

**Estudios Básicos de Amenaza por Inundación, Movimiento en Masa y Avenida Torrencial para el municipio de Palmira y Estudios Detallados de Riesgo por Inundación y Socavación Lateral en el Barrio Azul, Corregimiento de Amaime**



**ESTUDIO 11: ZONIFICACIÓN DE LA AMENAZA POR SOCAVACIÓN LATERAL EN BARRIO AZUL CORREGIMIENTO DE AMAIME, ESCALA 1:2.000**



**Alcaldía de Palmira**



**Universidad  
del Valle**

**Convenio Interadministrativo MP968 de 2021**

**UNIVERSIDAD DEL VALLE; OBSERVATORIO SISMOLÓGICO Y GEOFÍSICO DEL SUROCCIDENTE COLOMBIANO-OSSO**

**ALCALDÍA DE PALMIRA; DIRECCIÓN DE GESTIÓN DEL RIESGO DE DESASTRES-DGRD**



## ALCALDÍA MUNICIPAL DE PALMIRA

**ÓSCAR EDUARDO ESCOBAR GARCÍA**

Alcalde

**FERNANDO JAVIER LEAL LONDOÑO, Ing.**  
**Ambiental**  
Director DGRD

**CAMILO A. SAAVEDRA ESCOBAR, Adm.**  
**Ambiental**  
Director 2021 – 2022 DGRD

**ADRIANA TERREROS, Ing. Agrónoma**  
Profesional de Planta DGRD

**OMAR A. CHAVES MONCAYO, Ing. Civil**  
Contratista DGRD

**DIANA AREVALO, Ing. Civil**  
Contratista Oficina de Planeación

## OBSERVATORIO SISMOLÓGICO Y GEOFÍSICO DEL SUROCCIDENTE COLOMBIANO-OSSO UNIVERSIDAD DEL VALLE

**ELKIN DE JESUS SALCEDO HURTADO, Ph.D.**

Director de Proyecto Estudios de Amenaza de Palmira - Director OSSO

**DIANA M. RIVERA JIMENEZ**  
Coordinadora Administrativa

**JHONATTAN FERNANDEZ C., MSc.**  
Coordinador Técnico

### **EQUIPOS TEMÁTICOS** **HISTORICIDAD**

**KAREN A. SÁNCHEZ E., Geógrafa**  
Líder Equipo

### **GEOLOGÍA Y GEOMORFOLOGÍA**

**JUAN CARLOS FLORES, Geól.**  
Líder Equipo

**JULIO C. GUERRA, Geól.**  
Profesional de Apoyo

**MARIA ALEJANDRA VELEZ, Geól.**  
Profesional de Apoyo

**ESTEBAN A. NOREÑA, Geól.**  
Profesional de Apoyo

### **SIG Y TOPOGRAFÍA**

**JHON JAIRO BARONA, Ph.D.**  
Líder Equipo

**PAOLA T. GOMEZ, Geóg.**  
Profesional de SIG

**LINA V. LATORRE, Ing.**  
Profesional de SIG

**JORGE A. DÍAZ, Geóg.**  
Profesional de SIG

**FRANKLIN A. BEDOYA, Ing.**  
Profesional de Topografía

**ALEJANDRO FERNANDEZ, Téc.**  
Apoyo Topografía

### **AMENAZA INUNDACIÓN Y AVENIDA TORRENCIAL**

**CARLOS RAMÍREZ C., MSc.**  
Líder Equipo

**CESAR A. VIVAS, Ing.**  
Profesional Hidrología e Inundación

**RAFAEL CLEMENT, Ing.**  
Profesional Avenida Torrencial

### **AMENAZA MOVIMIENTO EN MASA Y SOCAVACIÓN LATERAL**

**JHONALBERTH PALACIOS SÁNCHEZ, Ing.**  
Líder Equipo

**NOVIEMBRE DE 2022**

## TABLA DE CONTENIDO

<b>1.</b>	<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>8</b>
<b>2.</b>	<b>OBJETIVOS .....</b>	<b>11</b>
2.1.	General .....	11
2.2.	Específicos.....	11
2.3.	Alcance .....	11
<b>3.</b>	<b>LOCALIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO .....</b>	<b>12</b>
3.1.	Río Amaime .....	13
3.1.1.	Río Nima .....	13
<b>4.</b>	<b>CLASIFICACIÓN DE LOS PROCESOS DE SOCAVACIÓN LATERAL.....</b>	<b>15</b>
4.1.	La erosión hídrica.....	15
4.2.	La erosión fluvial .....	16
4.2.1.	Socavación lateral y de fondo.....	17
4.3.	Movimientos en masa .....	18
4.3.1.	Movimientos con predominio de la trayectoria vertical .....	18
4.3.2.	Movimientos de giro de bloques conformados por fracturación vertical .....	19
4.3.3.	Desplazamiento en masa .....	19
4.3.4.	Transporte en masa.....	20
<b>5.</b>	<b>METODOLOGÍA .....</b>	<b>21</b>
5.1.	Erosión marginal por eventos históricos.....	23
5.1.1.	Fotointerpretación.....	23
5.1.2.	Trabajo de campo.....	24
5.2.	Análisis dinámico fluvial (multitemporal) de los ríos Amaime y Nima en barrio Azul	24
5.3.	Susceptibilidad por socavación lateral.....	29
5.3.1.	Método estadístico Bivariado .....	29
5.3.2.	Leyenda del mapa de susceptibilidad por socavación lateral.....	33
5.4.	Exploración geotécnica del subsuelo .....	34
5.4.1.	Perforación SPT .....	34
5.4.2.	Apique .....	38
5.4.3.	Líneas Sísmicas .....	38
5.4.4.	Ensayos de laboratorio .....	41
5.5.	Socavación lateral de cauces por hidráulica fluvial.....	41
5.5.1.	Definición de los polígonos de erosión a lo largo del cauce principal.....	42
5.5.2.	Definición de parámetros geométricos, características y propiedades de los materiales .....	42
5.5.3.	Estimación de velocidad crítica en los polígonos de erosión.....	43

5.5.4.	Cálculo de la tasa de erosión y el tiempo de aplicación del esfuerzo cortante en las paredes del cauce .....	44
5.6.	Análisis de estabilidad de Taludes .....	45
5.7.	Amenaza por socavación lateral (consolidado) .....	46
<b>6.</b>	<b>RESULTADOS</b> .....	<b>48</b>
6.1.	Erosión marginal por eventos históricos .....	48
6.2.	Análisis dinámico fluvial .....	49
6.2.1.	Rio Amaime .....	50
6.2.2.	Rio Nima.....	60
6.3.	Susceptibilidad por socavación lateral.....	70
6.3.1.	Descripción de las variables .....	70
6.4.	Exploración geotécnica y ensayos de laboratorio.....	85
6.4.1.	Perforación SPT .....	85
6.4.2.	Apique .....	90
6.5.	Socavación lateral de cauce por hidráulica fluvial .....	93
6.6.	Análisis de estabilidad.....	99
6.7.	Amenaza por socavación lateral .....	107
<b>7.</b>	<b>CONCLUSIONES</b> .....	<b>110</b>
<b>8.</b>	<b>REFERENCIAS</b> .....	<b>112</b>
<b>9.</b>	<b>ANEXOS</b> .....	<b>117</b>

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Procesos de erosión hídrica y su contribución a la inestabilidad .....	17
Tabla 2. Insumos de fotointerpretación .....	24
Tabla 3. Insumos utilizados para el análisis multitemporal de las orillas de los ríos Amaime y Nima en barrio Azul .....	24
Tabla 4. Norma para ensayos.....	41
Tabla 5. Matriz de comparación entre zonas de susceptibilidad y otras variables.....	47
Tabla 6. Categorización de la variable pendiente verificar .....	72
Tabla 7. Dirección de la ladera .....	74
Tabla 8. Siglas de las unidades geológicas superficiales en el área de estudio .....	75
Tabla 9. Siglas de las unidades geológicas superficiales en el área de estudio .....	77
Tabla 10. Categorización de la variable pendiente.....	79
Tabla 11. Resultado de la sumatoria de los factores determinantes con la variable movimientos .....	80
Tabla 12. Rangos y porcentaje del área bajo la curva.....	82
Tabla 13. Relación de las perforaciones realizadas, coordenadas (geográficas) .....	85
Tabla 14. Relación de resultados de ensayos de laboratorio realizados a las muestras recuperadas en las labores de exploración.....	88
Tabla 15. Gráficas esfuerzo-deformación obtenidas del ensayo de compresión confinada sobre la Muestra M2 de la Perforación P-01 .....	90
Tabla 16. Relación de los apiques realizados, coordenadas (geográficas) .....	90
Tabla 17. Relación de resultados de ensayos de laboratorio realizados a las muestras recuperadas en las labores de exploración.....	93
Tabla 18. Características geotécnicas de los materiales en el río Amaime .....	96
Tabla 19. Esfuerzo crítico de los materiales en la banca del cauce en el río Amaime .....	96
Tabla 20. Esfuerzo cortante de los materiales en la banca del cauce en el río Amaime.....	97
Tabla 21. Características geotécnicas de los materiales en el río Nima .....	97
Tabla 22. Esfuerzo crítico de los materiales en la banca del cauce en el río Nima.....	97
Tabla 23. Esfuerzo cortante de los materiales en la banca del cauce en el río Nima .....	98
Tabla 24. Tasa de erosión en las bancas de los cauces de los ríos Amaime y Nima.....	98
Tabla 25. Longitud de erosión lateral del cauce de los ríos Amaime y Nima.....	98
Tabla 26. FS por equilibrio límite y FS por cantiléver en el río Amaime .....	105
Tabla 27. FS por equilibrio límite y FS por cantiléver en el río Nima.....	106
Tabla 28. Distancia entre el inicio de la falla y la corona de la banca.....	107

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localización general municipio de Palmira .....	12
Figura 2. Localización subcuencas en estudio municipio de Palmira .....	14
Figura 3. Flujograma metodológico para el análisis de la susceptibilidad por socavación lateral .....	22
Figura 4. Flujograma metodológico para el análisis de la amenaza por socavación lateral... ..	23
Figura 5. Determinación del signo de la orilla derecha del río, con relación a su localización con respecto al eje de referencia para el año 2021.....	25
Figura 6. Determinación del signo de la orilla izquierda del río, con relación a su localización con respecto al eje de referencia para el año 2021.....	26
Figura 7. Determinación del signo de las márgenes del río Amaime Sección 1, para el año 1989. ....	27
Figura 8. Determinación del signo de las márgenes del río Amaime Sección 3, para el año 1989. ....	27
Figura 9. Determinación del signo de las márgenes del río Nima Sección 7, para el año 2015. ....	27
Figura 10. Cálculo del desplazamiento margen derecha río Amaime para los años 2015 y 2021 – Sección 4.....	28
Figura 11. Cálculo del desplazamiento margen derecha río Amaime para los años 2015 y 2021 – Sección 3.....	28
Figura 12. Diagrama de flujo simplificado del Análisis Estadístico Bivariado.....	30
Figura 13. Ejemplo de una curva de éxito .....	33
Figura 14. Montaje Equipo de Perforación SPT .....	36
Figura 15. Esquema de Operación para Penetración por Percusión y Prueba SPT .....	36
Figura 16. Características del Muestreador Empleado.....	37
Figura 17. Muestreador de Caña Partida. ....	37
Figura 18 Sismógrafo Seistronix RAS-24.....	38
Figura 19 Geófonos de adquisición de datos.....	38
Figura 20 Ilustración típica de la captura de datos en campo mediante el software RAS-24 correspondiente a la ejecución de la línea de refracción LS-1 para ondas S .....	39
Figura 21 Ilustración típica del procesamiento de datos mediante el software Rayfract correspondiente a la línea de refracción LS-1 para ondas P. ....	40
Figura 22 Ilustración típica del procesamiento de datos mediante el software Rayfract correspondiente a la línea de refracción LS-1 para ondas S. ....	40
Figura 23. Esquema de polígonos de erosión fluvial a lo largo del cauce principal .....	42
Figura 24. a) Lateral Izquierda; b) Lateral Derecha .....	43
Figura 25. Longitud de Erosión de la banca por acción del flujo .....	45
Figura 26. Análisis de estabilidad de laderas .....	46
Figura 27. Estaciones de campo geología y geomorfología en barrio Azul (INS-73).....	48
Figura 28. Socavación lateral de eventos por historicidad (HIS-BA_1) .....	49
Figura 29. Secciones de análisis multitemporal de los ríos Amaime y Nima sector de Barrio azul (INS-72).....	50

Figura 30. Secciones para análisis de movilidad de orillas a lo largo del río Amaime en el sector de Barrio Azul .....	51
Figura 31. Distribución cauces del río Amaime – Sección 1 en el sector de Barrio Azul. La flecha azul indica el sentido de la corriente .....	52
Figura 32. Movilidad de las orillas del río Amaime – Sección 1 en el sector de Barrio Azul ..	52
Figura 33. Distribución cauces del río Amaime – Sección 2 en el sector de Barrio Azul. La flecha azul indica el sentido de la corriente .....	53
Figura 34. Movilidad de las orillas del río Amaime – Sección 2 en el sector de Barrio Azul ..	54
Figura 35. Distribución cauces del río Amaime – Sección 3 en el sector de Barrio Azul. La flecha azul indica el sentido de la corriente .....	54
Figura 36. Movilidad de las orillas del río Amaime – Sección 3 en el sector de Barrio Azul ..	55
Figura 37. Distribución cauces del río Amaime – Sección 4 en el sector de Barrio Azul. La flecha azul indica el sentido de la corriente .....	55
Figura 38. Movilidad de las orillas del río Amaime – Sección 4 en el sector de Barrio Azul ..	56
Figura 39. Distribución cauces del río Amaime – Sección 5 en el sector de Barrio Azul. La flecha azul indica el sentido de la corriente .....	57
Figura 40. Movilidad de las orillas del río Amaime – Sección 5 en el sector de Barrio Azul ..	57
Figura 41. Distribución cauces del río Amaime – Sección 6 en el sector de Barrio Azul. La flecha azul indica el sentido de la corriente .....	58
Figura 42. Movilidad de las orillas del río Amaime – Sección 6 en el sector de Barrio Azul ..	58
Figura 43. Movilidad de las orillas del río Amaime – Período 1981 – 2021 en el sector de Barrio Azul .....	59
Figura 44. Secciones para análisis de movilidad de orillas a lo largo del río Nima2 en el sector de Barrio Azul .....	60
Figura 45. Distribución cauces del río Nima – Sección 12 en el sector de Barrio Azul. La flecha azul indica el sentido de la corriente .....	61
Figura 46. Movilidad de las orillas del río Nima – Sección 12 en el sector de Barrio Azul .....	61
Figura 47. Distribución cauces del río Nima – Sección 11 en el sector de Barrio Azul. La flecha azul indica el sentido de la corriente .....	62
Figura 48. Movilidad de las orillas del río Nima – Sección 11 en el sector de Barrio Azul .....	63
Figura 49. Distribución cauces del río Nima – Sección 10 en el sector de Barrio Azul. La flecha azul indica el sentido de la corriente .....	63
Figura 50. Movilidad de las orillas del río Nima – Sección 10 en el sector de Barrio Azul .....	64
Figura 51. Distribución cauces del río Nima – Sección 9 en el sector de Barrio Azul. La flecha azul indica el sentido de la corriente .....	65
Figura 52. Movilidad de las orillas del río Nima – Sección 9 en el sector de Barrio Azul .....	65
Figura 53. Distribución cauces del río Nima – Sección 8 en el sector de Barrio Azul. La flecha azul indica el sentido de la corriente .....	66
Figura 54. Movilidad de las orillas del río Nima – Sección 8 en el sector de Barrio Azul .....	66
Figura 55. Distribución cauces del río Nima – Sección 7 en el sector de Barrio Azul. La flecha azul indica el sentido de la corriente .....	67
Figura 56. Movilidad de las orillas del río Nima – Sección 7 en el sector de Barrio Azul .....	67

Figura 57. Movilidad de las orillas del río Nima – Período 1981 – 2021 en el sector de Barrio Azul .....	68
Figura 58. Dinámica fluvial de los ríos Amaime y Nima (1981 – 2021) (INS-65) .....	69
Figura 59. Multitemporal de los ríos Amaime y Nima (1981-2021) (INS-62).....	70
Figura 60. Modelo Digital del Terreno (INS-63).....	71
Figura 61. Pendientes (INS-68) .....	73
Figura 62. Orientación (INS-66) .....	74
Figura 63. Unidades geológicas superficiales (GEOL-BA_1) .....	76
Figura 64. Geomorfología (GMF-BA_1) .....	77
Figura 65. Socavación lateral activa (SL-5).....	78
Figura 66. Relación de la socavación lateral con la variable pendiente (SL-4).....	81
Figura 67. Curva de éxito susceptibilidad por socavación lateral .....	82
Figura 68. Susceptibilidad por socavación lateral (SL-6).....	83
Figura 69. Porcentaje de susceptibilidad por socavación lateral .....	84
Figura 70. Exploraciones geotécnicas – Perforaciones SPT (INS-71).....	86
Figura 71 Perfil estratigráfico de los sondeos .....	87
Figura 72 Gráficas esfuerzo-deformación pico (izq) y cohesion_angulo de fricción (der) obtenidas del ensayo de corte directo sobre la Muestra M2 de la Perforación P-02. ....	89
Figura 73. Exploraciones geotécnicas – Apiques (INS-60) .....	91
Figura 74 Perfil estratigráfico de los apiques .....	92
Figura 75. Secciones o modelos geológicos – geotécnicos (INS-69) .....	94
Figura 76. Perfiles transversales del río Amaime utilizados en la modelación.....	94
Figura 77. Perfiles transversales del río Amaime escalados 5 veces en el eje vertical.....	95
Figura 78. Perfiles transversales del río Nima utilizados en la modelación.....	95
Figura 79. Perfiles transversales del río Nima escalados 5 veces en el eje vertical .....	96
Figura 80. Socavación lateral por hidráulica fluvial (INS-64) .....	99
Figura 81. Perfil 1 de modelación para el río Amaime. Factor de seguridad por equilibrio límite: a) banca izquierda, b) banca derecha.....	100
Figura 82. Perfil 2 de modelación para el río Amaime. Factor de seguridad por equilibrio límite: a) banca izquierda, b) banca derecha.....	100
Figura 83. Perfil 3 de modelación para el río Amaime. Factor de seguridad por equilibrio límite: a) banca izquierda, b) banca derecha.....	101
Figura 84. Perfil 1 de modelación para el río Nima Factor de seguridad por equilibrio límite: a) banca izquierda, b) banca derecha .....	101
Figura 85. Perfil 2 de modelación para el río Nima. Factor de seguridad por equilibrio límite: a) banca izquierda, b) banca derecha .....	101
Figura 86. Perfil 3 de modelación para el río Nima Factor de seguridad por equilibrio límite: a) banca izquierda, b) banca derecha.....	102
Figura 87. Perfil 4 de modelación para el río Nima Factor de seguridad por equilibrio límite: a) banca izquierda, b) banca derecha.....	102
Figura 88. Perfil 5 de modelación para el río Nima Factor de seguridad por equilibrio límite: a) banca izquierda, b) banca derecha.....	102

Figura 89. Perfil 6 de modelación para el río Nima Factor de seguridad por equilibrio límite: a) banca izquierda. ....	103
Figura 90. Perfil 7 de modelación para el río Nima Factor de seguridad por equilibrio límite: a) banca izquierda, b) banca derecha.....	103
Figura 91. Perfil 8 de modelación para el río Nima Factor de seguridad por equilibrio límite: a) banca izquierda. ....	103
Figura 92. Perfil 9 de modelación para el río Nima Factor de seguridad por equilibrio límite: a) banca izquierda, b) banca derecha.....	104
Figura 93. Perfil 10 de modelación para el río Nima Factor de seguridad por equilibrio límite: a) banca izquierda. ....	104
Figura 94. Socavación lateral por falla geotécnica (INS-67).....	106
Figura 95. Amenaza por socavación lateral (SL-8) .....	108
Figura 96. Porcentaje de amenaza por socavación lateral.....	109

## 1. INTRODUCCIÓN

Actualmente, existe gran evidencia sobre cómo en la dinámica de los municipios se presentan diversas alteraciones desatadas por la ocurrencia de fenómenos de carácter natural y no natural, los cuales, concentran fuertes daños y generan o agudizan crisis sociales que, en la mayoría de las ocasiones y en un corto y mediano plazo, suelen propiciar crisis institucionales. Se ha demostrado, que el constante aumento de la peligrosidad e impactos de los desastres sobre las poblaciones, se encuentran directamente relacionados con formas de organización impropias, modelos insostenibles, pobreza y problemáticas ambientales (García-Tornel, 2001; Lavell, 2005).

Si bien, los eventos físicos son un prerequisite para que sucedan los desastres, no son suficientes en sí para que se materialicen; debe existir una sociedad que por su forma particular de organización resulte incapaz para absorber o recuperarse autónomamente de los impactos de estos eventos (Maskrey, 1998; Blaikie et al., 1996). Los riesgos, por lo tanto, representan los problemas no resueltos de las dinámicas sociales que se llevan a cabo sobre un territorio, de su escasa capacidad auto-organizativa y de la poca comprensión de los condicionantes del medio. En este sentido, se entiende como Riesgo a la probabilidad de daños o pérdidas de tipo corporal, social, cultural, económico y ambiental, que pueden presentarse dentro de un territorio en un periodo determinado de tiempo, debido a la ocurrencia de fenómenos de carácter natural, socio-natural, tecnológicos o humanos no intencionales y bajo unas condiciones de vulnerabilidad ante dichos fenómenos. Las condiciones de Riesgo en un municipio son dinámicas, cambian con el tiempo, tanto en sus características como en su magnitud; siempre aumentando, a no ser que se tenga una estrategia consciente e indicada tanto de las condiciones de riesgo actual como de las futuras.

