1.6554	0.3047	2.786	1.454
11.8	1.27	2.6431	0.9846	1.046	1.6554	0.3047	2.6214	1.3514
11.959	0	2.6431	0.9846	1.046	1.6554	0.3047	0	0



Medidas de mitigación al efecto de socavación que se presenta en el caño Buque, entre el puente ubicado en la vía Bogotá a 1km del túnel Buenavista al puente de la Av. 40 cerca de la Cll. 15, aplicando soluciones de ingeniería

SECCIÓN 7: Puente ubicado en la carrera 44.

SECCIÓN 7.1	H0 [m]	α	β	ψ	γ_d [Ton/m3]	x	Hs [m]	Soc. Gen [m]
0	0	1.8559	0.9846	1.046	1.6554	0.3047	0	0
0.901	1.518	1.8559	0.9846	1.046	1.6554	0.3047	2.5107	0.9927
3.377	1.525	1.8559	0.9846	1.046	1.6554	0.3047	2.5255	1.0005
4.548	1.529	1.8559	0.9846	1.046	1.6554	0.3047	2.534	1.005
4.803	1.529	1.8559	0.9846	1.046	1.6554	0.3047	2.534	1.005
5.043	1.528	1.8559	0.9846	1.046	1.6554	0.3047	2.5319	1.0039
6.949	1.525	1.8559	0.9846	1.046	1.6554	0.3047	2.5255	1.0005
7.15	1.525	1.8559	0.9846	1.046	1.6554	0.3047	2.5255	1.0005
8.101	1.53	1.8559	0.9846	1.046	1.6554	0.3047	2.5361	1.0061
8.986	1.531	1.8559	0.9846	1.046	1.6554	0.3047	2.5382	1.0072
9.921	1.532	1.8559	0.9846	1.046	1.6554	0.3047	2.5403	1.0083
11.59	1.529	1.8559	0.9846	1.046	1.6554	0.3047	2.534	1.005
11.798	0	1.8559	0.9846	1.046	1.6554	0.3047	0	0

SOCAVACIÓN EN TERRENO NATURAL								
sección 7.2	H0 [m]	α	β	ψ	γ_d [Ton/m3]	x	Hs [m]	Soc. Gen [m]
0.723	0	2.9322	0.9846	1.046	1.6554	0.3047	0	0
0.723	1.217	2.9322	0.9846	1.046	1.6554	0.3047	2.6881	1.4711
0.775	1.305	2.9322	0.9846	1.046	1.6554	0.3047	2.9388	1.6338
3.251	1.312	2.9322	0.9846	1.046	1.6554	0.3047	2.959	1.647
4.422	1.316	2.9322	0.9846	1.046	1.6554	0.3047	2.9705	1.6545
4.677	1.316	2.9322	0.9846	1.046	1.6554	0.3047	2.9705	1.6545
4.917	1.315	2.9322	0.9846	1.046	1.6554	0.3047	2.9676	1.6526
6.823	1.312	2.9322	0.9846	1.046	1.6554	0.3047	2.959	1.647
7.024	1.312	2.9322	0.9846	1.046	1.6554	0.3047	2.959	1.647
7.975	1.317	2.9322	0.9846	1.046	1.6554	0.3047	2.9734	1.6564
8.86	1.318	2.9322	0.9846	1.046	1.6554	0.3047	2.9763	1.6583
9.795	1.319	2.9322	0.9846	1.046	1.6554	0.3047	2.9791	1.6601
10.723	1.317	2.9322	0.9846	1.046	1.6554	0.3047	2.9734	1.6564
10.723	0	2.9322	0.9846	1.046	1.6554	0.3047	0	0

Medidas de mitigación al efecto de socavación que se presenta en el caño Buque, entre el puente ubicado en la vía Bogotá a 1km del túnel Buenavista al puente de la Av. 40 cerca de la Cll. 15, aplicando soluciones de ingeniería