Por lo tanto, el proceso de Gestión del Riesgo surge a partir de la necesidad de orientar la gestión de un desarrollo municipal en función de los riesgos. Podemos decir entonces, que la Gestión del Riesgo se puede entender como un conjunto de elementos, medidas y herramientas dirigidas a conocer e intervenir las Amenazas y/o las Vulnerabilidades con el fin de mitigar los Riesgos, a través de la prevención y la reducción de los elementos (estructurales, funcionales y corporales) y los niveles de exposición frente a eventos potencialmente destructivos (Carreño, 2006).

En este sentido, una de las herramientas fundamentales para los procesos de Gestión del Riesgo municipal en Colombia corresponde a los estudios de riesgo que se deben realizar en el marco de lo establecido en los artículos 39 y 40 de Ley 1523 de 2012 respecto a la integración de la gestión del riesgo en la planificación territorial; así como, a partir de las disposiciones establecidas en el Decreto 1807 de 2014 (compilado en el Decreto 1077 de 2015) en cuanto a escalas y tipos de estudio para dicha integración.

Los estudios de Riesgo corresponden a los procesos que permiten la delimitación y zonificación de los factores asociados al Riesgo de desastres (Amenazas y Vulnerabilidades)

a partir del análisis y evaluación técnica de los mismos. De esta manera y según lo establecido por el Decreto 1807 de 2014, se deben realizar estudios, a un nivel básico, para la revisión de los contenidos de mediano y largo plazo o en la expedición de nuevos Planes de Ordenamiento Territorial (POT); y a un nivel detallado, durante la ejecución de estos POT y a partir de las zonas priorizadas en los estudios de nivel básico. Por lo tanto, el Decreto 1807 de 2014 brinda las disposiciones mínimas en cuanto a las condiciones y escalas de trabajo para incorporar de manera gradual la gestión del riesgo en dichos planes, así como, las condiciones técnicas mínimas para la elaboración de los estudios en torno a fenómenos como Socavación lateral (socavación lateral), Inundación y Avenida Torrencial dado la recurrencia de éstos.

El municipio de Palmira, con su contexto físico-geográfico, corresponde a uno de los municipios de Colombia con las condiciones propicias para la configuración de escenarios de riesgo asociados a fenómenos de recurrencia como Socavación lateral (socavación lateral), Inundaciones y Avenidas Torrenciales, entre otros; que, junto a los notorios cambios a nivel climático y la localización incorrecta de elementos estructurales y corporales, pueden agudizar el impacto de dichos fenómenos en el territorio.

A partir de lo anterior, el Departamento Nacional de Planeación, en el marco del programa de POT Modernos, llevó a cabo en el año 2018, por medio del consultor EZQUIAGA, los primeros estudios básicos para la incorporación de la gestión del riesgo en la propuesta de revisión y ajuste del POT del municipio de Palmira del año 2013. Sin embargo, el concepto generado por parte de Planeación Nacional para estos estudios, consideró que la consultoría desarrollada, no entregó a satisfacción los productos del objeto contractual y el municipio no logró, ni recibió el anunciado Plan de Ordenamiento Territorial (POT) moderno, igualmente, la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca, en su apoyo a la administración municipal en el año 2018, expuso y sustentó ante todos los actores del caso, las observaciones y objeciones que tenía frente al tema de las evaluaciones de amenazas realizado por el Consultor del Departamento de Planeación Nacional (DGRD de Palmira, 2021).

Con el pasivo dejado por el primer intento de estudios de evaluación y zonificación de amenazas y riesgos para la incorporación en la revisión y ajuste del POT, el municipio de Palmira, a través de la Dirección de Gestión del Riesgo de Desastres – DGRD, inicia en el año 2020 un gran esfuerzo de gestión con el objeto de satisfacer la necesidad de contar con estudios básicos de amenaza y riesgos como soporte para el nuevo POT. En este sentido, se logra alcanzar el Convenio Interadministrativo MP968 de 2021 entre la Administración Municipal de Palmira y La Universidad del Valle – Laboratorio Observatorio Sismológico y Geofísico del Suroccidente Colombiano (OSSO), con el cual se comenzaron a aunar esfuerzos para realizar los estudios básicos de amenaza por Inundación, Movimiento en Masa y Avenida Torrencial en el municipio de Palmira y estudios a detalle de Amenaza, Vulnerabilidad y Riesgo por Inundaciones y Socavación Lateral en el Barrio Azul, corregimiento de Amaime.

En el marco de este Convenio Interadministrativo se realiza el estudio No. 11 correspondiente al estudio de amenaza por socavación lateral a escala 1:2000 en barrio Azul, corregimiento de

Amaime en el municipio de Palmira. Este estudio se lleva a cabo con el propósito de obtener la zonificación de la amenaza a escala detallada para el fenómeno mencionado a partir de lo exigido en el Decreto 1807 de 2014, compilado en el Decreto 1077 de 2015. El presente documento técnico, muestra los insumos requeridos, los procesos metodológicos llevados a cabo; así como, los resultados obtenidos para alcanzar dicha zonificación.

## 2. OBJETIVOS

### 2.1. General

Evaluar y zonificar la amenaza por Socavación Lateral (SL) a escala 1:2000 en barrio Azul, corregimiento de Amaime en el municipio de Palmira Valle del Cauca.

### 2.2. Específicos

- Identificar la erosión marginal por eventos históricos (historicidad).
- Estimar la multitemporal del desplazamiento lateral de los cauces Amaime y Nima a escala 1:2000 en barrio Azul, corregimiento de Amaime en el municipio de Palmira.
- Evaluar la susceptibilidad por socavación local o colapso de banca a escala 1:2000 en barrio Azul, corregimiento de Amaime en el municipio de Palmira.
- Estimar la socavación lateral de cauces por hidráulica fluvial a escala 1:2000 en barrio Azul, corregimiento de Amaime en el municipio de Palmira.
- Evaluar la faja de terreno con amenaza de colapso de banca por falla geotécnica a escala 1:2000 en barrio Azul, corregimiento de Amaime en el municipio de Palmira.
- Estimar la amenaza por Socavación lateral (consolidado de los mapas aquí enunciados), a escala 1:2000 en barrio Azul, corregimiento de Amaime en el municipio de Palmira.

### 2.3. Alcance

El presente estudio pretende identificar, evaluar y zonificar la susceptibilidad y la amenaza por socavación lateral en barrio Azul, corregimiento de Amaime. En cumplimiento del Decreto 1807 de 2015, el presente estudio se realiza a escala 1:2.000 con el fin que sea tomado como insumo para los futuros procesos de ordenación y planificación territorial en los límites del municipio de Palmira.

### 3. LOCALIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

El municipio de Palmira se encuentra ubicado en la región suroriental del departamento del Valle del Cauca alrededor de los 03°31'39" de latitud Norte y 76°18'01" de longitud Oeste del meridiano de Greenwich. Limita al norte con el municipio de El Cerrito, al sur con los municipios de Pradera y Candelaria, al este con el departamento del Tolima y al oeste con los municipios de Cali, Yumbo y Vijes (ver Figura 1).

El municipio cuenta con un área aproximada de 100.000 Ha y se divide en dos grandes zonas fisiográficas de Este a Oeste: la zona montañosa y de piedemonte, y la zona plana asociada al valle geográfico del río Cauca sobre la cual se encuentra ubicada la cabecera urbana del municipio. Cuenta con una cantidad aproximada de población, según proyecciones DANE a 2021, de 356.000 habitantes; la gran mayoría concentrados en la cabecera urbana con un aproximado de 281.000 habitantes y unos 74.000 habitantes en los demás centros poblados y rural disperso.

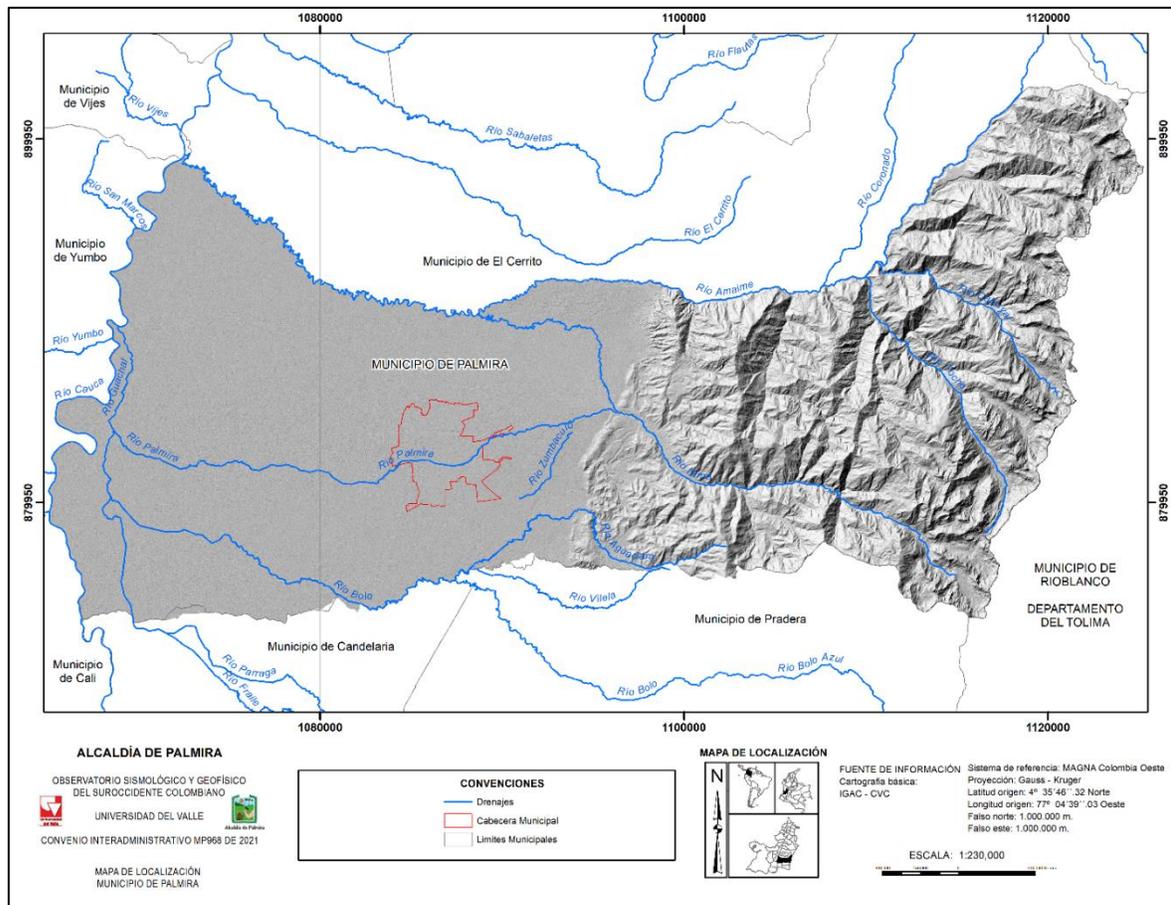


Figura 1. Localización general municipio de Palmira

Fuente: elaboración propia

En el presente estudio el análisis dinámico fluvial se desarrolla de forma particular, para las orillas de los ríos Nima y Amaime en su recorrido por el sector de Barrio Azul la socavación lateral de cauces por hidráulica fluvial en el corregimiento de Amaime municipio de Palmira; con el fin de determinar la socavación lateral de cauces por hidráulica fluvial. Bajo este contexto, las cuencas hidrográficas de los ríos Amaime y Nima son las que presentan influencia en el área de estudio y su descripción general se presenta a continuación:

### 3.1.Río Amaime

El río Amaime desemboca sobre la margen derecha del río Cauca en la abscisa K 185 + 132, aguas abajo del embalse de Salvajina. La cuenca del río Amaime está ubicada en la vertiente occidental de la Cordillera Central. Geográficamente la cuenca está ubicada aproximadamente entre los 3° 29' y los 3° 47' de latitud Norte y entre los 75° 55' y los 76° 12' de longitud Oeste. La superficie de la cuenca es de 482.15 km<sup>2</sup> hasta la estación Amaime, la longitud del cauce principal es de 44.34 km y su caudal medio es de 7.8 m<sup>3</sup>/s hasta la estación Los Ceibos.

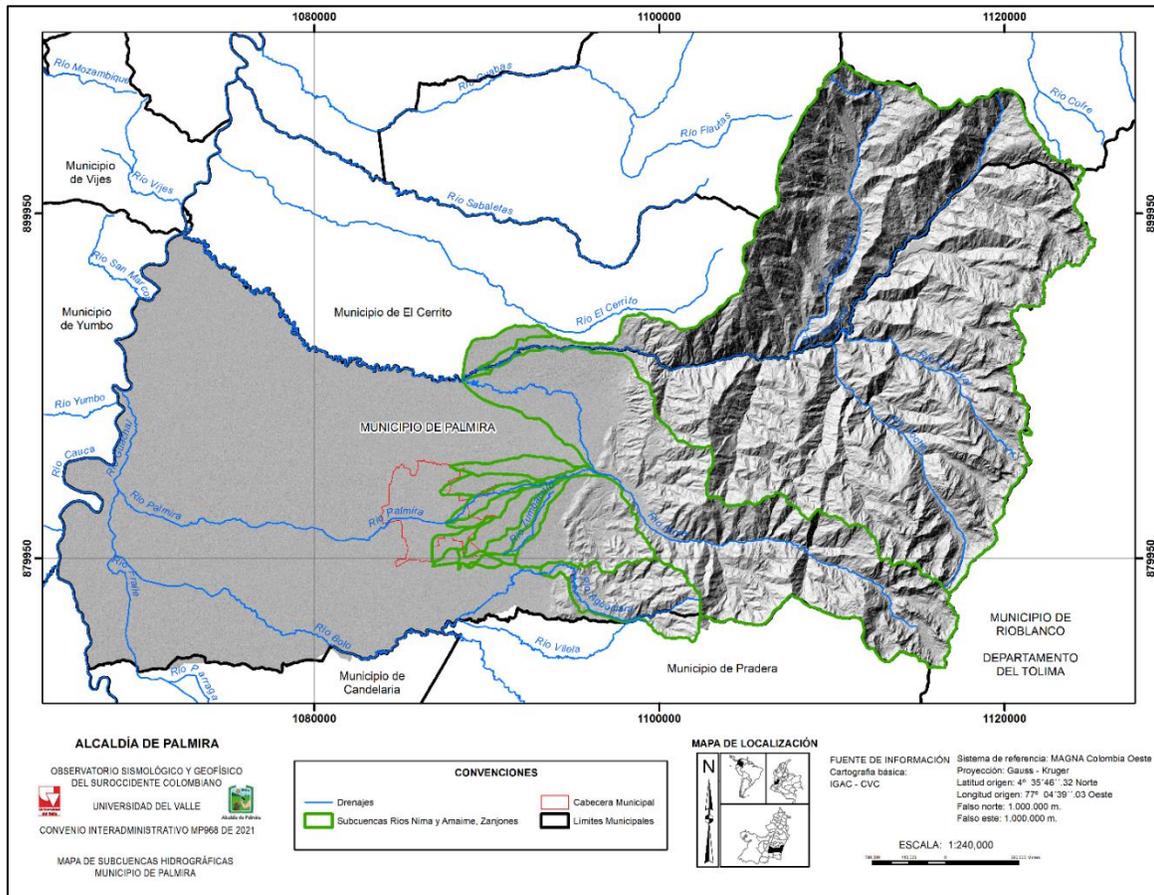
La cuenca presenta un amplio rango de distribución altitudinal que oscila entre la cota 1100 msnm en la carretera Tablones-Palmira y la cota 4100 msnm en el Páramo La Estrella, en la laguna la Negra, sitio de nacimiento del río Amaime. Su complejo relieve incluye muy pocas zonas planas, donde predominan las zonas quebradas y abruptas, con pendientes superiores al 50%.

Los afluentes principales del río Amaime en su margen izquierda son las quebradas Cucuana, Teatino y La Tigra y los ríos Cabuyal, Nima y Toche. Por la margen derecha fluyen al Amaime el río Coronado y las quebradas La Italia, Fuentelapeña, Corazón, La Honda, Platanillal y Naranjales (Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca - Universidad del Valle, 2000).

#### 3.1.1. Río Nima

El río Nima nace en la laguna de Santa Teresa a 3800 msnm en el flanco occidental de la Cordillera Central y desemboca a los 1018 msnm sobre la margen izquierda del río Amaime en el sector conocido como Barrio Azul del corregimiento de Amaime. La superficie de la cuenca es de 161,48 km<sup>2</sup> hasta la desembocadura del río Amaime y la longitud del cauce principal es de 40,14 km. El río Nima es la principal fuente de abastecimiento de agua del acueducto del municipio de Palmira.

Los afluentes principales del río Nima son la quebrada Casa de Teja, Santa Rita, Los Cuervos, Golondrinas, Agua Clara, Los Negros, Las Mirlas, El Cofre, Aguazul. Por su parte, dentro las más importantes derivaciones del río Nima se encuentra el río Palmira, la cual se localiza en su margen izquierda con un caudal de 2,21 m<sup>3</sup>/s que es distribuido en las demás subderivaciones de acuerdo con la reglamentación adoptada mediante la Resolución DG 185 de 2000, expedida por la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca.



**Figura 2.** Localización subcuencas en estudio municipio de Palmira

Fuente: elaboración propia

## 4. CLASIFICACIÓN DE LOS PROCESOS DE SOCACCIÓN LATERAL

En el estudio de la geotecnia es necesario identificar y entender la clase de proceso de degradación (Erosión, movimiento en masa), los mecanismos de falla, las causas y efectos. La clasificación presente en este documento, sigue la distribución hecha por Gonzalo Escobar y Carlos Escobar (2017), donde enfatiza la diferencia entre los procesos de erosión y los movimientos en masa. Se identifican siete (7) tipos de erosión, las cuales se presentan a continuación:

**Erosión hídrica:** Ocurre en las laderas y es el resultado del arranque, transporte y depósito de los suelos por la acción de las aguas pluviales y de escorrentía.

**Erosión fluvial:** Es lineal y afecta los cursos de agua. Es el arranque, transporte y depósito de los materiales que conforman el lecho de un cauce.

**Erosión eólica:** Es el modelado del suelo por la acción del viento, cuando arranca, transporta y deposita los suelos finos, desprovistos de vegetación.

**Erosión glaciar:** Es el resultado del modelado del relieve por la acción de los glaciares cuando movilizan, transportan y depositan materiales.

**Erosión periglacial:** Es propia de zonas cercanas a los casquetes polares cuando se presentan procesos de congelamiento, descongelamiento, combinado con otros tipos de erosión.

**Erosión litoral o costera:** Propia de las costas y ocurre por la acción de las olas y las mareas cuando remueven transportan y depositan suelos.

**Erosión kárstica:** Propia de formaciones calcáreas donde los suelos solubles en agua se erosionan internamente, formando cavernas.

En geotecnia se hace énfasis a los problemas causados por la erosión hídrica, fluvial y eólica que son las más frecuentes y generan problemas en estructuras.

### 4.1. La erosión hídrica

Los procesos de erosión hídrica modelan las laderas y taludes gracias a las aguas lluvias y de escorrentía que se generan durante los aguaceros. Estos procesos suceden en equilibrio cuando la vegetación es natural o se realizan obras y prácticas de control de erosión en terrenos sometidos a actividades antrópicas. En laderas y taludes sin prácticas estos procesos

se ven acelerados y ocasionan problemas inestabilizando laderas y taludes. Las manifestaciones de la erosión hídrica son las siguientes:

- **Erosión pluvial:** Es la erosión causada por el impacto del agua lluvia sobre el suelo. El mecanismo de erosión por impacto la gota de lluvia incluye la compactación que sufre el suelo por la energía de las gotas y la acción hidráulica del agua que permite arrancar las partículas de suelo superficial e incorporarlo al flujo.
- **Escurrimiento superficial difuso:** En los suelos desprovistos de vegetación en pendientes donde ha actuado la saltación pluvial, el agua escurre con régimen laminar un trayecto muy corto, removiendo las partículas de suelo y materia orgánica desalojada por ese proceso. En este caso se concentra menos energía que en el de las gotas de lluvia; mientras que, en caída libre, la mayoría de las gotas de lluvia se desplazan a velocidades de 6 a 9 m/seg en aguaceros fuertes, en el escurrimiento asociado a la erosión laminar, la velocidad del agua no supera por lo general 30 cm/seg. (Gray and Leiser, op. cit.).
- **Surcos de erosión (Escurrimiento Superficial Concentrado):** Tan pronto como el flujo se vuelve turbulento el agua adquiere energía suficiente para formar canales pequeños, pero bien definidos, relativamente paralelos o anastomosados, a veces con control estructural, denominados surcos de erosión.
- **Cárcavas:** Son canales o zanjones de diferente tamaño y forma, formados por flujos concentrados y aguas de manantiales. Más profundos y amplios que los surcos, por ellos circula agua en forma intermitente, durante o un poco después de los aguaceros. Según Gray y Leiser (1982.), se presentan 4 estados en su desarrollo: 1) formación y entallamiento de un canal o zanja, por escurrimiento concentrado de agua, 2) erosión remontante desde la base del canal y ensanchamiento del mismo, 3) cicatrización y 4) estabilización.
- **Escurrimiento Sub-superficial:** Las aguas de infiltración ocasionan tubificación o sifonamiento, proceso que consiste en la formación de cavidades cuando las fuerzas de filtración exceden la resistencia del material. Afectan principalmente suelos no cohesivos como arenas finas, limos y algunas areniscas mal cementadas (Sowers and Sowers, 1.972).

## 4.2.La erosión fluvial

Propia de los cauces de ríos y quebradas; las manifestaciones son los procesos de socavación de fondo y socavación latera

#### 4.2.1. Socavación lateral y de fondo

Se trata de la erosión producida por el agua encauzada, debido a su circulación por drenajes naturales de quebradas y ríos. Consiste en la movilización y el desalojo de suelo del canal, la erosión lateral y la socavación en el fondo. Es una erosión lineal, moderada por la erosión hacia la cabecera, o erosión regresiva. En corrientes juveniles que drenan terrenos generalmente muy pendientes, y a lo largo de arroyos y torrentes, predomina la erosión de fondo sobre la erosión lateral, mientras que en corrientes maduras o de orden alto, es más importante la erosión lateral.

Desde el punto de vista de la evolución morfológica, Keown et al (1977), señalan tres mecanismos de erosión en canales:

1. Ensanchamiento, debido al desgaste producido por el incremento del flujo y/o de las descargas de sedimentos.
2. Profundización por degradación en el fondo causada por el incremento del flujo o cambios de la pendiente.
3. Cambios en la sinuosidad del cauce, por pérdida de materiales en las orillas y la evolución de los meandros.

En la Tabla 1 se presenta una clasificación general de los procesos de erosión hídrica y se comentan algunos de sus efectos.

**Tabla 1.** Procesos de erosión hídrica y su contribución a la inestabilidad

TIPO	ACCION	EFFECTOS
<b>EROSION HIDRICA</b>  La acción de las aguas lluvias y de escorrentía son más intensos en laderas desprovistas de vegetación.	<b>Erosión Pluvial</b> Desalojo y dispersión de partículas de suelo por el impacto de las gotas de lluvia. Los suelos son arrastrados en suspensión, estimulando otras formas de erosión.	El impacto de la lluvia sobre el suelo, disminuye la porosidad por compactación, reduciendo su capacidad de infiltración. Este proceso desencadena el resto de procesos erosivos.
	<b>ESCURRIMIENTO SUPERFICIAL DIFUSO</b>	
	<b>Erosión Laminar</b> Arrastre uniforme de capas delgadas de suelo, muy cortas distancias, debido a escurrimiento difuso.	El escurrimiento de suelos limosos y limo arenosos en taludes viales y otras excavaciones, constituye una fuente muy importante de sedimentos.
<b>ESCURRIMIENTO SUPERFICIAL CONCENTRADO</b>		
	<b>Erosión en surcos</b> El escurrimiento concentrado labra pequeños canales más o menos paralelos, independientes. Se pueden eliminar con el perfilado y la protección del suelo.	Esta manifestación de la erosión es más incisiva debido a la energía que adquiere el agua concentrada en los canales.

TIPO	ACCION	EFFECTOS
	<b>Erosión en cárcavas</b> Es la erosión en zanjas profundas, de gran tamaño, estimulada por la concentración de aguas y sólidos. El proceso crece gracias a la profundización del fondo y los procesos remontantes.	Estos procesos se inician generalmente por vertimiento no controlado de aguas de escorrentías o de filtros. Acentúan el relieve promoviendo otras formas aun más graves de inestabilidad y constituye una fuente importante de sedimentos.
	<b>ESCURRIMIENTO SUB-SUPERFICIAL</b>	
<b>EROSIÓN KARSTICA</b>	<b>Tubificación y cavernas</b> Debilitamiento interno del terreno	Puede originar manantiales, cárcavas y hundimientos.  Profundiza el fondo de los cauces naturales, bisectando el terreno y eliminando soporte en la base de las laderas, lo cual puede promover deslizamientos.
	<b>Socavación de Fondo</b>	Profundiza el fondo de los cauces naturales, bisectando el terreno y eliminando soporte en la base de las laderas, lo cual puede promover deslizamientos.
<b>EROSION FLUVIAL.</b>	<b>Socavación lateral</b>	Provoca destrucción de las orillas inestabilizando fundaciones y originando deslizamientos.  Profundiza el fondo de los cauces naturales, bisectando el terreno y eliminando soporte en la base de las laderas, lo cual puede promover deslizamientos. Provoca destrucción de las orillas inestabilizando fundaciones y originando deslizamientos Efectos devastadores en las márgenes de los torrentes de montaña.
	<b>Descarga torrencial</b>	

Fuente: elaboración propia

### 4.3.Movimientos en masa

Por movimientos en masa se entiende el desplazamiento del terreno que constituye una ladera o un talud, hacia el exterior del mismo y en sentido descendente. Los movimientos pueden ser agrupados según dichos autores, en cinco mecanismos principales: desprendimiento y colapso, vuelco, deslizamiento, expansiones laterales y flujos. A continuación, se describe brevemente cada uno de estos mecanismos.

#### 4.3.1. Movimientos con predominio de la trayectoria vertical

Son procesos que involucran masas de suelo y roca y los factores contribuyentes principales son el intemperismo, la erosión hídrica, fluvial y eólica y el factor detonante pueden ser vientos, lluvias o actividad sísmica con la contribución de la gravedad.

- **Desprendimientos o caídas:** Se originan por el despegue de una masa del suelo o roca de una pared empinada o acantilado y posterior descenso mediante caída libre, a través del aire, y rebote o rodadura final.
- **Colapsos:** También conocidos como desplomes, consisten en la caída de masas de material, con una trayectoria vertical, debido a la socavación efectuada por un río o el oleaje en un acantilado o la meteorización y disgregación de las rocas del pie del mismo.

#### 4.3.2. Movimientos de giro de bloques conformados por fracturación vertical

- **Vuelcos:** Es la rotación hacia delante y hacia el exterior de una ladera, de una masa del suelo o roca alrededor de un eje situado por debajo de su centro de gravedad. Las fuerzas desestabilizadoras son la gravedad y las fuerzas ejercidas por el terreno adyacente o por fluidos en las grietas. Dentro del mecanismo de vuelco se distinguen dos procesos.
- **Vuelcos por flexión:** Tiene lugar cuando las discontinuidades del macizo forman columnas semicontinuas en voladizo, con la posibilidad de flexionarse hacia adelante por descarga hasta romperse por flexión.
- **Desplomes:** Se produce en bordes de acantilados rocosos o de materiales arenarcillosos compactados, donde la masa movida cae inicialmente con un movimiento de giro apoyado en la base inferior y posteriormente un movimiento vertical de colapso, al deshacerse el apoyo de dicha zona.

#### 4.3.3. Desplazamiento en masa

- **Deslizamientos:** Son movimientos ladera abajo de masas de suelo o roca sobre una o varias superficies de rotura, o zonas relativamente delgadas con intensa deformación de corte, en los que se preserva a grandes rasgos la forma de masa desplazada. Las superficies pueden coincidir con planos estructurales (deslizamientos traslacionales de rocas o de capas delgadas de suelo), o son inducidas (deslizamientos rotacionales en suelos y/o materiales intermedios). Dentro de este mecanismo se distinguen los deslizamientos rotacionales y los traslacionales.

**Deslizamientos rotacionales:** El terreno en movimiento experimenta un giro a lo largo de una superficie de rotura curvilínea y cóncava, y según un eje situado por encima del centro de gravedad de la masa deslizada.

**Deslizamientos traslacionales:** Las masas se desplazan a lo largo de una superficie de rotura plana u ondulada, pudiendo deslizarse posteriormente sobre la superficie del terreno original y proseguir si la inclinación es suficientemente fuerte. Los componentes

de la masa desplazada se mueven inicialmente con la misma velocidad y trayectorias paralelas, pudiendo fragmentarse o disgregarse si posteriormente aumenta su velocidad, derivando en un flujo más que en deslizamiento.

- **Reptamientos:** Movimiento de tipo viscoso sumamente lento (unos pocos centímetros por año), asociado a una deformación continua de terrenos no consolidados o relativamente sueltos, sin rotura o falla del mismo a lo largo de superficies de corte. Afecta principalmente a los depósitos y a los suelos residuales, pero puede presentarse también en rocas.
- **Propagación lateral:** El caso más común corresponde al desplazamiento horizontal de masas duras por flujo plástico o licuación del material subyacente más blando.
- **Escurrimiento:** Se designa de esta manera al colapso o derrumbe de masas secas o húmedas expuestas en excavaciones viales o semejantes, que se desplazan de manera viscosa, por lo general poco tiempo después del corte.
- **Subsidencia:** Aunque no se trata de un movimiento que afecte la cara libre de un talud o ladera, es más común de lo que parece. Se trata de desplazamientos verticales.

#### 4.3.4. Transporte en masa

Son movimientos especialmente continuos en los que las superficies de cizalla tienen vida corta, se encuentran muy próximas y generalmente no se conservan. Se identifican varias clases.

- **Flujos:** Se trata de movimientos de tipo viscoso, la mayoría de los cuales involucra mezclas de agua y materiales sueltos, los cuales se desplazan lenta o rápidamente a lo largo de canales o depresiones naturales o artificiales generalmente angostas, provocando distintos tipos y grados de devastación. Los materiales pueden avanzar desde algunos metros hasta varios cientos de metros. Pueden ser:  
**Flujos de detritos:** Afectan fragmentos de roca de diferente tamaño embebidos en matriz fina, que se movilizan en forma rápida a muy rápida, dependiendo de la pendiente del terreno y del contenido de humedad.  
**Flujos de tierras:** Involucran materiales predominantemente finos, y por su carácter más viscoso, son más lentos que los anteriores.
- **Avalanchas de rocas y detritos:** Enormes volúmenes de rocas y detritos se desplazan con extraordinaria rapidez a lo largo de hondonadas, aprovechando en parte los cauces naturales. La expresión morfológica de estos procesos es similar a la descrita para los flujos de detritos y tierras.

## 5. METODOLOGÍA

La susceptibilidad por socavación lateral se toma como el grado de propensión de un terreno a desarrollar un fenómeno natural potencialmente dañino, definido a partir de la interacción de las propiedades intrínsecas caracterizadas bajo unidades de parámetro y unidades de terreno (Servicio Geológico Colombiano (SGC, 2015). Es decir, la evaluación de la susceptibilidad expresa cuales son los sitios con mayor o menor ocurrencia de un evento en determinada área. La susceptibilidad posee gran importancia puesto que es el primer paso a tener en cuenta a la hora de realizar una evaluación de la amenaza, ya que ofrece la información necesaria para identificar las características que presenta la zona para luego ser analizadas.

Según González de Vallejo, et al. (2002), la susceptibilidad es la posibilidad de que una zona quede afectada por determinado proceso, expresada en términos cualitativos y relativos, que como se verá, es insuficiente y puede mejorarse. La probabilidad puede aplicarse tanto al problema de la desestabilización de un punto, al hecho posible de que resulte movido por un movimiento subyacente, en cuyo caso hablamos de susceptibilidad a la desestabilización, como a su posible alcance por una masa desestabilizada en un proceso de socavación.

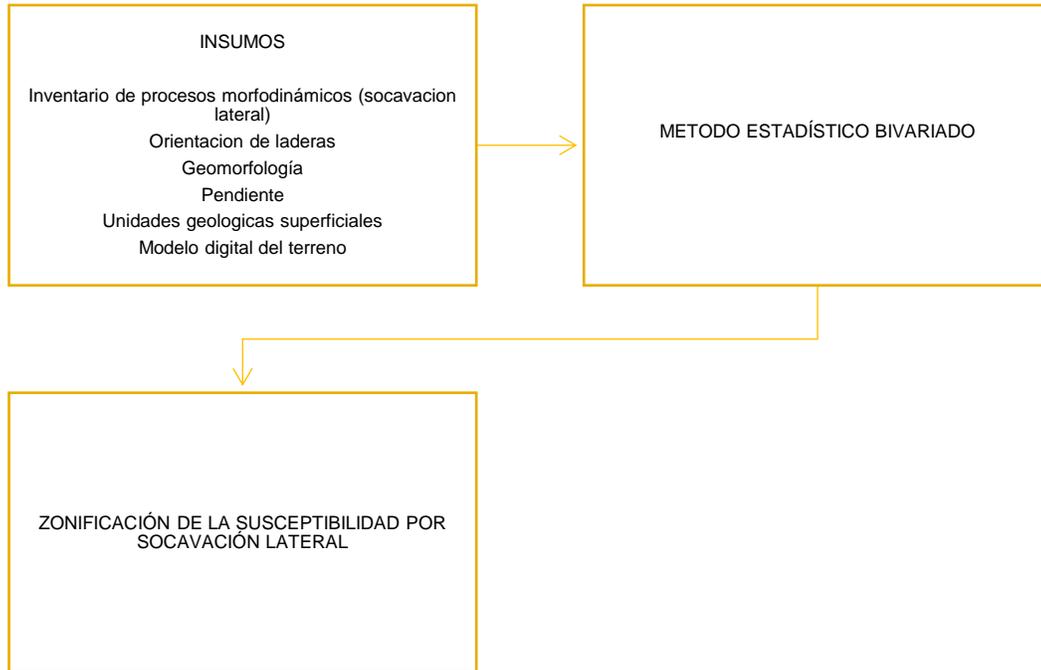
Para determinar la susceptibilidad por SL, se tienen en cuenta múltiples características del terreno; geomorfología, modelo digital de elevaciones, pendientes, entre otros. La metodología empleada se basa en la generación de diferentes mapas temáticos que son el producto del cruce de dos o más capas de información base aunado a los deslizamientos previos en la zona, luego con métodos estadísticos estos mapas temáticos se superponen para obtener el mapa de susceptibilidad y por medio de los Sistema de Información Geográfica (SIG) se obtienen las salidas cartográficas. También se realizó trabajo de campo el cual es de gran utilidad para obtener resultados rápidos y confiables al igual que permite corroborar la información de fuentes secundarias.

Para caracterizar la susceptibilidad por socavación lateral en el área de estudio, se tomó como base la “Guía metodológica para AMENAZA POR MM SC 1\_25.000”. adicional a ello, se realizó la evaluación de factores que inciden en la susceptibilidad del terreno ante este fenómeno estableciendo una serie de insumos cuya influencia aporta a la estabilidad o inestabilidad del suelo.

Para ello se realiza la evaluación de la susceptibilidad por socavación lateral (deslizamiento).

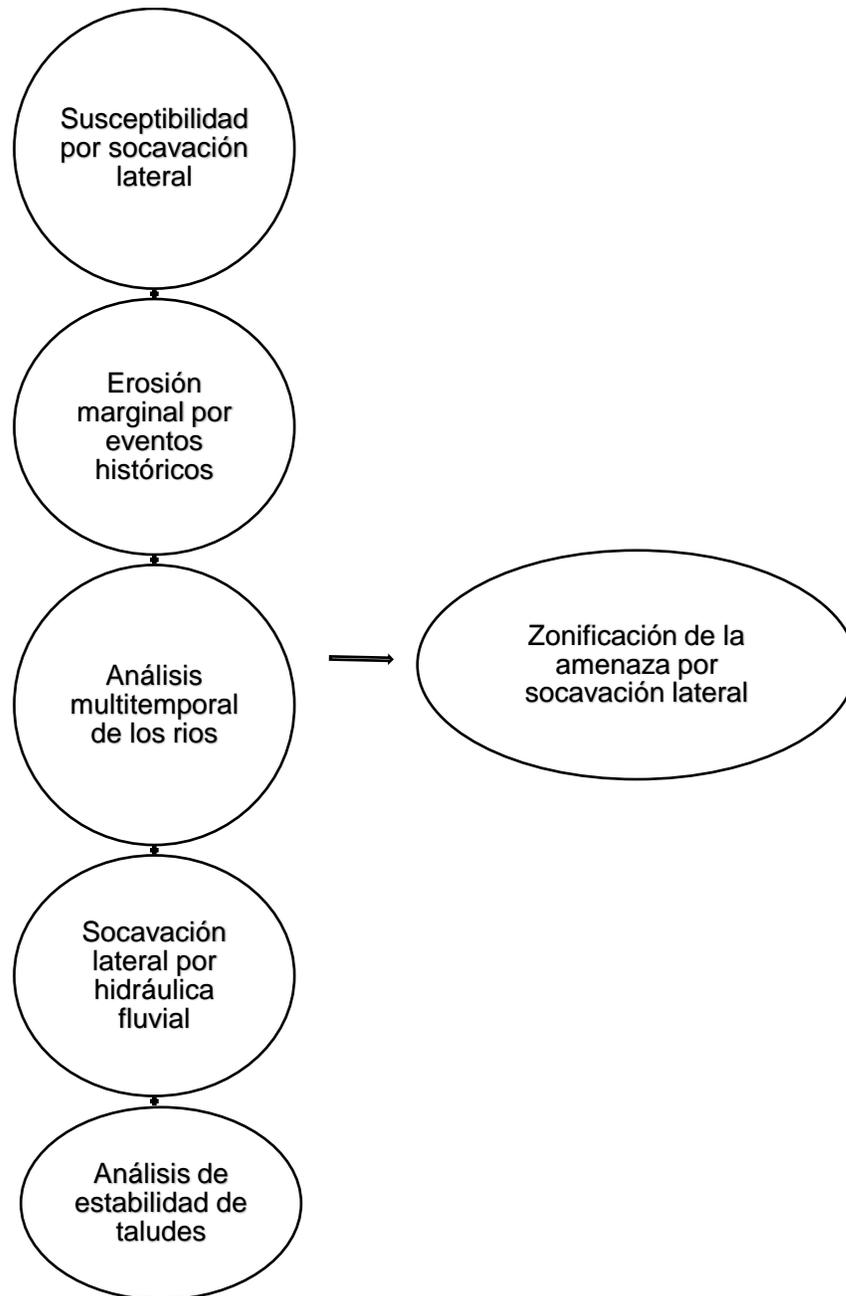
La evaluación de la susceptibilidad por socavación lateral se realizó mediante el modelamiento de pesos de las variables (resultado de la resta de los valores  $Wf^+$  -  $Wf^-$ ) que condicionan la ocurrencia de socavación lateral, mediante un análisis estadístico bivariado.

A continuación (Figura 3 y Figura 4), se presenta el esquema metodológico para determinar la susceptibilidad y la amenaza por socavación lateral.



**Figura 3.** Flujograma metodológico para el análisis de la susceptibilidad por socavación lateral

**Fuente:** SGC 2017.



**Figura 4.** Flujoograma metodológico para el análisis de la amenaza por socavación lateral  
**Fuente:** Elaboración propia

## 5.1.Erosión marginal por eventos históricos

### 5.1.1. Fotointerpretación

En esta primera fase a través de la plataforma ArcMap, son cargados y desplegados diferentes elementos de cartografía base (vías, caminos, construcciones, drenajes, cuerpos de agua

entre otros), cartografía temática (geología, geomorfología, recursos minerales y pendientes), productos geoespaciales (DTM, mapa de sombras y ortomosaico) y anaglifs; este último analizado por medio de filtros de papel de color azul y rojo que permiten dar un aspecto tridimensional a los objetos que son observados. Una vez son desplegadas las diferentes capas de interés se procede a identificar y digitalizar rasgos geológicos, geomorfológicos y drenajes que posteriormente son corroborados y ajustados en campo según la escala de trabajo, que para el caso particular de este estudio es de 1:2.000.

Los productos geoespaciales utilizados para la fase de fotointerpretación a escala 1:2.000 y que fueron aportados por la CVC y la Universidad del Valle se encuentran consignados en la Tabla 2.

**Tabla 2.** Insumos de fotointerpretación

Insumo	Resolución
Modelo Digital del Terreno	10 cm/pixel
Modelo de Sombras	10 cm/pixel
Orto fotografía	10 cm/pixel
Cartografía base	3 cm/pixel
Geología 1:2.000	
Geomorfología 1:2.000	

**Fuente:** Elaboración propia

### 5.1.2. Trabajo de campo

En el trabajo de campo se realiza el control de las unidades litológicas y de las unidades geomorfológicas identificadas en la fase de fotointerpretación; mediante el reconocimiento de las unidades geológicas de superficie (UGS) y de los elementos geomorfológicos (EGMF) en estaciones de campo, realizadas en afloramientos naturales y/o antrópicos localizados sobre las márgenes de los ríos, vías de acceso a estos y sobre las diferentes superficies de terreno de la zona de influencia de cada una de estas corrientes hídricas.

## 5.2. Análisis dinámico fluvial (multitemporal) de los ríos Amaime y Nima en barrio Azul

En el análisis de sinuosidad o movilidad de las orillas de los ríos Amaime y Nima en el sector de Barrio Azul, corregimiento de Amaime municipio de Palmira, se utilizaron los insumos relacionados en la Tabla 3 para la realización de la digitalización multitemporal de cada uno de los cauces; de acuerdo con la disponibilidad de imágenes radar, LIDAR y fotografías aéreas, durante un periodo de tiempo comprendido entre 1981 y 2021 usando el software ARCGIS. Los años analizados fueron: 1981, 1989, 1998, 2015 y 2021.