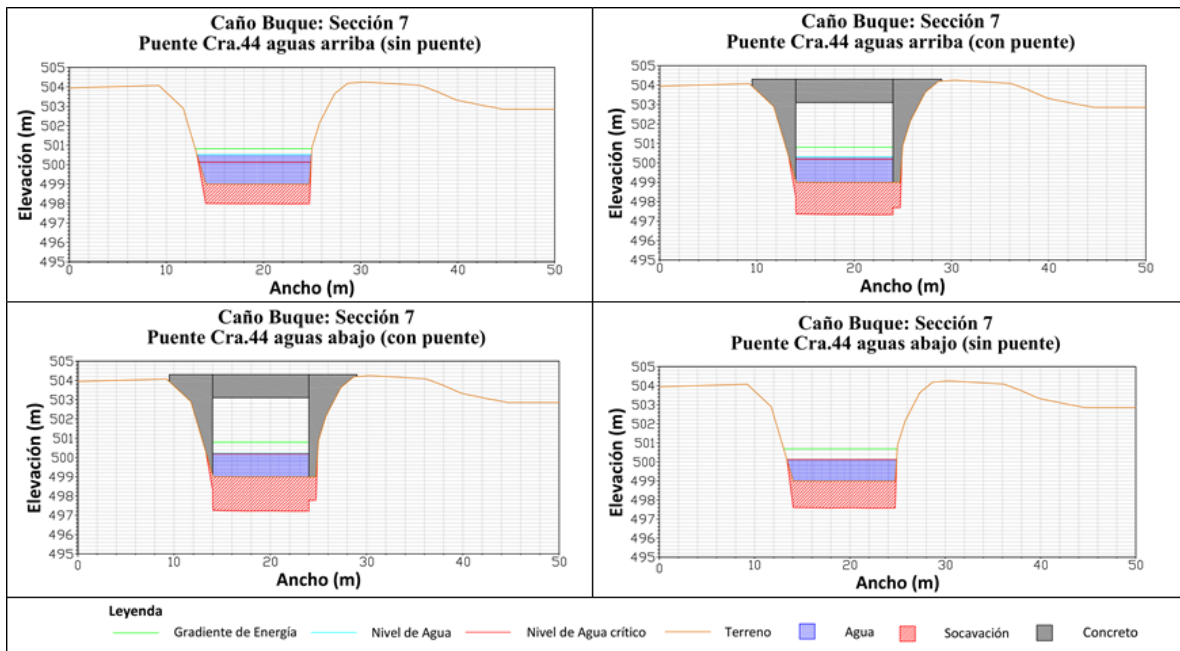
SOCAVACIÓN EN ESTRIBOS							
Área [m2]	Q1 [m3/s]	Pq	Pα	Pr	Ho (m)	Ds (m)	Soc. Gen [m]
0.4396	1.3689	1.682	1	1	0	0	0
					1.217	2.0473	0.8303
1.0925	3.4019	1.985	1	1	1.319	2.6178	1.2988
					1.316	2.6118	1.2958
					0	0	0

SOCAVACIÓN EN TERRENO NATURAL								
SECCIÓN 7.3	H0 [m]	α	β	ψ	Yd [Ton/m3]	x	Hs [m]	Soc. Gen [m]
0.671	0	3.3201	0.9846	1.046	1.6554	0.3047	0	0
0.671	1.13	3.3201	0.9846	1.046	1.6554	0.3047	2.6894	1.5594
0.723	1.218	3.3201	0.9846	1.046	1.6554	0.3047	2.9597	1.7417
3.199	1.225	3.3201	0.9846	1.046	1.6554	0.3047	2.9815	1.7565
4.37	1.229	3.3201	0.9846	1.046	1.6554	0.3047	2.9939	1.7649
4.625	1.229	3.3201	0.9846	1.046	1.6554	0.3047	2.9939	1.7649
4.865	1.228	3.3201	0.9846	1.046	1.6554	0.3047	2.9908	1.7628
6.771	1.225	3.3201	0.9846	1.046	1.6554	0.3047	2.9815	1.7565
6.972	1.225	3.3201	0.9846	1.046	1.6554	0.3047	2.9815	1.7565
7.923	1.23	3.3201	0.9846	1.046	1.6554	0.3047	2.997	1.767
8.808	1.231	3.3201	0.9846	1.046	1.6554	0.3047	3.0002	1.7692
9.743	1.232	3.3201	0.9846	1.046	1.6554	0.3047	3.0033	1.7713
10.671	1.23	3.3201	0.9846	1.046	1.6554	0.3047	2.997	1.767
10.671	0	3.3201	0.9846	1.046	1.6554	0.3047	0	0