**Tabla 3.** Insumos utilizados para el análisis multitemporal de las orillas de los ríos Amaime y Nima en barrio Azul

Insumo	Fuente	Año
Fotografías aéreas vuelo C2036 – Sobre 509 – fotos 77-78-79	CVC	1981
Fotografías aéreas vuelo C2390 – Sobre 762 – fotos 182-183-184	CVC	1989
Fotografías aéreas vuelo 407 (fall) – Faja 47C – fotos 1148 - 1149	CVC	1998
Imagen_radar_cvc_orix_palmira_pix0_95m_2015.img	CVC	2015
Imagen LIDAR tif1.tif	UV	2021
BA_Sombras.tif	UV	2021

Fuente: Elaboración propia

Para el análisis de orillas de los ríos Amaime y Nima en su recorrido por el sector de Barrio Azul, en el corregimiento de Amaime en el municipio de Palmira, se toman secciones que corresponden a los sectores donde se identifique una mayor movilidad o divagación del cauce durante el periodo de análisis. Sobre cada uno de estos se trazó la perpendicular al eje del río para el año 2021 o año de referencia y sobre esta línea; que intercepta cada uno de las orillas del río para los años analizados, con la ayuda de un software-GIS se procedió a realizar las mediciones desde el eje correspondiente al año 2021 hasta cada una de las orillas (derecha e izquierda) para los años analizados en el periodo 1981 – 2021.

Como los ejes de los ríos Amaime y Nima para el año 2021 son los ejes de referencia, se considera que tanto la orilla derecha como la orilla izquierda son positivas en cuanto a su signo.

Con relación al signo para las orillas de cada uno de los años analizados, positivo (+) o negativo (-); este está relacionado con la localización de cada orilla con relación al eje de referencia para el año 2021. Es decir, el eje del río representa el eje de un plano cartesiano (vertical u horizontal, según la dirección del río en el punto analizado) y la posición de la orilla a la derecha o izquierda de dicho eje indica si su localización es positiva o negativa respectivamente; o si se encuentra por encima (+) o por debajo del eje (-) (Figura 5 y Figura 6).

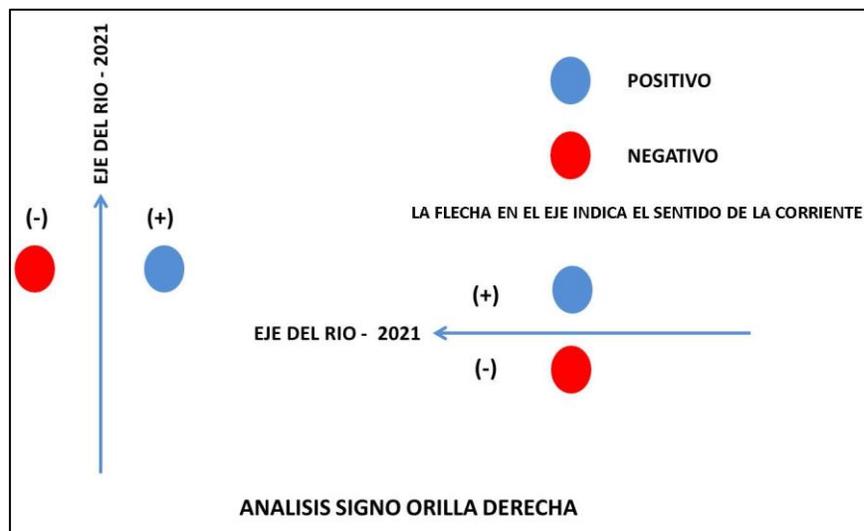
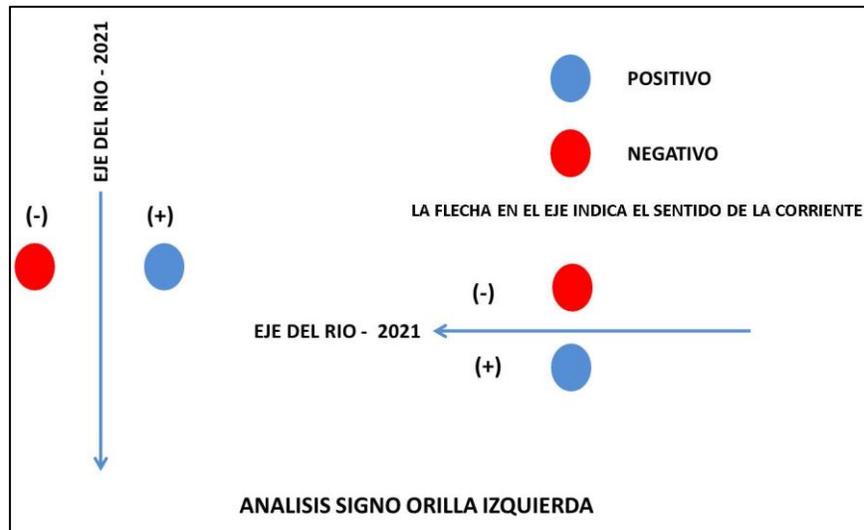


Figura 5. Determinación del signo de la orilla derecha del río, con relación a su localización con respecto al eje de referencia para el año 2021.

Fuente: Elaboración propia

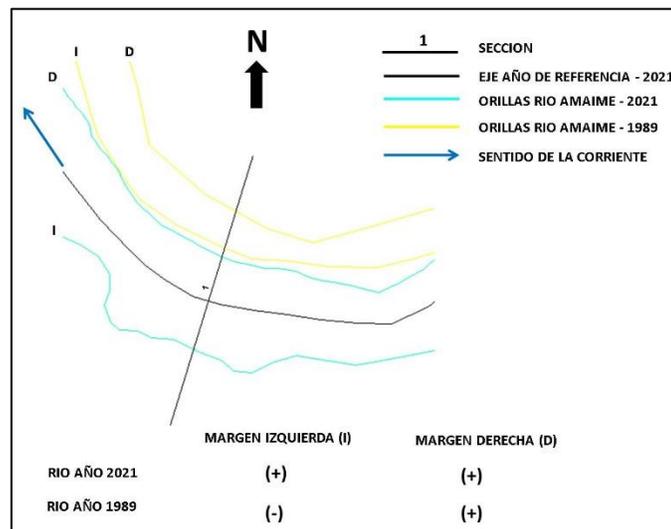


**Figura 6.** Determinación del signo de la orilla izquierda del río, con relación a su localización con respecto al eje de referencia para el año 2021.

**Fuente:** Elaboración propia

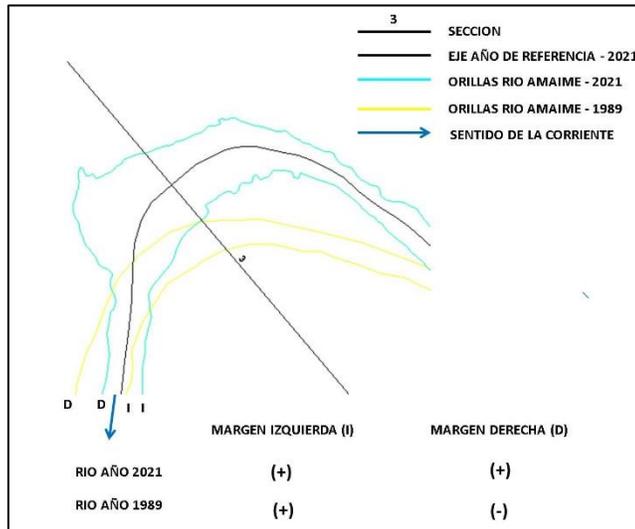
De acuerdo a la Figura 7 podemos observar como en la Sección 1, para el año 1989 la margen izquierda del río Amaime se encuentra al lado derecho del eje del río para el año de referencia y por lo tanto su signo es negativo. A su vez, la margen derecha conserva su posición con relación al eje de referencia y por lo tanto su signo es positivo.

De igual forma, teniendo como base la Figura 8; podemos observar como en la Sección 3 para el año 1989 la margen derecha del río Amaime se encuentra al lado izquierdo del eje del río para el año de referencia y por lo tanto su signo es negativo. A su vez, la margen izquierda conserva su posición con relación al eje de referencia y por lo tanto su signo es positivo.



**Figura 7.** Determinación del signo de las márgenes del río Amaime Sección 1, para el año 1989.

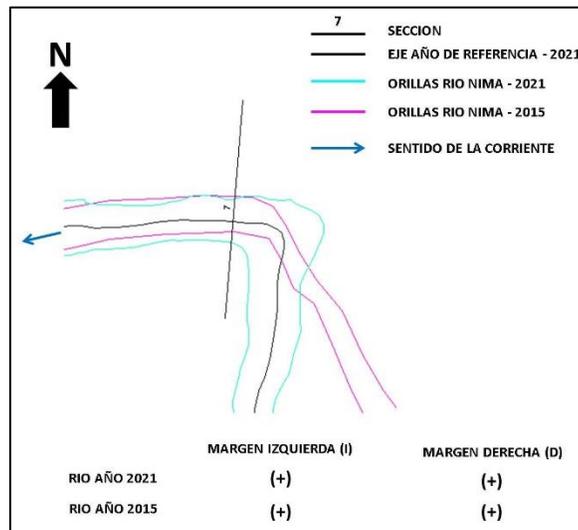
Fuente: Elaboración propia



**Figura 8.** Determinación del signo de las márgenes del río Amaime Sección 3, para el año 1989.

Fuente: Elaboración propia

Para la situación en que ambas márgenes del río para el año analizado conserven su posición con respecto al eje del año de referencia, estas tendrán signo positivo (Figura 9).

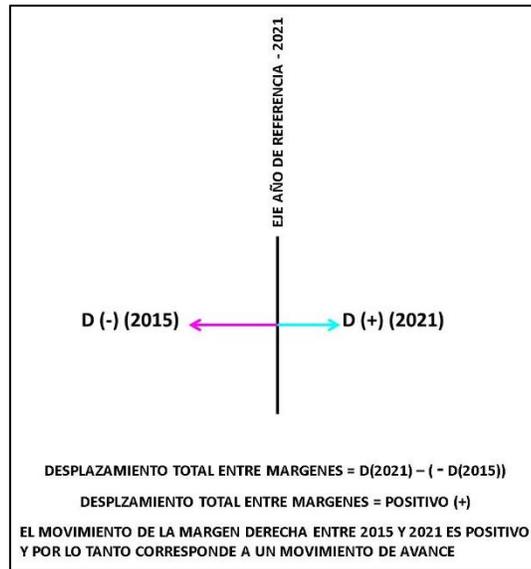


**Figura 9.** Determinación del signo de las márgenes del río Nima Sección 7, para el año 2015.

Fuente: Elaboración propia

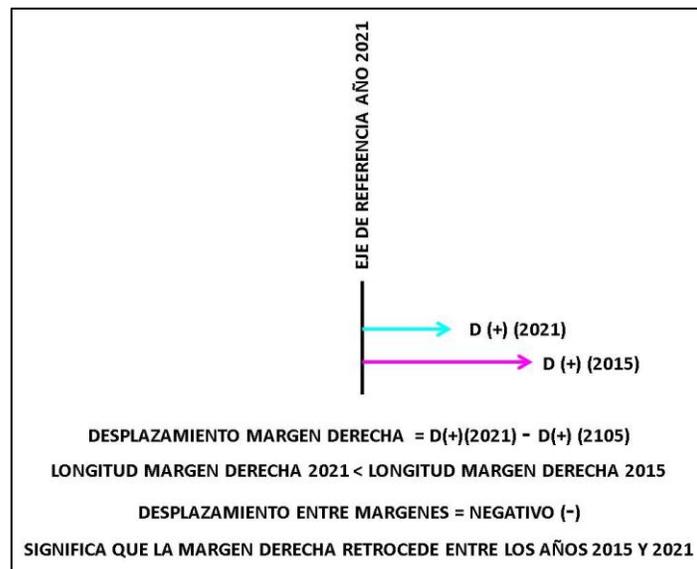
Una vez con las longitudes calculadas por el software y definido el signo para cada año analizado, se procede a considerar a estos como vectores; donde la longitud en metros representa la longitud de la flecha del vector y su posición con relación al eje el signo (+ o -).

De esta forma se procede a calcular la longitud de desplazamiento para cada una de las orillas; teniendo en cuenta la longitud entre la margen derecha o izquierda del año de referencia, siempre se le va a restar la longitud de la margen correspondiente para el año que se esté analizando (Figura 10 y Figura 11).



**Figura 10.** Cálculo del desplazamiento margen derecha río Amaime para los años 2015 y 2021 – Sección 4.

**Fuente:** Elaboración propia



**Figura 11.** Cálculo del desplazamiento margen derecha río Amaime para los años 2015 y 2021 – Sección 3.

**Fuente:** Elaboración propia

## 5.3. Susceptibilidad por socavación lateral

Para la zonificación de la susceptibilidad por socavación lateral se tiene en cuenta las condiciones que intervienen en la generación de la socavación lateral como los procesos morfodinámicos y características del suelo. La zonificación se obtiene a partir del procesamiento de las variables como lo son; la pendiente, orientación de la ladera, movimientos (socavación lateral ocurrida en el área de estudio), geomorfología, modelo digital del terreno (MDT) y unidades geológicas superficiales por medio del método Bivariado.

Los análisis estadísticos bivariados definen múltiples variables temáticas, una variable dependiente (Socavación lateral activa) y diferentes variables independientes (características intrínsecas del terreno), cuya importancia relativa se analiza de forma separada para cada una. Para realizar la evaluación de la susceptibilidad se asignan cuatro rangos de intensidad (Muy Alta, Alta, Media y Baja). Esta información es procesada mediante el SIG, arrojando varias capas temáticas correspondientes a cada variable, las cuales son sumadas dando como resultado un mapa que muestra cuales son los sectores susceptibles a sufrir socavación lateral.

### 5.3.1. Método estadístico Bivariado

El método usa el modelo estadístico Bayesiano, el cual permite evaluar la susceptibilidad a la socavación lateral mediante la sumatoria de pesos calculados de forma cuantitativa, para cada una de las variables del territorio relacionadas con la ocurrencia del fenómeno en cuestión, es decir, “en el modelamiento de la susceptibilidad, el método calcula los pesos de cada variable o factor causante de movimientos basado en la presencia o ausencia de los movimientos dentro del área de estudio” (Alvarado et al, 2012) (Figura 12), las variables fueron definidas según el análisis del grupo multidisciplinario (geólogos, ingenieros civiles, geógrafos, hidrólogos, geotecnista, entre otros).

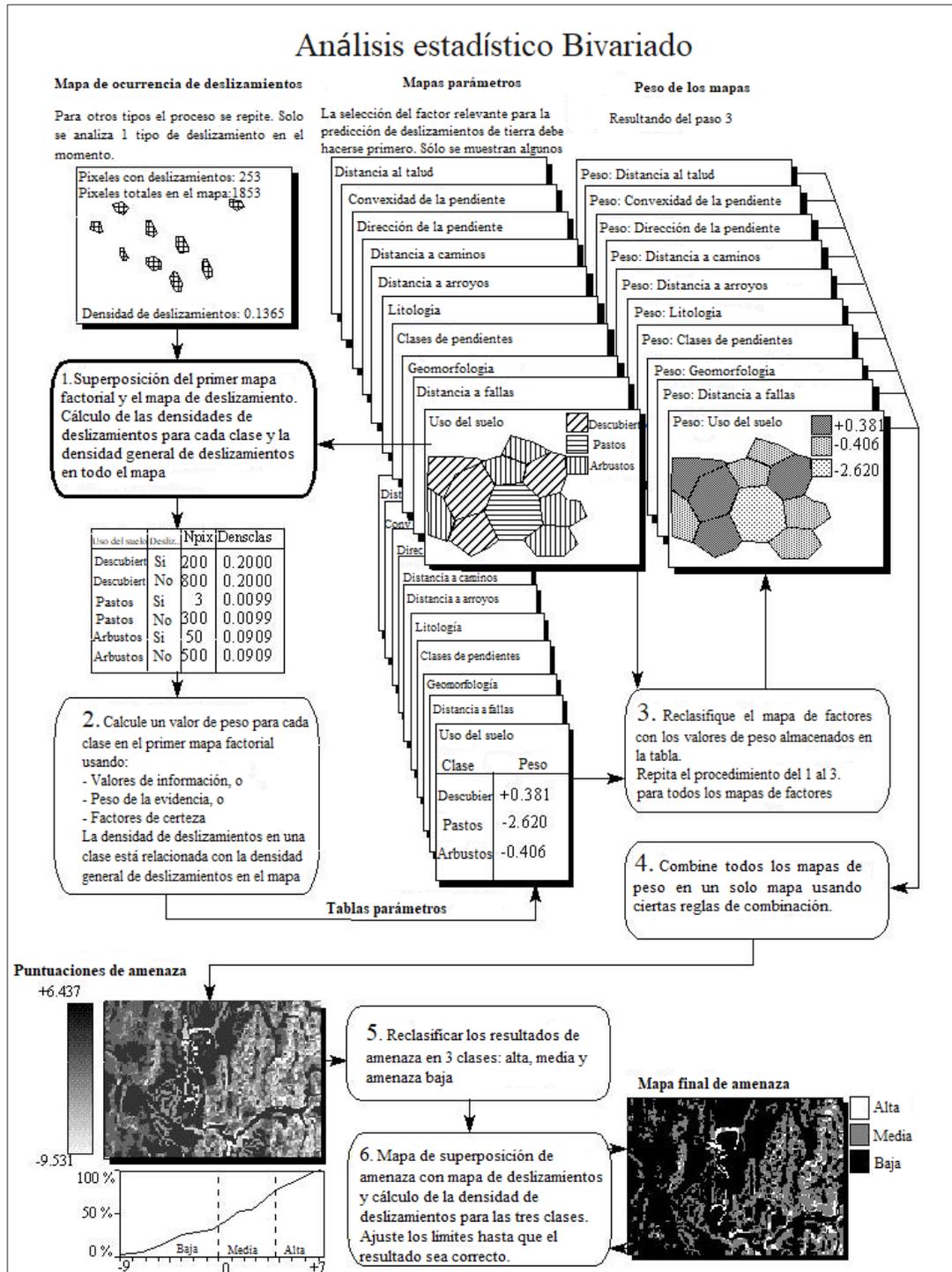


Figura 12. Diagrama de flujo simplificado del Análisis Estadístico Bivariado

Fuente: Van Western (1996)

En el método Bivariado, la probabilidad P se determina con el conocimiento de la ocurrencia de un evento D en el pasado bajo condiciones similares, y es definida como la probabilidad a priori P (D). Esta probabilidad puede ser alterada con valores B que influyen el resultado y

son obtenidos con estudios o análisis en campo, denominados factores causantes. Cuando se integran las causas a la evaluación, esta se define como una probabilidad condicional o posterior  $P(D/B)$ . La probabilidad posterior expresa la probabilidad de que un evento D ocurra bajo la presencia de un factor causante B. Ambas probabilidades son integradas en el Teorema de Bayes, expresado en la fórmula 1.

$$P\left(\frac{D}{B} = + \frac{P(D) * P\left(\frac{B}{D}\right)}{P(B)}\right) \quad (1)$$

El traslape de la socavación lateral con cada factor causante, permite calcular la relación estadística entre ellos, y evaluar la importancia de cada variable en la ocurrencia de deslizamientos antiguos, los pesos  $W^+$  y  $W^-$  son calculados para cada variable (ver formula 2 y 3). “Este cálculo se realiza mediante la aplicación de cocientes de probabilidad, que describen como probablemente un movimiento ocurrirá en caso de presencia y ausencia de factores causantes de éstos” (CVC y Universidad del Valle, 2010).

$$W_j^+ = Ln \frac{P\left(\frac{D}{Bj}\right)}{P\left(\frac{D}{Bt}\right)} \quad (2)$$

$$W_j^- = Ln \frac{P\left(\frac{D}{Bt}\right)}{P\left(\frac{D}{Bj}\right)} \quad (3)$$

Donde  $W^+$  es el cociente de probabilidad que expresa la relación en caso de presentarse los factores causantes B (de un número j de factores causantes) un movimiento puede o no ocurrir.  $W^-$  expresa la misma relación en caso de ausencia de estos factores. Es decir, los pesos dan información de la correlación positiva o negativa entre los factores causante y los lugares donde se han presentado movimientos.

Un par de pesos es calculado para cada factor causante. Las ponderaciones dependen de las relaciones espaciales entre los movimientos y los factores causantes:

Dahal et al., (2008), plantea que, para evaluar la combinación de los factores en el fenómeno estudiado, las ecuaciones 2 y 3 se reescriben en función del número de celdas del modelo digital de elevación (DEM) que se utilice.

$$W_i^+ = Ln \frac{\frac{Npix_1}{Npix_1+Npix_2}}{Npix_3 / Npix_3+Npix_4} \quad (4)$$

$$W_i^- = Ln \frac{\frac{Npix_2}{Npix_1+Npix_2}}{Npix_4 / Npix_3+Npix_4} \quad (5)$$

Donde:

**Npix1:** Número de celdas que representan la presencia al mismo tiempo de las variables y de movimientos.

**Npix2:** Número de celdas que representan la presencia de movimientos y la ausencia de las variables.

**Npix3:** Número de celdas que representan la presencia de las variables y la ausencia de movimientos.

**Npix4:** Número de celdas que representan la ausencia al mismo tiempo de las variables y de movimientos.

La diferencia entre los dos pesos se conoce como el contraste de peso,  $Wf = (Wi^+ - Wi^-)$ , el resultado, refleja la asociación espacial entre el factor causal y los deslizamientos de tierra. En el modelo de ponderación, “la combinación de factores causales asume que los factores son condicionalmente independientes entre sí con respecto a los derrumbes (Bonham-Carter, 2002; Lee y Choi, 2004). En esta investigación, utilizando estadísticas bivariadas, se asume que todos los deslizamientos de tierra en un área de estudio dada ocurren bajo la misma combinación de parámetros, y que todos los conjuntos de parámetros son independientes” (Dahal et al., 2008).

Finalmente, los pesos son asignados a las variables consideradas, cuya sobre posición georreferenciada produce el Índice de Susceptibilidad por Socavación lateral, LSI, así como un mapa de susceptibilidad que integra los aportes de cada uno de los parámetros de inestabilidad, el cual puede ser categorizado de acuerdo a la distribución estadística del LSI, expresada como:

$$LSI = \sum Wfi \quad (6)$$

Una vez se obtiene el resultado del LSI, se procede a realizar un análisis de frecuencia para determinar las categorías de susceptibilidad (alta, media y baja).

### Curva de éxito y validación

La curva de éxito mide la bondad de ajuste de la función de susceptibilidad a la socavación lateral inventariada y para su construcción se deben ordenar los valores de la LSI en orden descendente y dividirlos en percentiles de 100 categorías (Dahal et al., 2008). Cada grupo de 1% se deberá cruzar con la variable de agrupamiento para determinar con cuantos pixeles de la variable tiene relación.

Para la elaboración de la curva de éxito se trazan en el eje X los grupos percentiles del LSI de menor a mayor cada 1%, de forma que a la izquierda se ubique el percentil 1 (susceptible), a la derecha el percentil 100 (no susceptible) y en el eje Y se ubican los valores porcentuales cada 1% de la socavación lateral correspondientes con el percentil del LSI (Blahut et al., 2010). En este caso se debe usar la muestra de entrenamiento del inventario de procesos. Esta curva se construye en términos del área total de la zona de estudio y el área total de la socavación lateral considerada (Figura 13).

Una vez que la curva este construida se deberá evaluar el área bajo la curva (ABC), para establecer la calidad de ajuste de los datos. Cuanto más pronunciada sea la parte inicial de la curva y mayor el ABC, mejor será la capacidad de la función para describir la distribución de la socavación lateral. Un porcentaje aceptable de ajuste debe ser mayor a 70%.

En caso de contar con muestra de validación, se puede construir una curva siguiendo los pasos descritos anteriormente y superponerla con la curva de éxito para analizar el comportamiento de la función, tanto para describir la ocurrencia de movimientos existentes como para el pronóstico de nuevos procesos.

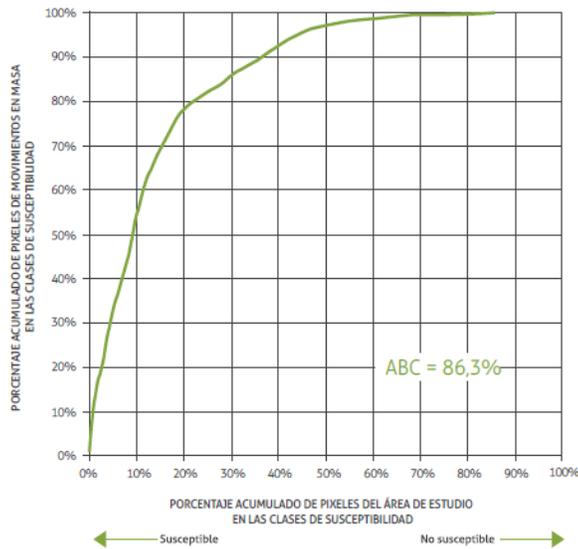


Figura 13. Ejemplo de una curva de éxito

Fuente: Tomado SGC 2017

### 5.3.2. Leyenda del mapa de susceptibilidad por socavación lateral

La leyenda del mapa de susceptibilidad debe incluir información relacionada con la socavación lateral en la zona de estudio, como las características o factores condicionantes que determinan la mayor o menor posibilidad de ocurrencia en las categorías de susceptibilidad.

**Susceptibilidad Muy Alta:** corresponde a la socavación lateral activa obtenida en el inventario de procesos morfodinámicos.

**Susceptibilidad Alta y Media:** en estas categorías debe incluirse la descripción de la socavación que puede ocurrir y una descripción breve de los factores geoambientales que condicionan esta posibilidad, haciendo énfasis en la importancia relativa de cada factor de acuerdo con las hipótesis planteadas y los resultados obtenidos en el análisis de la socavación lateral.

**Susceptibilidad Baja:** descripción de las características geoambientales que condicionan la ausencia o muy baja posibilidad de ocurrencia de la socavación lateral. Esta descripción también debe estar basada en la importancia relativa de cada factor de acuerdo con las hipótesis planteadas y los resultados de los análisis que se hayan realizado.

## 5.4.Exploración geotécnica del subsuelo

Para realizar la caracterización geotécnica y lograr los objetivos anteriormente planteados, se definió un programa de exploración del subsuelo estableciendo los sitios de exploración, tipo y profundidad aproximada. La fase de exploración geotécnica se enfocó principalmente hacia la definición de los espesores e identificación de los diferentes materiales del subsuelo en la zona del estudio, además de reportar los niveles freáticos en cada una de las perforaciones realizadas. Para ello se realizaron perforaciones con muestreo continuo inalterado, apiques superficiales con toma de muestras en bloque y líneas de refracción sísmica.

En paralelo a la exploración del suelo y posterior a la finalización de la primera perforación, las muestras obtenidas, fueron llevadas y ensayadas en el laboratorio con el fin de estimar sus propiedades desde el punto de vista físico y mecánico. Los ensayos incluyeron clasificación, propiedades básicas y geomecánicas (resistencia).

Los registros de perforación y ensayos de laboratorio (parámetros de resistencia) nos permiten realizar análisis de estabilidad y determinar la falla geotécnica y la socavación por hidráulica fluvial.

### 5.4.1. Perforación SPT

A continuación, se presenta unas generalidades con respecto al procedimiento que se sigue para la realización de la perforación SPT y recuperación de muestras.

1. Ubicación o identificación del sitio donde se va a realizar la perforación.
2. Se realiza el banqueo o la adecuación del terreno donde se va a realizar el ensayo para instalar el equipo.
3. Se realiza una perforación inicial con la pala-draga a una profundidad de aproximadamente 0.6 m (cuando aplique, ver punto 5).
4. En este punto se verifica las condiciones iniciales del material subyacente, en el caso de tratarse de roca, grava ó conglomerados, se procede a realizar un apique manual buscado profundidades de más 1,5 m para verificar las características de los estratos; no obstante, en caso de encontrarse roca ó un material más allá de los alcances de los equipos de perforación, se acordará con el cliente la aplicación de un nuevo método de perforación.

5. Se ensambla los elementos para la perforación, entre los cuales está: Muestreador de penetrómetro de “caña partida” ó tubo Shelby, tubería de perforación, martillo, yunque, trípode, uniones, motoreductor, etc.
6. Se procede a enganchar la manila que viene del moto-reductor al martillo, se da inicio al ensayo de S.P.T. el cual consiste en levantar el martillo y dejarlo caer libremente sobre el cabezote desde una altura de 0.75 m. Se repite este último procedimiento tantas veces sea necesario para penetrar 18” del muestreador ó hasta que se presente alguna de las condiciones de rechazo.
7. Se procede a perforar hasta la profundidad establecida para la toma de muestras. En todo el proceso de perforación se llevan los registros de número de golpes, profundidades, temperatura ambiente y datos climáticos.
8. Se extrae el muestreador con cada profundidad de avance, se extrae la muestra se identifica sondeo (Número de Sondeo, profundidad, Número de golpes, caracterización in situ del suelo extraído, y No. de muestra), se segrega adecuadamente para posterior análisis en laboratorio.
9. Se introduce nuevamente la tubería de perforación y se baja el sondeo a la profundidad indicada para la siguiente toma de muestras y se repiten los pasos del 4 al 7 hasta alcanzar la profundidad total del sondeo ó alguna de las condiciones de rechazo.
10. Cuando se hayan terminado los sondeos se procede a transportar las muestras al laboratorio para la realización de los ensayos establecidos para el estudio geotécnico.

#### Equipo empleado

El sistema de exploración empleado consiste en realizar un sondeo por medio de percusión simple prueba SPT y extracción de muestras, cuando las condiciones del suelo lo permitan. Esta percusión se realiza hasta el rechazo.

El equipo básico empleado está constituido por:

- |  |  |
|--|--|
|  Trípode de perforación   |  Muestreador de tubo partido          |
|  Motor de 10 a 15 HP      |  Madril de rotación                   |
|  Pesa de 140 lb (63 5 kg) |  Motoreductor                         |
|  Pesa de 70 lb (31 75 kg) |  Equipo y herramienta complementaria. |
|  Tubo rosca NQ ø          |  |

En la siguiente figura se observa una vista general del montaje del equipo de perforación SPT.



Figura 14. Montaje Equipo de Perforación SPT

En la siguiente figura se muestra un esquema de la operación del equipo

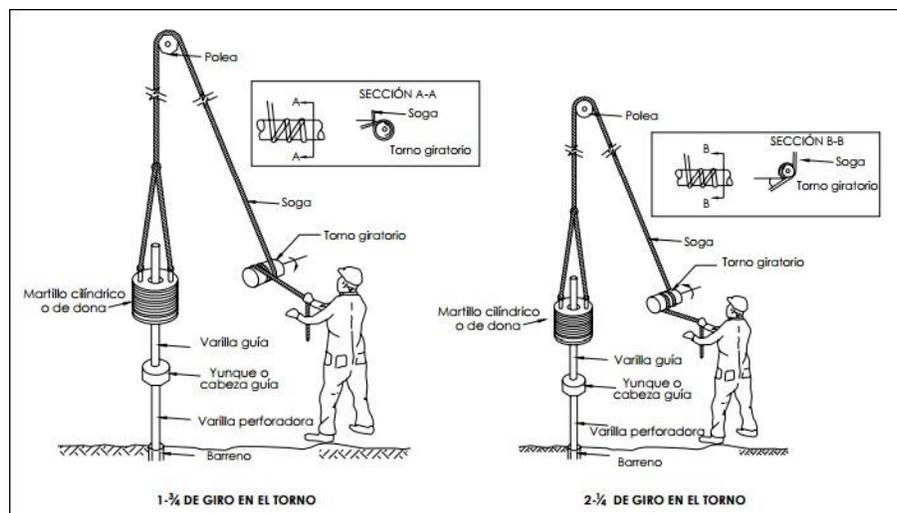


Figura 15. Esquema de Operación para Penetración por Percusión y Prueba SPT

La información correspondiente a la prueba de Penetración Estandar se obtiene de los golpes aplicados a intervalos de 15 cm en la penetración de la tubería, posteriormente se procede a

realizar correcciones pertinentes para obtener parámetros que son índice de la capacidad portante del suelo, los cuales son de vital importancia cuando no se puede recuperar probetas cilíndricas de suelo, extraídas por el muestreador.

Para la extracción de muestras, tipo probetas de suelos cilíndricas se emplea un Penetrómetro Estándar con Muestreador bipartido (“caña partida ó cuchara partida”) que cumple con la norma ASTM D1586-99 y es empleado para el avance en profundidad, reconocimiento del perfil y para recuperación de muestras para aplicar el ensayo de compresión confinada y hallar valores correspondientes a la capacidad portante del suelo subyacente.

En la siguiente figura se identifican las principales características geométricas del muestreador de caña partida y en la Fotografía siguiente se observa una imagen del mismo

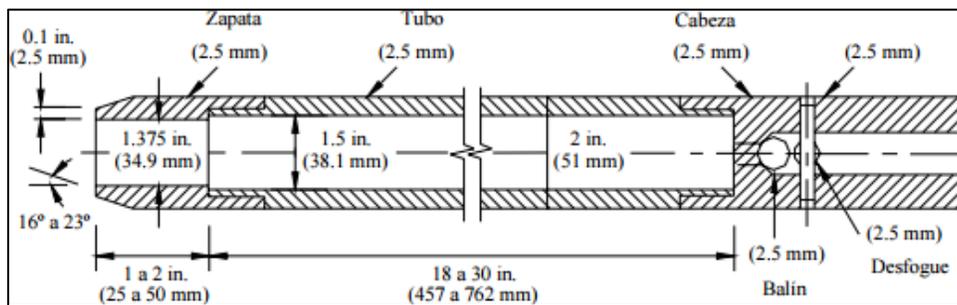


Figura 16. Características del Muestreador Empleado



Figura 17. Muestreador de Caña Partida.

### 5.4.2. Apique

La metodología empleada se trata de simplemente realizar una excavación perimetral hasta lograr perfilar el bloque requerido, lo suficientemente representativo para realizar todos los ensayos planificados y posteriormente cortar (desprender de su base), embalar y trasladar a laboratorio.

### 5.4.3. Líneas Sísmicas

Este método se basa en determinar los tiempos de recorrido de las ondas, tanto de compresión (ondas P) como de corte (ondas S), desde un punto conocido (fuente sísmica) hasta una serie de receptores (geófonos) situados a lo largo de una línea de adquisición. Conociendo el tiempo de recorrido que las ondas emplean en recorrer la distancia que separa la fuente y los receptores, se puede determinar la velocidad de propagación del medio. A partir de los valores de velocidad se puede obtener un modelo del subsuelo compuesto por capas de velocidad constante y espesor variable. Este método es muy útil para determinar, de manera indirecta, la estratigrafía del subsuelo.

El proceso de toma de datos en campo se realizó con el sismógrafo de 24 canales RAS-24, con arreglos de 24 canales, los cuales se separaron cada 5.0 m, cubriendo en total una longitud de exploración de 120 m por línea.



Figura 18 Sismógrafo Seistronix RAS-24.

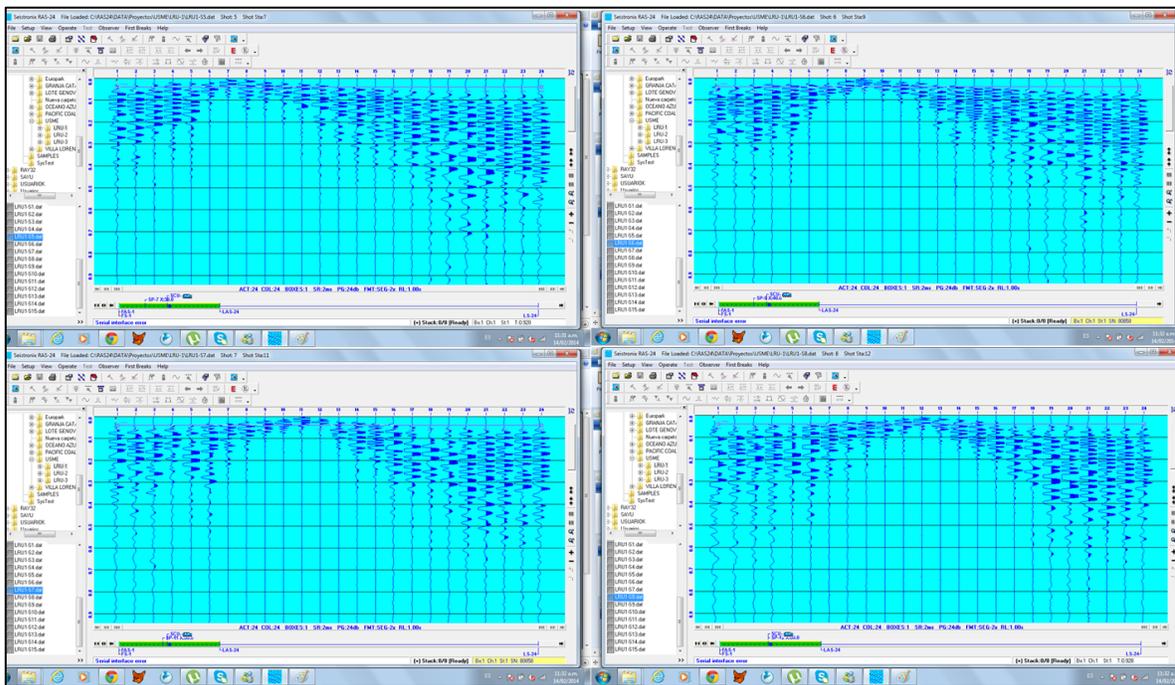


Figura 19 Geófonos de adquisición de datos.

El método de adquisición de datos depende de un impacto en superficie, realizado con un martillo de 30 lb, el cual es golpeado contra una placa de acero; seguidamente, mediante un sensor (Hammerswitch), manda un impulso electromagnético al equipo, el cual activa el registro de señales vibratorias de cada uno de los geófonos a profundidad durante un tiempo

de lectura definido al inicio de las mediciones. El sistema cuenta con una unidad de control, geófonos verticales y horizontales (ondas P y ondas S respectivamente), un martillo, el Hammerswitch y algunos otros accesorios necesarios para el buen funcionamiento del sistema.

Para el almacenamiento de los datos, el equipo utiliza el software RAS-24 (propio del sismógrafo Seistronix RAS-24), donde los datos de entrada de configuración son el Sample Rate, el número de golpes, la ganancia, el tiempo de lectura y la sensibilidad del Trigger, además de las posiciones del primer geófono del arreglo y el punto de golpeo. En la siguiente figura se presenta un mosaico de los datos registrados por medio del software RAS-24, durante la medición de las ondas S para la línea LS-1.

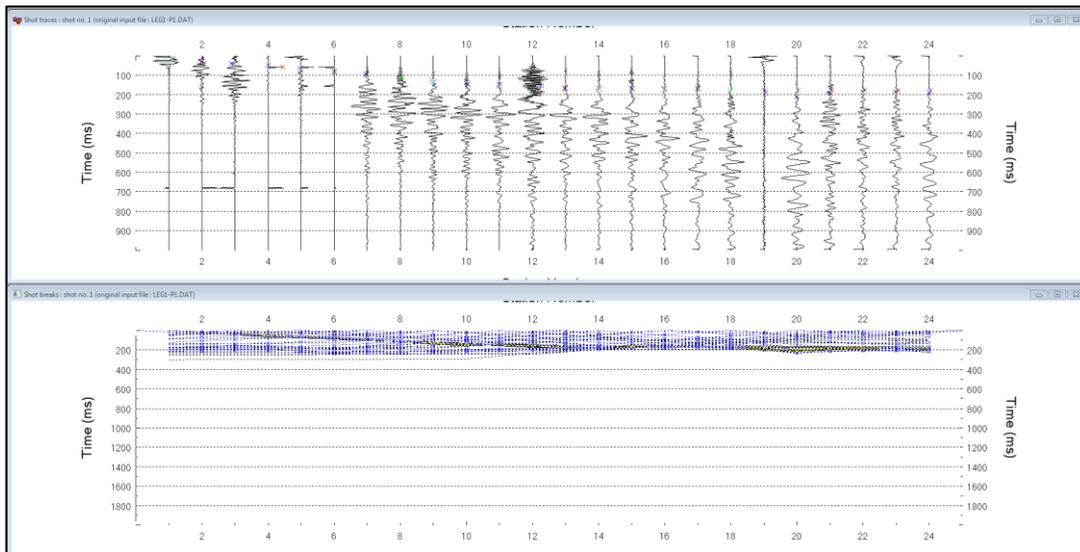


**Figura 20** Ilustración típica de la captura de datos en campo mediante el software RAS-24 correspondiente a la ejecución de la línea de refracción LS-1 para ondas S

Posterior a la adquisición de datos se hace uso del software Rayfract, el cual toma los datos recolectados por el equipo RAS-24, identifica los timebreaks, es decir, el tiempo que toma la onda de impacto en llegar a cada uno de los geófonos del arreglo, y a partir de interpolaciones genera tomografías del suelo, con las que, posterior a un análisis de velocidades, facilitan la determinación de espesores de los diversos estratos del suelo.

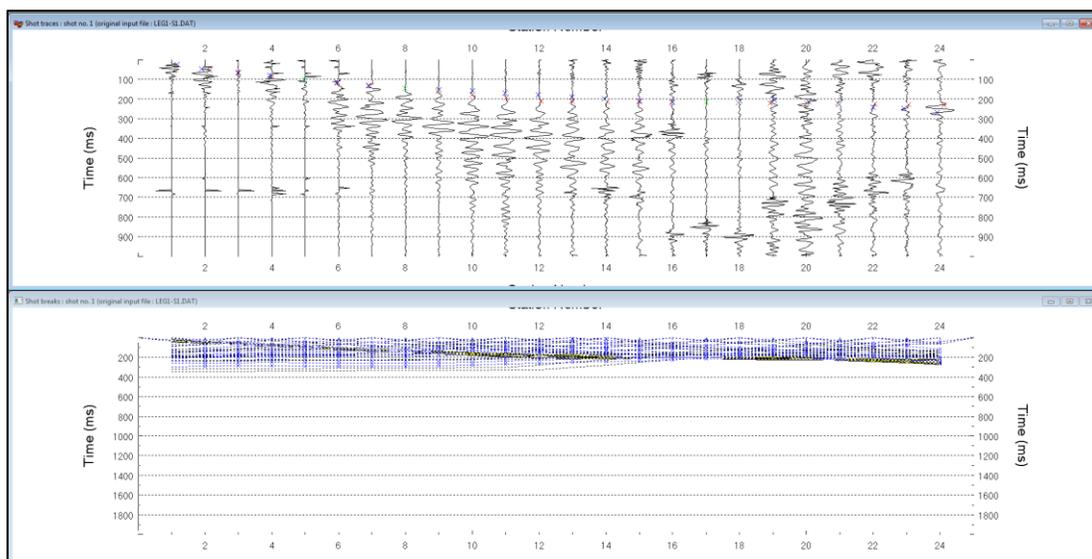
Mediante el software Rayfract, se identifican los primeros puntos de llegada de la onda a cada uno de los geófonos para cada golpe, dichos puntos de llegada son utilizados para un análisis matemático de cada una de las líneas, mediante el uso de la metodología propuesta por el Explosive Excavation Research Laboratory Livermore de California, en el documento “Seismic Refraction Exploration for Engineering Site Investigations”. En la siguiente figura se presenta

una imagen del análisis realizado mediante el software Rayfract para la línea LS-1 para las Ondas P.