SOCAVACIÓN EN ESTRIBOS							
Área [m2]	Q1 [m3/s]	Pq	Pα	Pr	Ho (m)	Ds (m)	Soc. Gen [m]
0.379	1.2639	1.666	1	1	0	0	0
					1.13	1.8827	0.7527
1.013	3.3781	1.981	1	1	1.232	2.4409	1.2089
					1.229	2.4349	1.2059
					0	0	0

Medidas de mitigación al efecto de socavación que se presenta en el caño Buque, entre el puente ubicado en la vía Bogotá a 1km del túnel Buenavista al puente de la Av. 40 cerca de la Cll. 15, aplicando soluciones de ingeniería

SECCIÓN 7.4	H0 [m]	α	β	ψ	γ_d [Ton/m3]	x	Hs [m]	Soc. Gen [m]
0	0	3.0763	0.9846	1.046	1.6554	0.3047	0	0
0.666	1.122	3.0763	0.9846	1.046	1.6554	0.3047	2.5138	1.3918
3.142	1.129	3.0763	0.9846	1.046	1.6554	0.3047	2.5338	1.4048
4.313	1.133	3.0763	0.9846	1.046	1.6554	0.3047	2.5453	1.4123
4.568	1.133	3.0763	0.9846	1.046	1.6554	0.3047	2.5453	1.4123
4.808	1.132	3.0763	0.9846	1.046	1.6554	0.3047	2.5424	1.4104
6.714	1.129	3.0763	0.9846	1.046	1.6554	0.3047	2.5338	1.4048
6.915	1.129	3.0763	0.9846	1.046	1.6554	0.3047	2.5338	1.4048
7.866	1.134	3.0763	0.9846	1.046	1.6554	0.3047	2.5482	1.4142
8.751	1.135	3.0763	0.9846	1.046	1.6554	0.3047	2.551	1.416
9.686	1.136	3.0763	0.9846	1.046	1.6554	0.3047	2.5539	1.4179
11.355	1.133	3.0763	0.9846	1.046	1.6554	0.3047	2.5453	1.4123
11.509	0	3.0763	0.9846	1.046	1.6554	0.3047	0	0



Medidas de mitigación al efecto de socavación que se presenta en el caño Buque, entre el puente ubicado en la vía Bogotá a 1km del túnel Buenavista al puente de la Av. 40 cerca de la Cll. 15, aplicando soluciones de ingeniería

SECCIÓN 8: Puente interno de Primavera urbana, para parqueadero.

SECCIÓN 8.1	H0 [m]	α	β	ψ	Yd [Ton/m3]	x	Hs [m]	Soc. Gen [m]
6.3734	0	0.4625	0.9846	1.046	1.6571	0.3045	0	0
11.0314	0.201	0.4625	0.9846	1.046	1.6571	0.3045	0.0653	-0.1357
11.2314	1.201	0.4625	0.9846	1.046	1.6571	0.3045	0.6411	-0.5599
11.5314	1.817	0.4625	0.9846	1.046	1.6571	0.3045	1.088	-0.729
12.0314	2.028	0.4625	0.9846	1.046	1.6571	0.3045	1.252	-0.776
12.4954	3.401	0.4625	0.9846	1.046	1.6571	0.3045	2.4237	-0.9773
14.4164	3.403	0.4625	0.9846	1.046	1.6571	0.3045	2.4255	-0.9775
15.3744	3.404	0.4625	0.9846	1.046	1.6571	0.3045	2.4264	-0.9776
15.6764	3.404	0.4625	0.9846	1.046	1.6571	0.3045	2.4264	-0.9776
27.5214	3.401	0.4625	0.9846	1.046	1.6571	0.3045	2.4237	-0.9773
29.0314	1.701	0.4625	0.9846	1.046	1.6571	0.3045	1.0001	-0.7009
30.0314	0.701	0.4625	0.9846	1.046	1.6571	0.3045	0.3222	-0.3788
31.0314	0.401	0.4625	0.9846	1.046	1.6571	0.3045	0.1579	-0.2431
45.4144	0.201	0.4625	0.9846	1.046	1.6571	0.3045	0.0653	-0.1357
46.4665	0	0.4625	0.9846	1.046	1.6571	0.3045	0	0

SOCAVACIÓN EN TERRENO NATURAL								
SECCIÓN 8.2	H0 [m]	α	β	ψ	Yd [Ton/m3]	x	Hs [m]	Soc. Gen [m]
66.8224	0	0.8042	0.9846	1.046	1.6571	0.3045	0	0
71.0314	0.182	0.8042	0.9846	1.046	1.6571	0.3045	0.0879	-0.0941
71.2314	1.182	0.8042	0.9846	1.046	1.6571	0.3045	0.9599	-0.2221
71.5314	1.798	0.8042	0.9846	1.046	1.6571	0.3045	1.6405	-0.1575
72.0314	2.009	0.8042	0.9846	1.046	1.6571	0.3045	1.8904	-0.1186
72.4954	3.382	0.8042	0.9846	1.046	1.6571	0.3045	3.6774	0.2954
74.4164	3.384	0.8042	0.9846	1.046	1.6571	0.3045	3.6802	0.2962
75.3744	3.385	0.8042	0.9846	1.046	1.6571	0.3045	3.6816	0.2966
75.6764	3.385	0.8042	0.9846	1.046	1.6571	0.3045	3.6816	0.2966
87.5214	3.382	0.8042	0.9846	1.046	1.6571	0.3045	3.6774	0.2954
89.0314	1.682	0.8042	0.9846	1.046	1.6571	0.3045	1.5065	-0.1755
90.0314	0.682	0.8042	0.9846	1.046	1.6571	0.3045	0.4754	-0.2066
91.0314	0.382	0.8042	0.9846	1.046	1.6571	0.3045	0.2267	-0.1553
105.4144	0.182	0.8042	0.9846	1.046	1.6571	0.3045	0.0879	-0.0941
106.3664	0	0.8042	0.9846	1.046	1.6571	0.3045	0	0

Medidas de mitigación al efecto de socavación que se presenta en el caño Buque, entre el puente ubicado en la vía Bogotá a 1km del túnel Buenavista al puente de la Av. 40 cerca de la Cll. 15, aplicando soluciones de ingeniería

SOCAVACIÓN EN ESTRIBOS							
Área [m2]	Q1 [m3/s]	Pq	Pα	Pr	Ho (m)	Ds (m)	Soc. Gen [m]
4.225	3.7575	2.036	1	1	0	0	0
					0.182	0.3705	0.1885
					1.182	2.406	1.224
					1.798	3.6598	1.8618
					2.009	4.0893	2.0803
					3.382	6.8841	3.5021
					3.383	6.8861	3.5031
4.225	3.7575	2.036	1	1	3.382	6.8841	3.5021
					3.382	6.8841	3.5021
					1.682	3.4237	1.7417
					0.682	1.3882	0.7062
					0.382	0.7776	0.3956
					0	0	0