**Figura 21** Ilustración típica del procesamiento de datos mediante el software Rayfract correspondiente a la línea de refracción LS-1 para ondas P.

En la siguiente figura se presenta una imagen del análisis realizado mediante el software Rayfract para la línea LS-1 para las Ondas S.



**Figura 22** Ilustración típica del procesamiento de datos mediante el software Rayfract correspondiente a la línea de refracción LS-1 para ondas S.

Se observa en las figuras anteriores como la onda de impacto en superficie, generada en diferentes puntos del arreglo, se dispersa a diferentes velocidades de onda a lo largo de los

estratos del suelo, y cada uno de los geófonos recibe su señal entrando en resonancia con la amplitud y frecuencia de dichas ondas.

A partir del análisis se determinan las diferentes pendientes que indican finalmente las velocidades características de cada uno de los estratos. Se observa que a medida que se aumenta la distancia desde el punto de golpeo, se presentan cambios de pendientes menores, lo que se traduce en mayores velocidades a profundidad, ya que se debe recordar que a medida que la onda se aleja del punto de golpeo, los geófonos reciben la señal a mayor profundidad.

#### 5.4.4. Ensayos de laboratorio

El plan de ensayos de laboratorio tuvo por objeto la caracterización geomecánica de los materiales que componen el subsuelo bajo el área de estudio, para lo cual se llevaron a cabo ensayos de clasificación y de resistencia. Dentro de los ensayos de clasificación de suelos se realizaron humedad natural, límites de consistencia, granulometría y peso unitario. Por otro lado, los ensayos de resistencia en suelos corresponden a ensayos de compresión confinada y corte directo consolidado drenado.

A continuación, se presenta la norma que rige cada ensayo de laboratorio.

**Tabla 4.** Norma para ensayos

Ensayo	Norma
Humedad natural	ASTM D2216
Granulometría por tamizado incluye lavado sobre tamiz N°200	ASTM C-136_01
Granulometría de partículas finas por hidrómetro	ASTM D 422
Límites d Atterberg incluye límite líquido y límite plástico	ASTM D 4318
Peso unitario	ASTM D2922
Gravedad específica de los sólidos	ASTM D854
Compresión confinada para suelos finogranulares	ASTM D2166
Corte directo consolidado drenado CD tres puntos	ASTM D3080
Consolidación unidimensional con carga y descarga	ASTM D2435

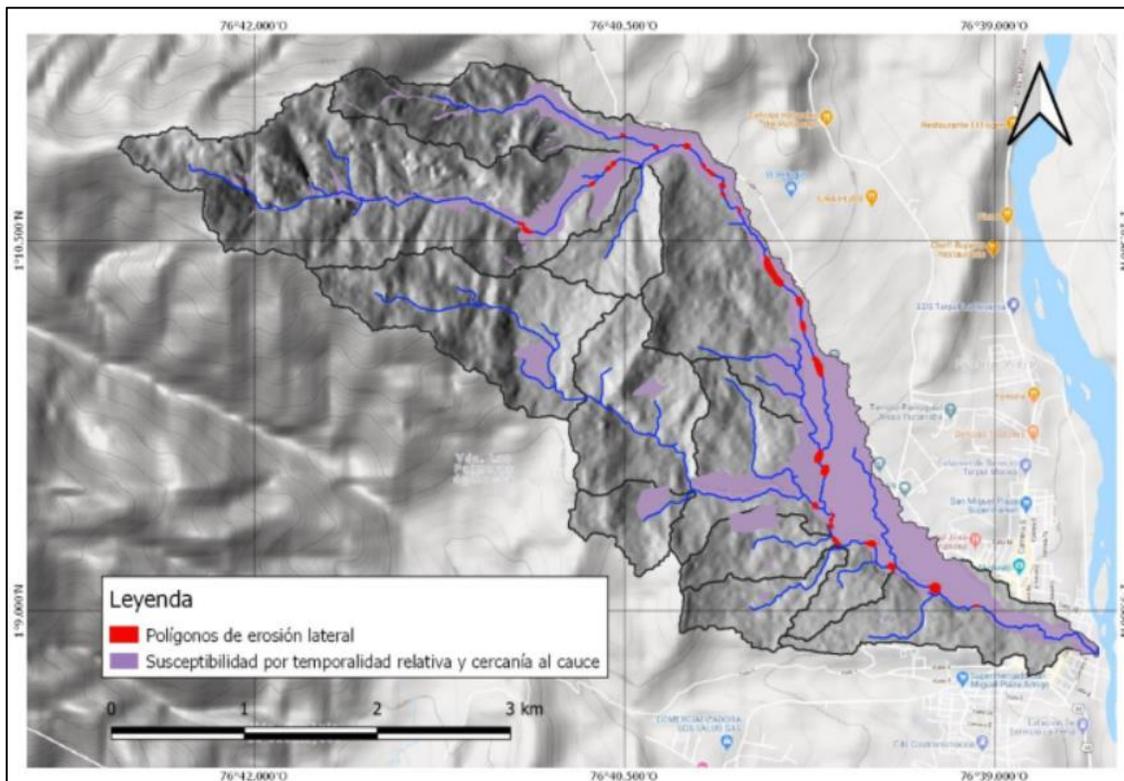
Fuente: elaboración propia

### 5.5. Socavación lateral de cauces por hidráulica fluvial

Una de las principales fuentes de sólidos en una corriente hídrica puede tener origen en el proceso de erosión del material de las bancas del cauce por acción del flujo, lo cual, según Zhao, Luo, Li, Dan y Luo (2011), puede considerarse como uno de los principales factores que ocasionan inestabilidad en los taludes debido a la socavación en la base de la ladera. No sólo la hidráulica del canal influye en la estabilidad del talud, sino también las propiedades del material que conforman las bancas del canal (Chow et al., 1994). Por ello, algunos estudios abordan la predicción de velocidades de socavación en las paredes del cauce como resultado de los procesos de la hidráulica fluvial y análisis de estabilidad de taludes que actúan conjuntamente (Darby et al., 2007).

### 5.5.1. Definición de los polígonos de erosión a lo largo del cauce principal

La aplicación de la metodología de socavación lateral inicia con la definición de los polígonos de erosión fluvial a lo largo del cauce que puedan llegar a contribuir con material sólido al flujo. Dichos sectores se escogen de las geoformas indicativas y a partir de la superposición de los rasgos geomorfológicos donde se identifican zonas de erosión lateral fluvial en campo, donde se evidencia disponibilidad de material para movilizarse a lo largo del cauce, se establecen los polígonos de erosión fluvial a los cuales se les realizará el análisis de estabilidad de laderas y de bloque en voladizo por acción de la socavación lateral fluvial (SGC y PUJ, 2021). En la Figura 23 se presenta el esquema de los polígonos de erosión lateral a lo largo del cauce.



**Figura 23.** Esquema de polígonos de erosión fluvial a lo largo del cauce principal  
Fuente: SGC y PUJ (2021)

### 5.5.2. Definición de parámetros geométricos, características y propiedades de los materiales

La definición de las características y propiedades de los materiales en los polígonos de erosión fluvial, como son la granulometría, el ángulo de fricción del material, la cohesión y el peso unitario, son necesarios para el desarrollo de la metodología de inestabilidad de taludes debido a socavación lateral fluvial. La distribución granulométrica puede ser obtenida en campo a partir de la estimación de las fracciones gruesa y fina, donde se identifican tamaños promedios

y máximos, y específicamente, el diámetro D50. La definición de los parámetros geotécnicos se realiza a partir de ensayos de campo como sondeos geofísicos o, incluso, a partir de la extracción de muestras del material para la ejecución de ensayos de clasificación y resistencia en laboratorio. Sin embargo, en caso de no poder realizar el procedimiento anterior, se puede estimar el ángulo de fricción, la cohesión y el peso unitario del material a partir de valores de referencia o ecuaciones de correlaciones publicadas en la literatura y comúnmente aceptadas por la comunidad geotécnica.

Algunos ejemplos de valores de referencia y correlaciones pueden encontrarse en Command (1986), Hoek, Evert y Bray (1981), Hough (1969), Sabatini, Bachus y Mayne (2002), Schneider y Zettler (2002), Smoltczyk (2003), Loehr y Lutenegger (2016), Alan y Rosenblad (2016), Brent y Boeckmann (2016) y Andrew y Brinckerhoff (2016).

Para la ejecución de este proyecto los parámetros de ángulo de fricción, distribución granulométrica, peso unitario y demás parámetros geotécnicos se realizaron perforaciones SPT, apiques y líneas sísmicas (ver Anexo 2).

Habiéndose definido el tramo (mediante la capa de rasgos), se elaboran perfiles transversales cada 50 metros lineales, obteniendo el ángulo de inclinación de la banca del cauce ( $\theta$ ) (Figura 24).

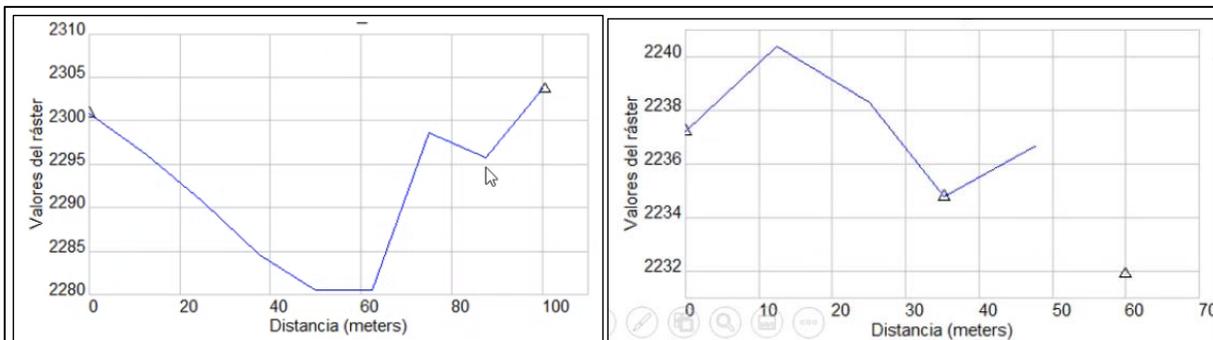


Figura 24. a) Lateral Izquierda; b) Lateral Derecha.

Fuente: SGC y Universidad Javeriana (2021).

### 5.5.3. Estimación de velocidad crítica en los polígonos de erosión

Para el cálculo de la velocidad crítica en cada uno de los polígonos de erosión, se igualan las ecuaciones (2)(1) de cálculo del esfuerzo crítico y del esfuerzo aplicado por el flujo.

- Se calcula el esfuerzo de corte crítico ( $\tau_c$ ) el cual está en función de las propiedades de suelo y de la geometría de la banca.
- Se iguala con la definición de ( $\tau_b$ ), en el cual para calcular el coeficiente de fricción del flujo se emplea el valor más elevado de las alturas del flujo durante el tiempo de simulación, como se indica en las ecuaciones (2) y (1):

$$\tau_b = \frac{1}{2} \rho C_f (\sqrt{u^2 + v^2})^2 \quad (2)$$

$$C_f = \frac{2 * g * n^2}{h^{1/3}} \quad (1)$$

Fuente: SGC y PUJ (2021).

Donde  $\tau_b$  es el esfuerzo cortante aplicado (Pa),  $\rho$  es la densidad del flujo ( $\text{kg/m}^3$ ),  $u$  y  $v$  son las velocidades del fluido en las direcciones X y Y respectivamente (m/s),  $C_f$  es el coeficiente de fricción,  $g$  es la gravedad ( $\text{m/s}^2$ ),  $n$  es el coeficiente de Manning,  $h$  es la profundidad de la lámina de agua, como se indica en las ecuaciones (3) y (4):

$$\frac{\tau_c}{r_w(G_s - 1) * D_{50}} = 0.048 * \tan(\varphi) \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \theta}{\sin^2 \varphi}} \text{ si } (\varphi > \theta) \quad (3)$$

$$\tau_c = 0,1 + 0,1779(FF) + 0,0028(FF^2) - 232\varepsilon - 5(FF^2) \text{ si } (\varphi \leq \theta) \quad (4)$$

Fuente: SGC y PUJ (2021).

Donde  $\tau_c$  es el esfuerzo de corte crítico (Pa),  $r_w$  es el peso unitario del agua ( $\text{N/m}^3$ ),  $G_s$  es la gravedad específica de los sólidos,  $D_{50}$  es el promedio del tamaño de grano del material de la banca,  $\varphi$  es el ángulo de fricción del material,  $\theta$  es el ángulo de inclinación promedio de la banca del cauce.

#### 5.5.4. Cálculo de la tasa de erosión y el tiempo de aplicación del esfuerzo cortante en las paredes del cauce

La tasa de erosión en las paredes del cauce se determina como se indica en la ecuación (5):

$$\varepsilon = K_d(\tau_b - \tau_c) \quad (5)$$

Donde:

$\varepsilon$ : Tasa de erosión de la banca por unidad de tiempo y unidad de área de banca (m/s),

$K_d$ : Coeficiente de erodabilidad

El coeficiente  $K_d$  presenta varias limitaciones debido a que no hay un método teórico o empírico que determine el coeficiente de erodabilidad para suelos no cohesivos, por lo cual, de manera empírica, se desarrolló una expresión para suelos cohesivos y no cohesivos, como se indica en la ecuación (6):

(6)

$$K_d = \frac{2 \times 10^{-7}}{\sqrt{\tau_c}}$$

Fuente: SGC y PUJ (2021).

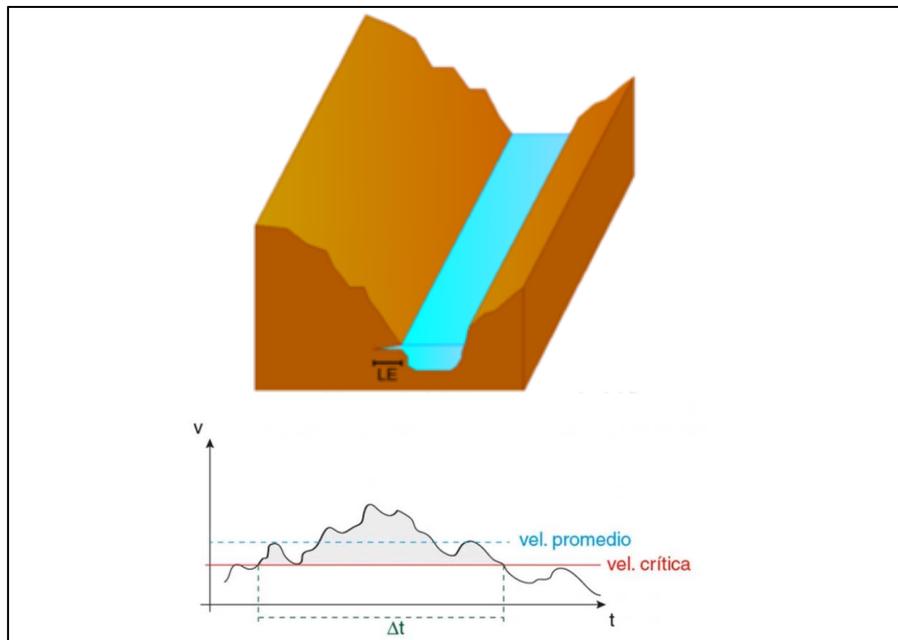
Finalmente, se calcula la longitud de erosión fluvial ( $LE > 0$  presenta socavación lateral) (Figura 25) en la banca en cada uno de los polígonos de erosión definidos con anterioridad a lo largo del cauce, considerando el intervalo de tiempo en el que actúa el promedio de la magnitud de la velocidad superior a la velocidad crítica durante la simulación fluidodinámica, como se indica en ecuación (7):

$$LE = \varepsilon \Delta t \quad (7)$$

Donde:

LE: Longitud de erosión de la banca (m)

$\Delta t$ : Intervalo de tiempo en el que se presenta el promedio de la magnitud de velocidad superior a la velocidad crítica



**Figura 25.** Longitud de Erosión de la banca por acción del flujo

Fuente: SGC y PUJ, (2021).

## 5.6. Análisis de estabilidad de Taludes

Para la estimación de socavación lateral a escala de detalle se emplea el análisis de estabilidad de taludes por equilibrio límite y por Cantiléver (bloque colgante) en las bancas de los polígonos definidos a lo largo del cauce principal donde se haya presentado una longitud de erosión LE (Figura 26), este análisis involucra parámetros de resistencia del material y

condiciones hidrometeorológicas, durante este análisis no se consideran procesos de infiltración de la lluvia ni la variación del factor de seguridad en el tiempo.

El nivel freático (NF) será variable y se establecerá a la profundidad encontrada en la exploración (parcialmente saturado) y en la superficie del suelo (saturado), para cada polígono de erosión se estima el factor de seguridad de ladera por medio de equilibrio límite. Si el análisis de estabilidad genera superficies con factores de seguridad menores a 1, se considera que el talud falla.

Según Samadi, Davoudi y AmiriTokaldany (2011), la erosión causada por las riberas de las fuentes de agua es un proceso previo para la formación de bloques colgantes en las orillas de los cauces. Por consiguiente, se propone el análisis de estabilidad por cantilever, como se indica en (8).

$$FS = \frac{L * c}{\gamma * A} \quad (8)$$

Fuente: SGC y PUJ (2021).

Donde:

**L:** Longitud vertical del bloque colgante

**c:** Cohesión

**$\gamma$ :** Peso unitario

**A:** Área de la sección transversal

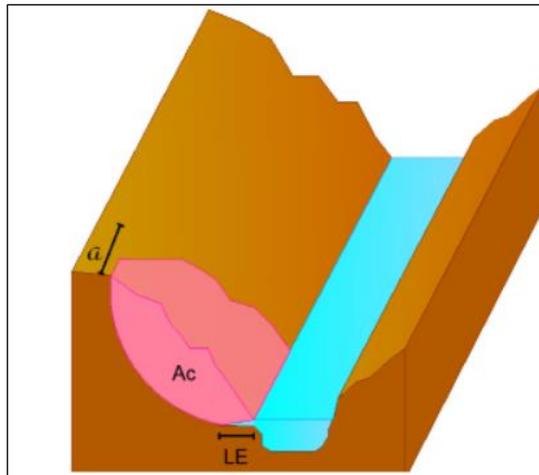


Figura 26. Análisis de estabilidad de laderas

Fuente: SGC y PUJ, (2021).

## 5.7. Amenaza por socavación lateral (consolidado)

De acuerdo con la metodología utilizada para determinar la historicidad de eventos, multitemporal, susceptibilidad por SL, socavación por hidráulica fluvial y colapso de la banca

por falla geotécnica, se propone tomar como base para la zonificación de susceptibilidad por socavación lateral. Adicionalmente se propone el siguiente procedimiento en herramientas SIG:

1. Superponer las zonas de susceptibilidad por socavación lateral (Figura 68) y multitemporal (Figura 59).
2. Aplicar la matriz presentada en la Tabla 5.
3. Reclasificar de acuerdo con las categorías de la matriz.
4. Superponer las zonas de historicidad de eventos (Figura 28) y repetir los pasos 2 y 3.
5. Superponer las zonas de socavación por hidráulica fluvial (figura 78) y repetir los pasos 2 y 3.
6. Superponer las zonas de colapso por falla geotécnica (Figura 94) y repetir los pasos 2 y 3.

**Tabla 5.** Matriz de comparación entre zonas de susceptibilidad y otras variables

		Susceptibilidad por socavación lateral		
		Baja	Media	Alta
Análisis multitemporal	Baja	Baja	Media	Alta
	Media	Media	Media	Alta
	Alta	Alta	Alta	Alta
		Resultado de Susceptibilidad y Multitemporal		
		Baja	Media	Alta
Socavación lateral por historicidad de eventos	Baja	Baja	Media	Alta
	Media	Media	Media	Alta
	Alta	Alta	Alta	Alta
		Resultado de Susceptibilidad, Multitemporal e Historicidad		
		Baja	Media	Alta
Socavación lateral por hidráulica fluvial	Baja	Baja	Media	Alta
	Media	Media	Media	Alta
	Alta	Alta	Alta	Alta
		Resultado de Susceptibilidad, Multitemporal, Historicidad e Hidráulica fluvial		
		Baja	Media	Alta
Socavación lateral por falla geotécnica	Baja	Baja	Media	Alta
	Media	Media	Media	Alta
	Alta	Alta	Alta	Alta

Fuente: Elaboración propia

## 6. RESULTADOS

En este capítulo vamos a abordar los resultados de las modelaciones de la susceptibilidad y la amenaza por socavación lateral.

### 6.1. Erosión marginal por eventos históricos

Se realizaron un total de 37 estaciones de campo, donde se tomó información de localización espacial con GPS y se realizó la descripción de las unidades litológicas y geomorfológicas. En cada estación de campo se realizó la toma de un registro fotográfico de las características litológicas y/o geomorfológicas encontradas. Las estaciones de campo se realizaron de acuerdo con las condiciones del terreno y de logística, teniendo en cuenta la accesibilidad a algunos predios.