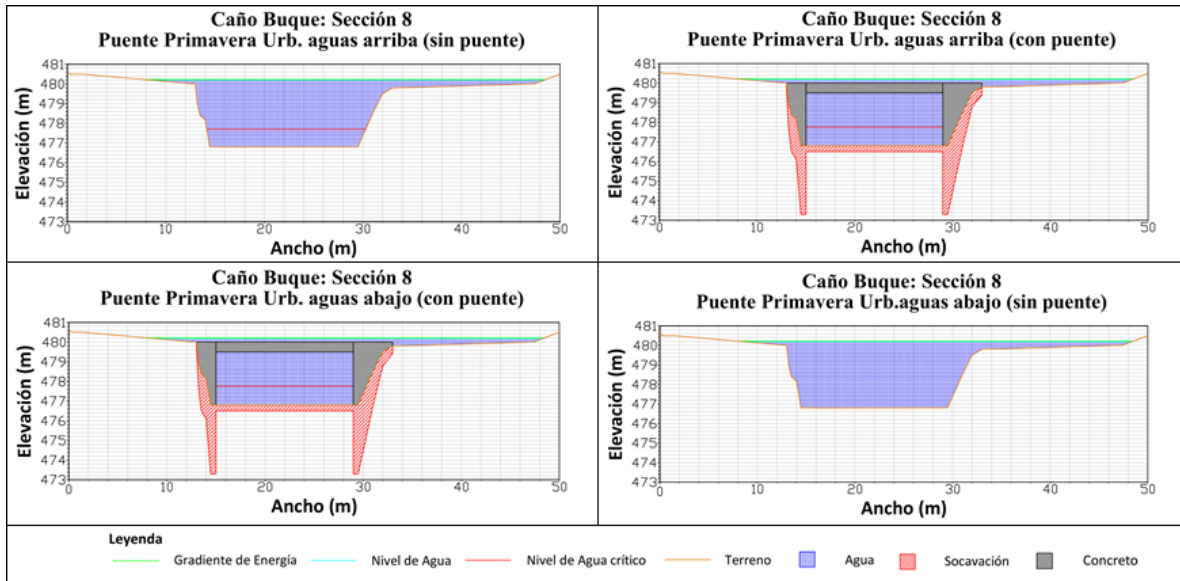
SOCAVACIÓN EN TERRENO NATURAL								
SECCIÓN 8.3	H0 [m]	α	β	ψ	Yd [Ton/m3]	x	Hs [m]	Soc. Gen [m]
126.8687	0	0.8057	0.9846	1.046	1.6571	0.3045	0	0
131.0314	0.18	0.8057	0.9846	1.046	1.6571	0.3045	0.0868	-0.0932
131.2314	1.18	0.8057	0.9846	1.046	1.6571	0.3045	0.9593	-0.2207
131.5314	1.796	0.8057	0.9846	1.046	1.6571	0.3045	1.6406	-0.1554
132.0314	2.007	0.8057	0.9846	1.046	1.6571	0.3045	1.8908	-0.1162
132.4954	3.38	0.8057	0.9846	1.046	1.6571	0.3045	3.6801	0.3001
134.4164	3.382	0.8057	0.9846	1.046	1.6571	0.3045	3.6829	0.3009
135.3744	3.383	0.8057	0.9846	1.046	1.6571	0.3045	3.6843	0.3013
135.6764	3.383	0.8057	0.9846	1.046	1.6571	0.3045	3.6843	0.3013
147.5214	3.38	0.8057	0.9846	1.046	1.6571	0.3045	3.6801	0.3001
149.0314	1.68	0.8057	0.9846	1.046	1.6571	0.3045	1.5065	-0.1735
150.0314	0.68	0.8057	0.9846	1.046	1.6571	0.3045	0.4744	-0.2056
151.0314	0.38	0.8057	0.9846	1.046	1.6571	0.3045	0.2255	-0.1545
165.4144	0.18	0.8057	0.9846	1.046	1.6571	0.3045	0.0868	-0.0932
166.356	0	0.8057	0.9846	1.046	1.6571	0.3045	0	0

Medidas de mitigación al efecto de socavación que se presenta en el caño Buque, entre el puente ubicado en la vía Bogotá a 1km del túnel Buenavista al puente de la Av. 40 cerca de la Cll. 15, aplicando soluciones de ingeniería

SOCAVACIÓN EN ESTRIBOS							
Área [m2]	Q1 [m3/s]	Pq	P α	Pr	Ho (m)	Ds (m)	Soc. Gen [m]
4.225	3.764	2.036	1	1	0	0	0
					0.182	0.3706	0.1886
					1.182	2.4071	1.2251
					1.798	3.6615	1.8635
					2.009	4.0912	2.0822
					3.382	6.8872	3.5052
					3.383	6.8892	3.5062
4.225	3.764	2.036	1	1	3.382	6.8872	3.5052
					3.382	6.8872	3.5052
					1.682	3.4253	1.7433
					0.682	1.3888	0.7068
					0.382	0.7779	0.3959
					0	0	0

SECCIÓN 8.4	H0 [m]	α	β	ψ	Yd [Ton/m3]	x	Hs [m]	Soc. Gen [m]
186.6244	0	0.4649	0.9846	1.046	1.6571	0.3045	0	0
191.0314	0.191	0.4649	0.9846	1.046	1.6571	0.3045	0.0614	-0.1296
191.2314	1.191	0.4649	0.9846	1.046	1.6571	0.3045	0.6368	-0.5542
191.5314	1.807	0.4649	0.9846	1.046	1.6571	0.3045	1.0848	-0.7222
192.0314	2.018	0.4649	0.9846	1.046	1.6571	0.3045	1.2492	-0.7688
192.4954	3.391	0.4649	0.9846	1.046	1.6571	0.3045	2.4244	-0.9666
194.4164	3.393	0.4649	0.9846	1.046	1.6571	0.3045	2.4262	-0.9668
195.3744	3.394	0.4649	0.9846	1.046	1.6571	0.3045	2.4271	-0.9669
195.6764	3.394	0.4649	0.9846	1.046	1.6571	0.3045	2.4271	-0.9669
207.5214	3.391	0.4649	0.9846	1.046	1.6571	0.3045	2.4244	-0.9666
209.0314	1.691	0.4649	0.9846	1.046	1.6571	0.3045	0.9966	-0.6944
210.0314	0.691	0.4649	0.9846	1.046	1.6571	0.3045	0.3177	-0.3733
211.0314	0.391	0.4649	0.9846	1.046	1.6571	0.3045	0.1535	-0.2375
225.4144	0.191	0.4649	0.9846	1.046	1.6571	0.3045	0.0614	-0.1296
226.4141	0	0.4649	0.9846	1.046	1.6571	0.3045	0	0

Medidas de mitigación al efecto de socavación que se presenta en el caño Buque, entre el puente ubicado en la vía Bogotá a 1km del túnel Buenavista al puente de la Av. 40 cerca de la Cll. 15, aplicando soluciones de ingeniería



SECCIÓN 9: Puente de la carrera 40.

SECCIÓN 9.1	H0 [m]	α	β	ψ	γ_d [Ton/m3]	x	Hs [m]	Soc. Gen [m]
0	0	0.812	0.9846	1.046	1.6571	0.3045	0	0
0.987	1.945	0.812	0.9846	1.046	1.6571	0.3045	1.8272	-0.1178
4.222	1.995	0.812	0.9846	1.046	1.6571	0.3045	1.8874	-0.1076
4.481	2.045	0.812	0.9846	1.046	1.6571	0.3045	1.9481	-0.0969
8.586	2.345	0.812	0.9846	1.046	1.6571	0.3045	2.3204	-0.0246
11.272	2.345	0.812	0.9846	1.046	1.6571	0.3045	2.3204	-0.0246
12.314	2.145	0.812	0.9846	1.046	1.6571	0.3045	2.0706	-0.0744
14.802	2.045	0.812	0.9846	1.046	1.6571	0.3045	1.9481	-0.0969
15.532	0	0.812	0.9846	1.046	1.6571	0.3045	0	0

Medidas de mitigación al efecto de socavación que se presenta en el caño Buque, entre el puente ubicado en la vía Bogotá a 1km del túnel Buenavista al puente de la Av. 40 cerca de la Cll. 15, aplicando soluciones de ingeniería

SOCAVACIÓN EN TERRENO NATURAL								
SECCIÓN 9.2	H0 [m]	α	β	ψ	γ_d [Ton/m3]	x	Hs [m]	Soc. Gen [m]
1.262	0	0.9205	0.9846	1.046	1.6554	0.3045	0	0
1.262	1.928	0.9205	0.9846	1.046	1.6554	0.3045	1.9911	0.0631
4.212	1.974	0.9205	0.9846	1.046	1.6554	0.3045	2.052	0.078
4.471	2.024	0.9205	0.9846	1.046	1.6554	0.3045	2.1186	0.0946
8.576	2.324	0.9205	0.9846	1.046	1.6554	0.3045	2.5278	0.2038
11.262	2.324	0.9205	0.9846	1.046	1.6554	0.3045	2.5278	0.2038
12.304	2.124	0.9205	0.9846	1.046	1.6554	0.3045	2.2533	0.1293
14.262	2.045	0.9205	0.9846	1.046	1.6554	0.3045	2.1468	0.1018
14.262	0	0.9205	0.9846	1.046	1.6554	0.3045	0	0

SOCAVACIÓN EN ESTRIBOS							
Área [m2]	Q1 [m3/s]	Pq	$P\alpha$	Pr	Ho (m)	Ds (m)	Soc. Gen [m]
1.4883	2.1865	1.806	1	1	0	0	0
					1.924	3.4753	1.5513
					1.928	3.4825	1.5545
1.8084	2.6568	1.876	1	1	2.045	3.8367	1.7917
					2.024	3.7973	1.7733
					0	0	0