El reconocimiento de campo se realizó en un periodo de tiempo de tres (3) días repartidos en una (1) campaña de campo (Figura 27).

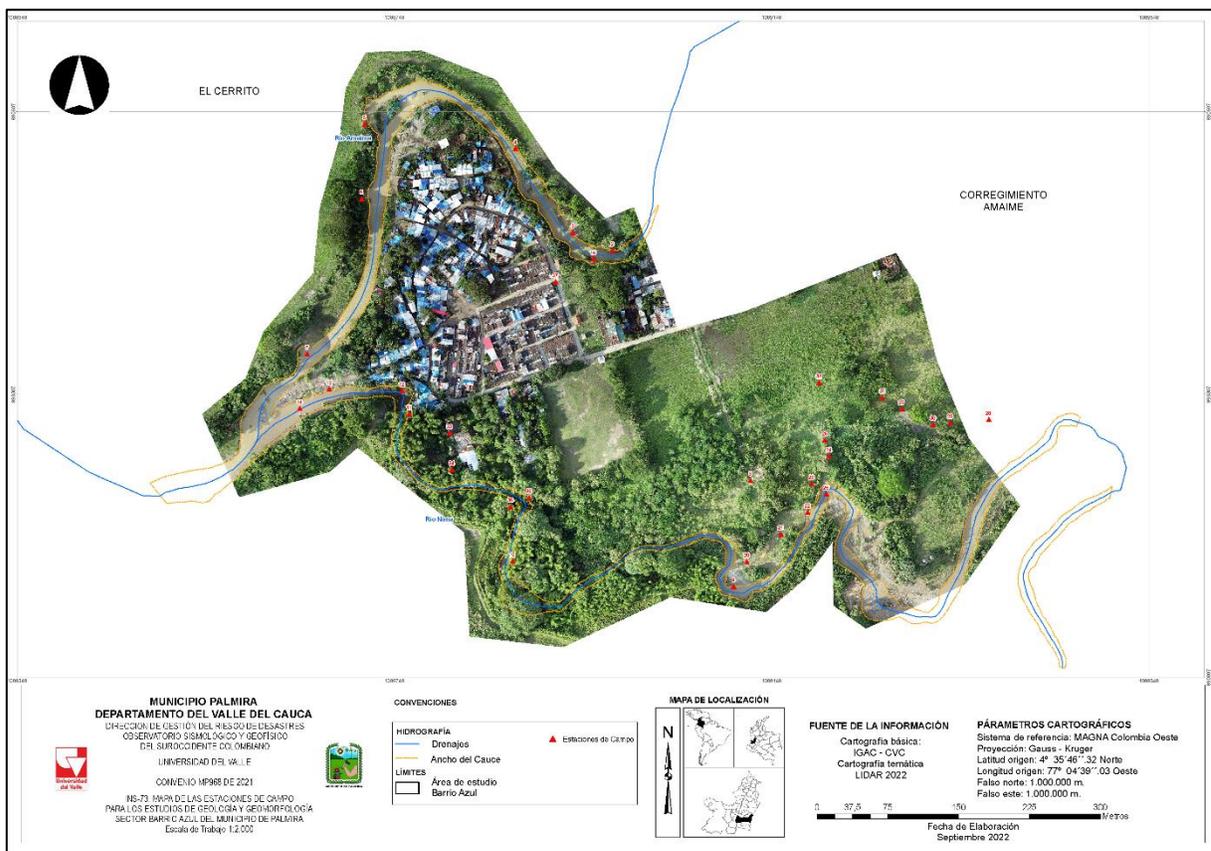
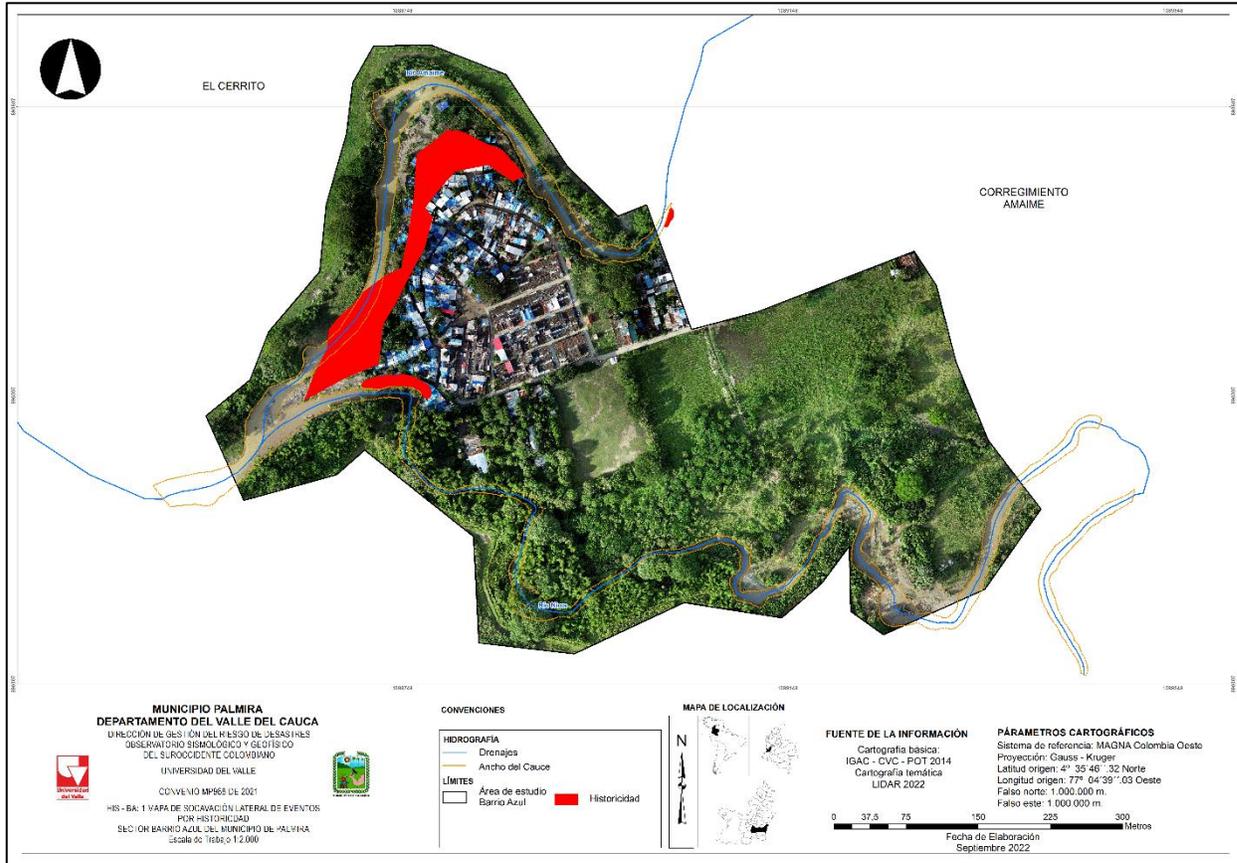


Figura 27. Estaciones de campo geología y geomorfología en barrio Azul (INS-73)

Fuente: Elaboración propia

Después de realizar los análisis de la fotointerpretación y los trabajos de campo, se obtuvieron las zonas que presentan socavación lateral. A continuación (Figura 28) se presenta el mapa con los resultados alcanzados.



**Figura 28.** Socavación lateral de eventos por historicidad (HIS-BA\_1)

**Fuente:** Elaboración propia.

De acuerdo a lo presentado en la anterior figura, hay zonas en las que se evidencia socavación lateral por historicidad.

## 6.2. Análisis dinámico fluvial

Para el análisis de orillas de los ríos Amaime y Nima en su recorrido por el sector de Barrio Azul, en el corregimiento de Amaime en el municipio de Palmira, se tomaron doce (12) secciones que corresponden a los sectores donde se logró identificar una mayor movilidad o divagación del cauce durante el periodo de análisis (Figura 29).

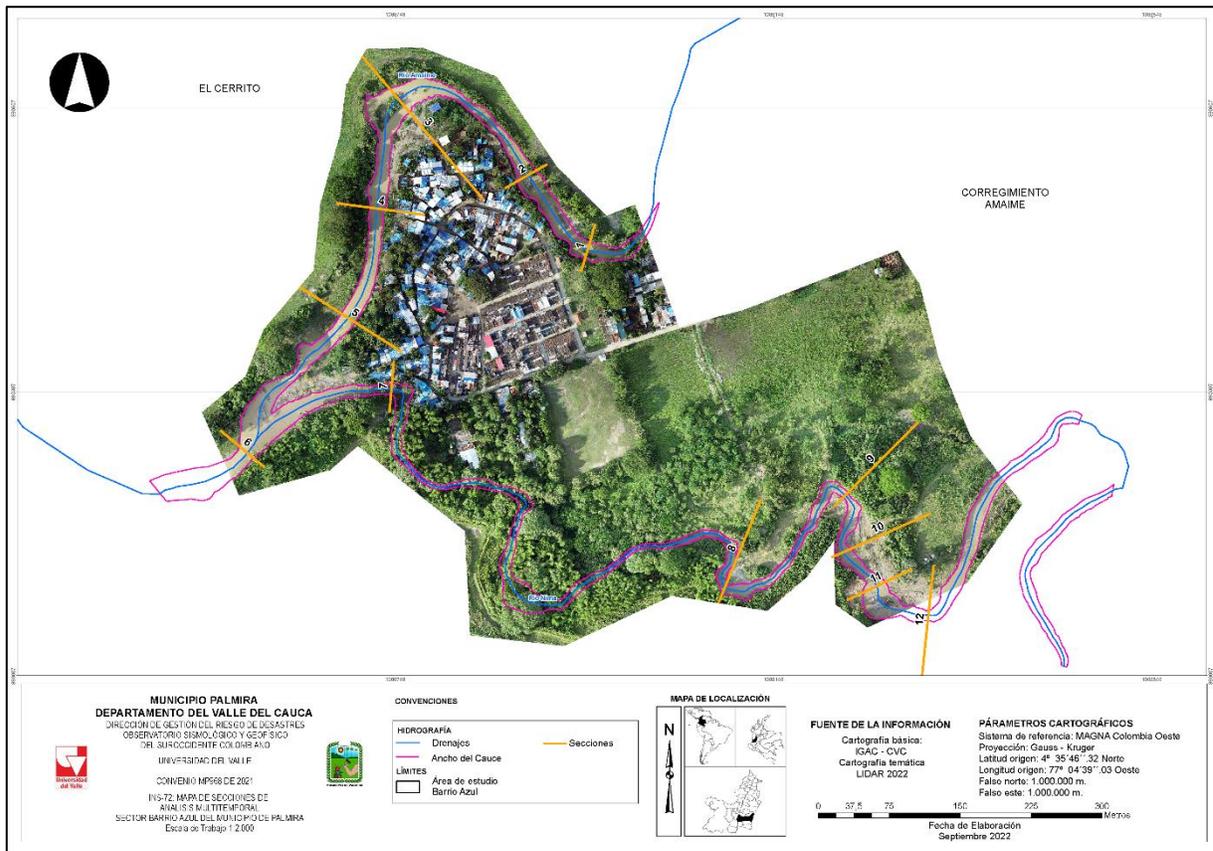
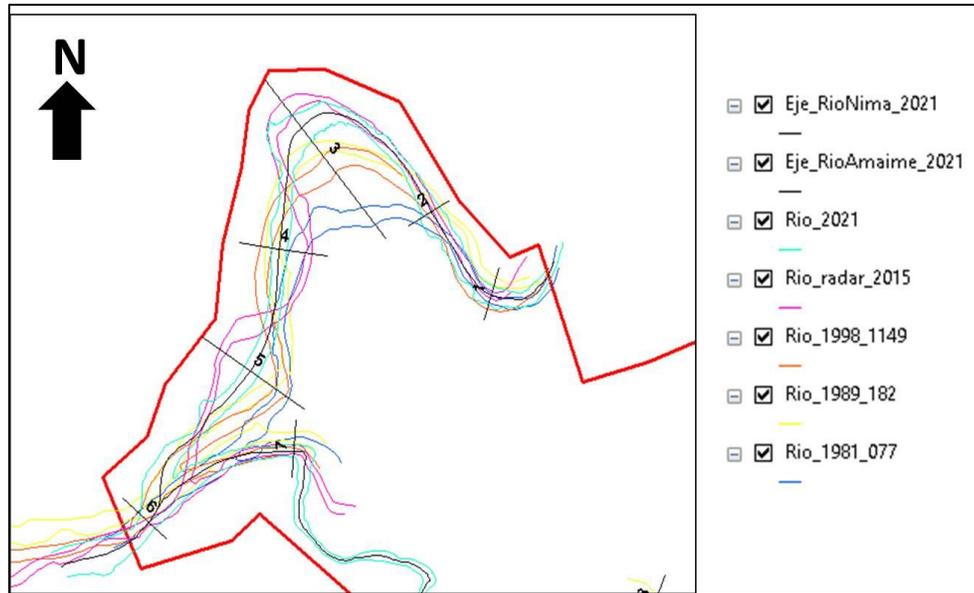


Figura 29. Secciones de análisis multitemporal de los ríos Amaime y Nima sector de Barrio azul (INS-72)

Fuente: Elaboración propia

### 6.2.1. Río Amaime

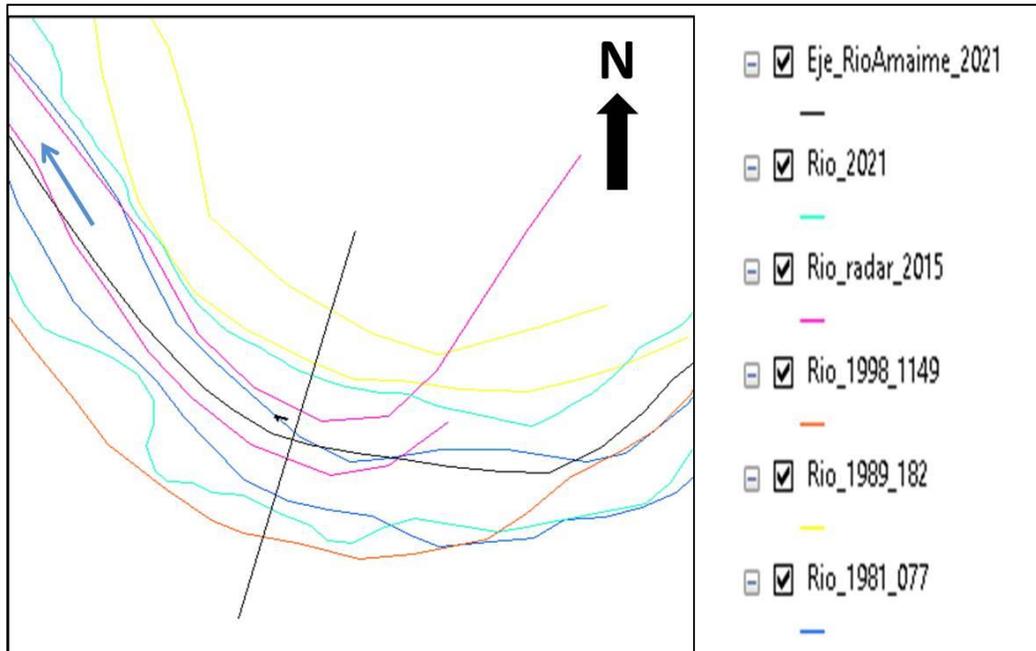
Las secciones analizadas para el río Amaime en el sector de Barrio Azul, están numeradas de la uno (1) al seis (6) y se encuentran distribuidas en sentido aguas abajo, estando la Sección 1 en la parte noreste al ingreso del río en el área de estudio y la Sección 6 aguas debajo de la intersección con el río Nima (Figura 30). Las secciones se encuentran separadas entre 120 m y 180 m. Para algunas secciones como se podrá apreciar a través de las figuras, no cuenta con información ya que la calidad de las imágenes analizadas no permitió su digitalización o por que se encontraban cubiertas por vegetación.



**Figura 30.** Secciones para análisis de movilidad de orillas a lo largo del río Amaime en el sector de Barrio Azul  
**Fuente:** Elaboración propia.

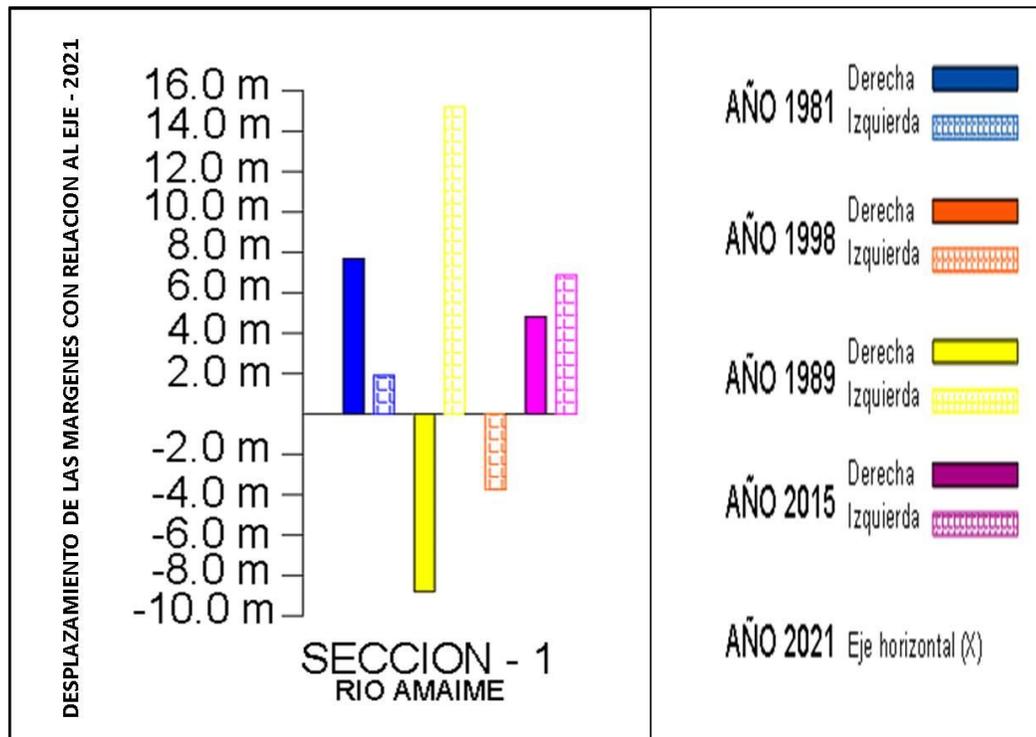
### 6.2.1.1. Sección 1

En esta sección se puede observar una buena dinámica del río Amaime en el sector, aunque con desplazamientos moderados. La margen derecha del río para el año 1981 se encuentra a 7,67 m de la margen derecha para el año 2021 o año de referencia e indica que su movimiento es de avance o ampliación de su zona de divagación; para el año 1989 presenta su mayor distancia con relación al año de referencia (2021) con 8,8 m e indicando que partir de este año se presenta un movimiento de retroceso o pérdida de su zona de divagación, que continua hasta el año 1998; a partir del cual vuelva a presentar avance de su margen como se observa para el año 2015 (Figura 31) (Figura 32). La margen izquierda, presenta para el año de 1989 su mayor distancia con relación al año de referencia con 15,2 m.



**Figura 31.** Distribución cauces del río Amaime – Sección 1 en el sector de Barrio Azul. La flecha azul indica el sentido de la corriente

Fuente: Elaboración propia.

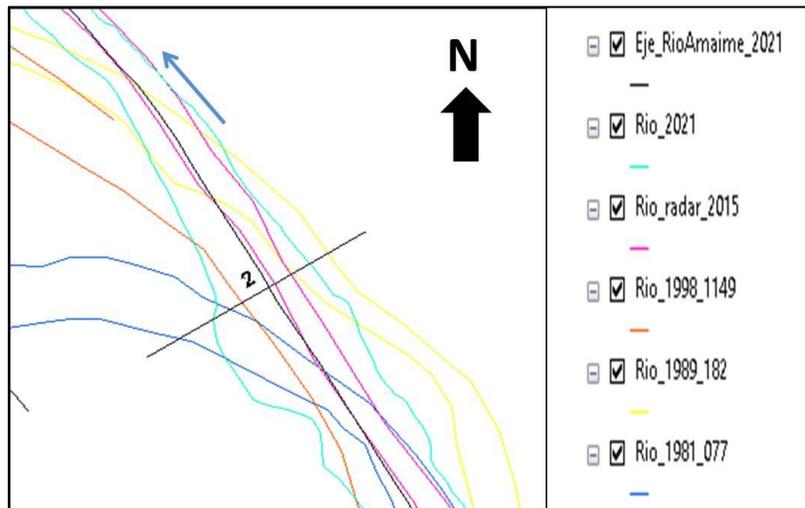


**Figura 32.** Movilidad de las orillas del río Amaime – Sección 1 en el sector de Barrio Azul

Fuente: Elaboración propia.