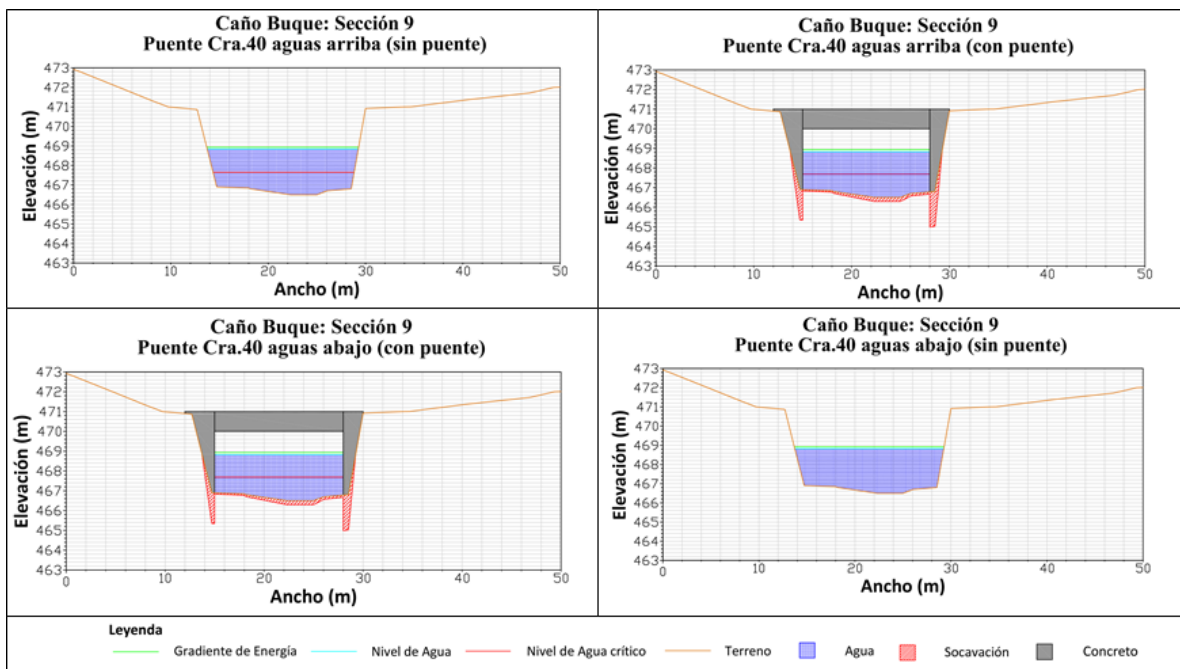
Medidas de mitigación al efecto de socavación que se presenta en el caño Buque, entre el puente ubicado en la vía Bogotá a 1km del túnel Buenavista al puente de la Av. 40 cerca de la Cll. 15, aplicando soluciones de ingeniería

SOCAVACIÓN EN TERRENO NATURAL								
SECCIÓN 9.3	H0 [m]	α	β	ψ	γ_d [Ton/m3]	x	Hs [m]	Soc. Gen [m]
1.26	0	0.922	0.9846	1.046	1.6571	0.3045	0	0
1.26	1.926	0.922	0.9846	1.046	1.6571	0.3045	1.9891	0.0631
4.21	1.972	0.922	0.9846	1.046	1.6571	0.3045	2.05	0.078
4.469	2.022	0.922	0.9846	1.046	1.6571	0.3045	2.1166	0.0946
8.574	2.322	0.922	0.9846	1.046	1.6571	0.3045	2.5258	0.2038
11.26	2.322	0.922	0.9846	1.046	1.6571	0.3045	2.5258	0.2038
12.302	2.122	0.922	0.9846	1.046	1.6571	0.3045	2.2512	0.1292
14.26	2.043	0.922	0.9846	1.046	1.6571	0.3045	2.1447	0.1017
14.26	0	0.922	0.9846	1.046	1.6571	0.3045	0	0

SOCAVACIÓN EN ESTRIBOS							
Área [m2]	Q1 [m3/s]	Pq	$P\alpha$	Pr	Ho (m)	Ds (m)	Soc. Gen [m]
1.4853	2.1841	1.806	1	1	0	0	0
					1.922	3.471	1.549
					1.926	3.4782	1.5522
1.8059	2.6556	1.876	1	1	2.043	3.8326	1.7896
					2.022	3.7932	1.7712
					0	0	0

Medidas de mitigación al efecto de socavación que se presenta en el caño Buque, entre el puente ubicado en la vía Bogotá a 1km del túnel Buenavista al puente de la Av. 40 cerca de la Cll. 15, aplicando soluciones de ingeniería

SECCIÓN 9.4	H0 [m]	α	β	ψ	γ_d [Ton/m3]	x	Hs [m]	Soc. Gen [m]
0	0	0.8203	0.9846	1.046	1.6571	0.3045	0	0
0.981	1.932	0.8203	0.9846	1.046	1.6571	0.3045	1.8259	-0.1061
4.216	1.982	0.8203	0.9846	1.046	1.6571	0.3045	1.8865	-0.0955
4.475	2.032	0.8203	0.9846	1.046	1.6571	0.3045	1.9475	-0.0845
8.58	2.332	0.8203	0.9846	1.046	1.6571	0.3045	2.3221	-0.0099
11.266	2.332	0.8203	0.9846	1.046	1.6571	0.3045	2.3221	-0.0099
12.308	2.132	0.8203	0.9846	1.046	1.6571	0.3045	2.0708	-0.0612
14.796	2.032	0.8203	0.9846	1.046	1.6571	0.3045	1.9475	-0.0845
15.522	0	0.8203	0.9846	1.046	1.6571	0.3045	0	0



Medidas de mitigación al efecto de socavación que se presenta en el caño Buque, entre el puente ubicado en la vía Bogotá a 1km del túnel Buenavista al puente de la Av. 40 cerca de la Cll. 15, aplicando soluciones de ingeniería

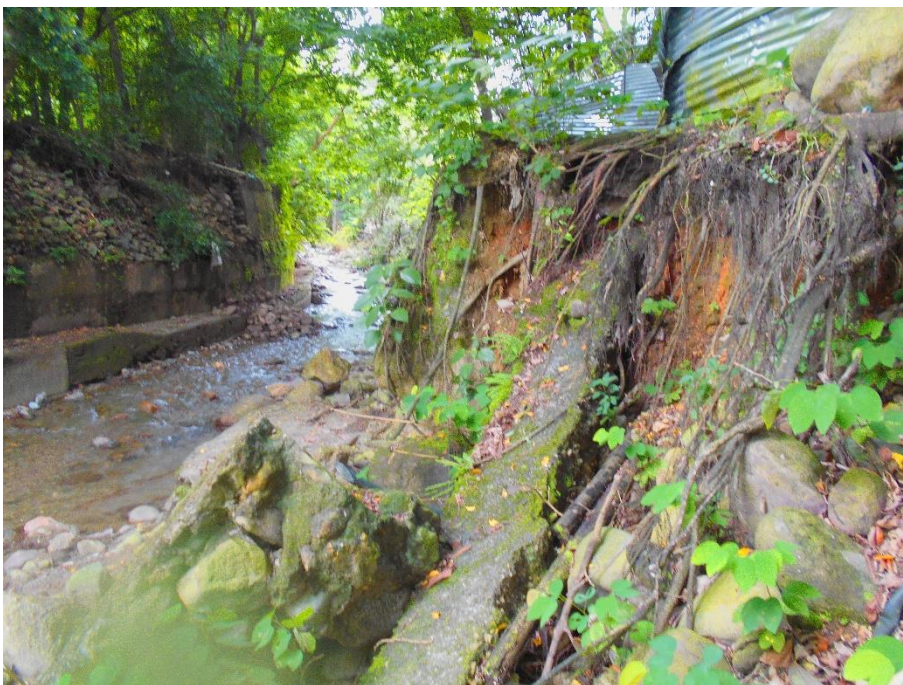
Anexo D Daños ocasionados en obras presentes en el cauce.



Medidas de mitigación al efecto de socavación que se presenta en el caño Buque, entre el puente ubicado en la vía Bogotá a 1km del túnel Buenavista al puente de la Av. 40 cerca de la Cll. 15, aplicando soluciones de ingeniería



Medidas de mitigación al efecto de socavación que se presenta en el caño Buque, entre el puente ubicado en la vía Bogotá a 1km del túnel Buenavista al puente de la Av. 40 cerca de la Cll. 15, aplicando soluciones de ingeniería



Medidas de mitigación al efecto de socavación que se presenta en el caño Buque, entre el puente ubicado en la vía Bogotá a 1km del túnel Buenavista al puente de la Av. 40 cerca de la Cll. 15, aplicando soluciones de ingeniería

Los siguientes anexos se encuentran en medio digital.

Anexo E Mapa de factor de erosividad.

Anexo F Mapa de factor de erodabilidad.

Anexo G Mapa de factores topográficos.

Anexo H Mapa de factor de cobertura de suelo.

Anexo I Mapa de factor de prácticas de conservación.

Anexo J Mapa de erosión real cuenca caño Buque.

Anexo K Mapa de erosión potencial cuenca caño Buque