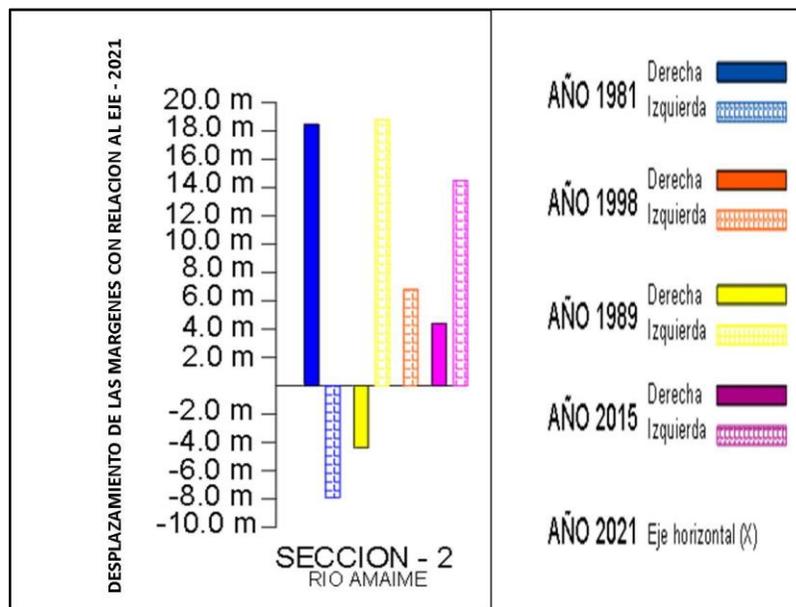
### 6.2.1.2. Sección 2

En esta sección la margen derecha del río Amaime para el año 1981 presenta su mayor distancia con relación al año de referencia (2021) con 18,46 m e indicando a partir de este año un movimiento de avance o ampliación de su zona de divagación hasta el año de 1989, a partir del cual, registra un retroceso hasta el año de 1998, año a partir del cual registra un avance continuo de su margen hasta alcanzar su posición actual (Figura 33) (Figura 34). Su margen izquierda presenta sus mayores distancias con relación al año de referencia (2021) para los años de 1989 y 2015 con 18,79 m y 14,14 m respectivamente.



**Figura 33.** Distribución cauces del río Amaime – Sección 2 en el sector de Barrio Azul. La flecha azul indica el sentido de la corriente

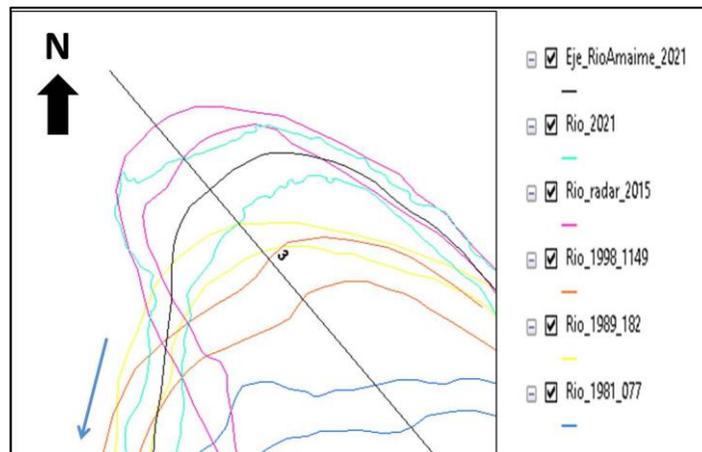
**Fuente:** Elaboración propia.



**Figura 34.** Movilidad de las orillas del río Amaime – Sección 2 en el sector de Barrio Azul  
**Fuente:** Elaboración propia.

### 6.2.1.3. Sección 3

La sección 3, representa la zona de mayor movilidad del río Amaime en el sector, presentando los mayores desplazamientos de sus orillas a lo largo de su zona de divagación. Para el año de 1981 su margen derecha se encontraba localizada a 114,48 m de la misma margen para el año 2021 y a partir de dicho año se inicia un proceso de avance o ampliación de su zona de divagación; movimiento que partir de 1989 se invierte, es decir, retrocede perdiendo parte de su zona de divagación. Para el año de 1998 su margen derecha se encontraba a 51,07 m de distancia con relación a la margen del año 2021, indicando a partir de este año un nuevo proceso de avance o ampliación de su zona de divagación, que se prolonga hasta el año 2015; a partir del cual, se inicia un nuevo proceso de retroceso hasta alcanzar su posición actual (Figura 35) (Figura 36). Su margen izquierda registra para el año de 1989 su mayor distancia con relación al año de referencia, con 103,65 m.



**Figura 35.** Distribución cauces del río Amaime – Sección 3 en el sector de Barrio Azul. La flecha azul indica el sentido de la corriente

**Fuente:** Elaboración propia.

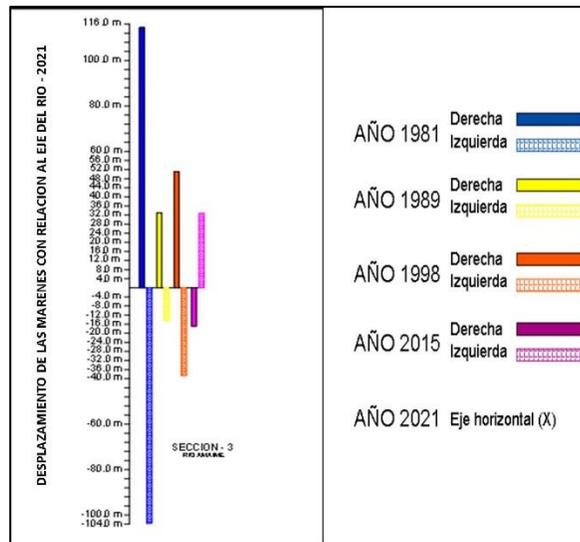


Figura 36. Movilidad de las orillas del río Amaime – Sección 3 en el sector de Barrio Azul

Fuente: Elaboración propia.

#### 6.2.1.4. Sección 4

En esta sección se pudo observar como la margen derecha del río Amaime para el año 1981 se encuentra a 18,51 m de la margen del año 2021 o año de referencia. A partir de este año se aprecia claramente un proceso constante de avance o ampliación de su zona de divagación hasta el año 1998 donde alcanza una separación de 12,47 m; año a partir del cual inicia una fase de retroceso o pérdida de su zona de divagación hasta el año de 2015, donde se encontraba a 35,61 m de la margen derecha para el año 2021. A partir de 2015 inicia nuevamente un proceso de avance o ampliación de su zona de divagación hasta alcanzar su posición (año 2021) (Figura 39) (Figura 40). La margen izquierda registra para los años de 1981 y 2015 las mayores distancias con relación a la margen izquierda del año 2021, 19,88 m y 26,53 m respectivamente.

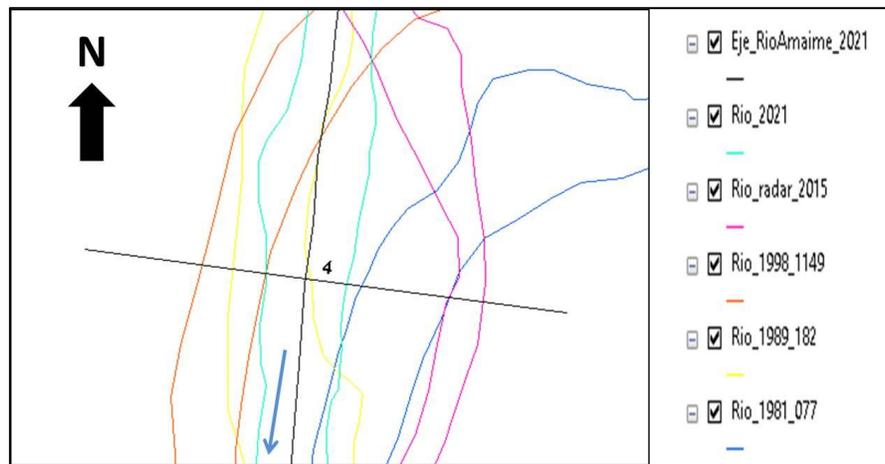


Figura 37. Distribución cauces del río Amaime – Sección 4 en el sector de Barrio Azul. La flecha azul indica el sentido de la corriente

Fuente: Elaboración propia.

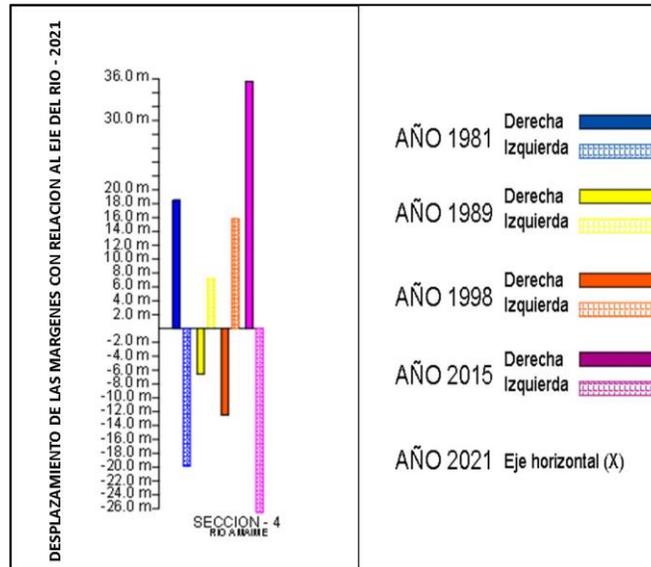
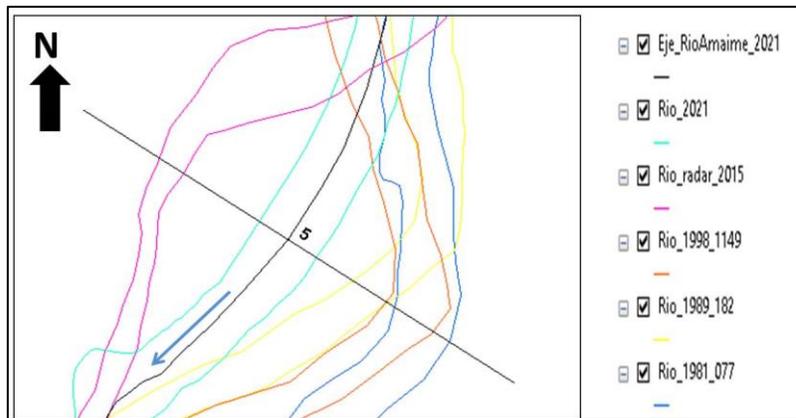


Figura 38. Movilidad de las orillas del río Amaime – Sección 4 en el sector de Barrio Azul

Fuente: Elaboración propia.

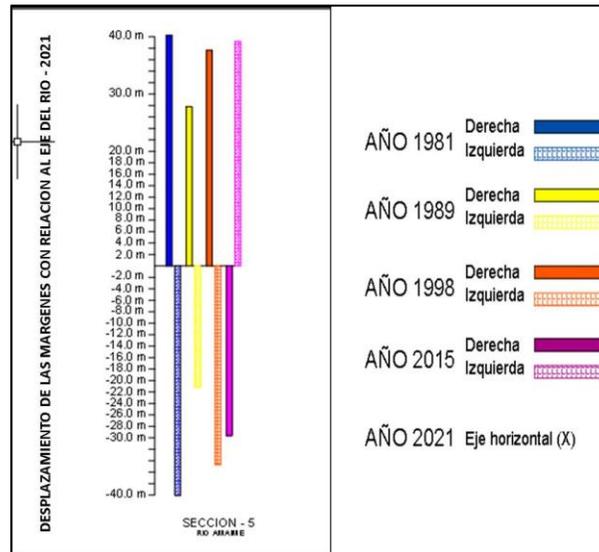
### 6.2.1.5. Sección 5

La sección 5 permite observar como la margen derecha del río Amaime para el año 1981 se encontraba a 40,24 m de la posición de la margen derecha para el año 2021. A partir de 1981 y hasta el año de 1989 se presenta un proceso de avance o ampliación de la zona de divagación; alcanzando al final de este periodo una distancia de 27,80 m con relación a la margen derecha para el año de 2021. A partir de 1989, se registra un proceso de retroceso de su zona de divagación hasta el año de 1998, situándose a 37, 65 m de la margen derecha del año de referencia. Pero a partir de 1998, nuevamente se inicia un proceso de avance o ampliación de su zona de divagación que se prolonga hasta el año de 2015, donde se registra una distancia de 29,63 m. Pero nuevamente a partir de 2015, se inicia un nuevo proceso de retroceso hasta alcanzar su posición para el año 2021 (Figura 39) (Figura 40). La margen izquierda registra sus mayores distancias para los años de 1981 y 2015 con 40,06 m y 39,19 m respectivamente.



**Figura 39.** Distribución cauces del río Amaime – Sección 5 en el sector de Barrio Azul. La flecha azul indica el sentido de la corriente

**Fuente:** Elaboración propia.

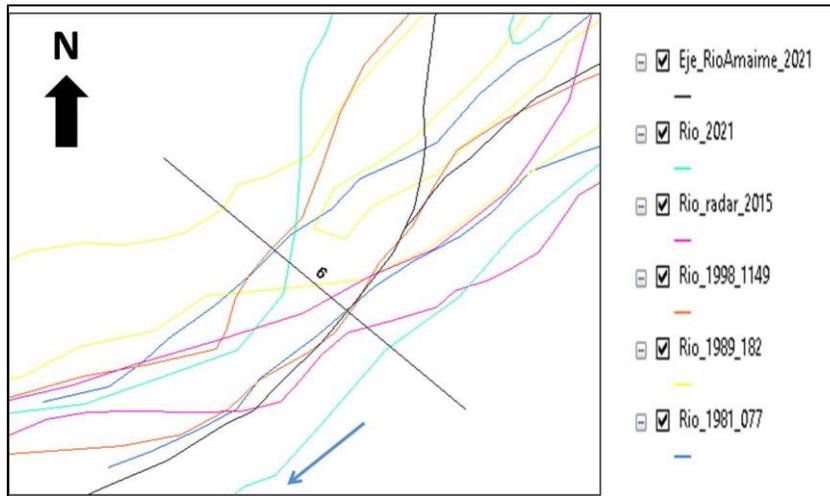


**Figura 40.** Movilidad de las orillas del río Amaime – Sección 5 en el sector de Barrio Azul

**Fuente:** Elaboración propia.

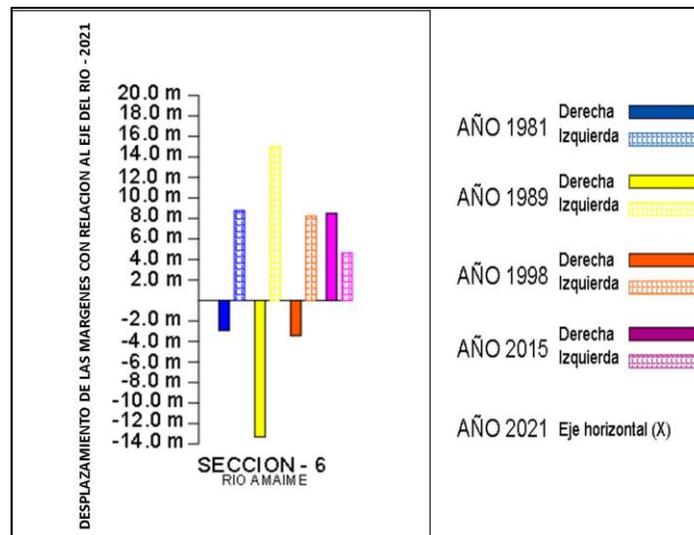
### 6.2.1.6. Sección 6

La sección 6 permite observar como la margen derecha del río Amaime para el año de 1981 se encontraba a 2,9 m de la posición de la margen derecha para el año 2021; sin embargo, a partir de dicho año (1989) se inicia un proceso de avance o ampliación de su zona de divagación hasta el año de 1989 donde la margen derecha se localizó a 13,31 m de la margen de referencia (2021). A partir de 1989 se reinicia un proceso de retroceso de la margen derecha que se extiende hasta el año de 2015, donde se situó a 8,48 m de la margen derecha del año 2021; pero nuevamente a partir de 2015 se inicia un nuevo proceso de avance de la margen derecha hasta alcanzar su posición actual (año 2021) Figura 41) (Figura 42). La margen izquierda para el año de 1989, presenta su mayor distancia con relación a la margen izquierda del año de referencia con 15 m.



**Figura 41.** Distribución cauces del río Amaime – Sección 6 en el sector de Barrio Azul. La flecha azul indica el sentido de la corriente

Fuente: Elaboración propia.



**Figura 42.** Movilidad de las orillas del río Amaime – Sección 6 en el sector de Barrio Azul

Fuente: Elaboración propia.

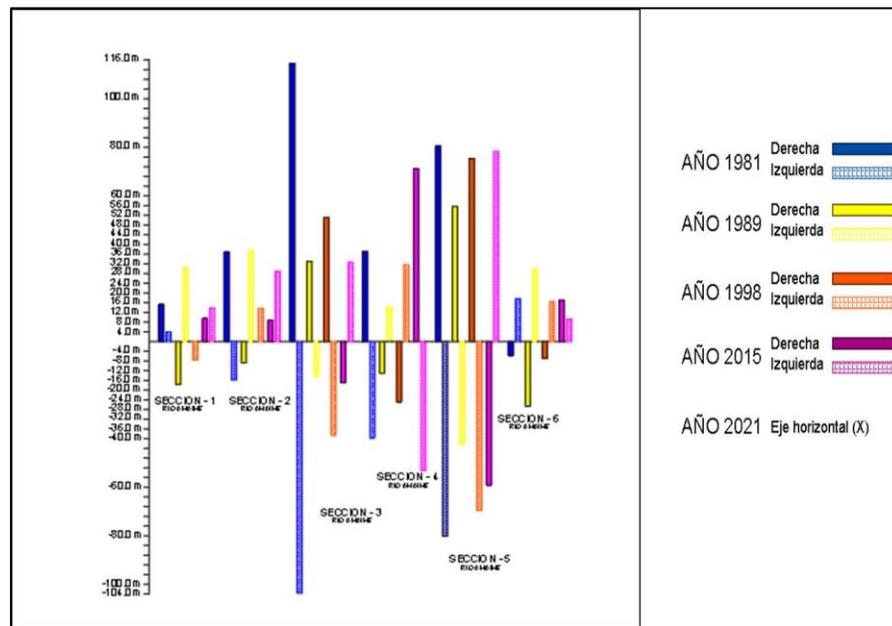
### 6.2.1.7. Movilidad de orillas en el tramo del río Amaime – Sector barrio Azul

En la Figura 43 se puede observar el proceso de divagación de las orillas del río Amaime, que fue explicado en las secciones previas para el sector de Barrio Azul.

El río Amaime en el sector de Barrio Azul presenta un carácter sinuoso con una moderada a alta movilidad de sus orillas, donde se destaca la intercalación de periodos de ampliación y pérdida de su zona de divagación.

Se destaca en la Sección 1 donde se presenta el meandro de entrada al sector de Barrio Azul una tendencia a ampliar la sección del río con un proceso muy leve de socavación el cual se ha venido presentando a lo largo de los años analizados, pero sin presentar cambios importantes sobre la margen izquierda del río donde se encuentra Barrio Azul.

La Sección 3 localizada sobre el sector más al norte de la zona de estudio; registra la presencia de un meandro a lo largo del cual se ha presentado los mayores procesos de divagación del río, registrando distancias máximas de sus márgenes de 114, 48 m (margen derecha) y 103,65 m (margen izquierda) y mínimas de 16,88 m (margen derecha) y 14,39 m (margen izquierda); fenómenos que indican la gran dinámica del río, donde se registra un fuerte proceso de expansión hacia el norte (margen derecha), pero que entre el periodo de 2015 y 2021 registra un leve retroceso.



**Figura 43.** Movilidad de las orillas del río Amaime – Período 1981 – 2021 en el sector de Barrio Azul

**Fuente:** Elaboración propia.

Para el sector comprendido entre las secciones 4 y 5 entre los años 1981 y 1998 el río presentó una leve tendencia a desplazarse hacia el noroeste; pero hacia el año 2015 en la sección 4 el río presenta un fuerte retroceso de la margen derecha y en la sección 5 un avance de la misma sección. Estos cambios podrían estar relacionados con la fuerte intervención antrópica que se ha venido ejerciendo sobre el río durante ese período; actividades relacionadas con la extracción de arenas y gravas del cauce del río para el comercio como materiales de construcción y a la intervención por parte de la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca - CVC, donde extrajo gran cantidad de material del cauce y lo depósito sobre la margen izquierda del río, a manera de dique para proteger al sector de los procesos erosivos que sobre la margen izquierda se venían desarrollando y no llegara a afectar la zona donde se encuentran construidas las casas en el sector.

La extracción de materiales de arrastre del lecho del río Amaime en la zona intensifica su dinámica natural, originando en el tramo procesos erosivos de las bancas y el lecho del río, tanto hacia aguas arriba (erosión remontante) como hacia aguas abajo (erosión progresiva) de los sitios de explotación, lo cual incrementa la erosión y el desplazamiento de las orillas y, por ende, su movilidad. Esta socavación lateral del cauce del río Amaime podría en un futuro llegar a afectar la infraestructura y las viviendas del sector. Por lo anterior, se recomienda realizar los estudios de impacto ambiental debido a la actividad extractiva de materiales de arrastre en el río y establecer así los efectos de esta actividad sobre la dinámica morfológica del río.

En la sección 6 se observa claramente como el río a partir de 1981 y hasta 1989 inicia un proceso de desplazamiento hacia el noroeste, pero que a partir de este año invierte su desplazamiento y presenta una tendencia a desplazarse hacia el sureste.

## 6.2.2. Río Nima

Las secciones analizadas para el río Nima en el sector de Barrio Azul, están numeradas de la siete (7) al doce (12) y se encuentran distribuidas en sentido aguas arriba, estando la Sección 7 en la parte suroeste previo a la desembocadura en el río Amaime y la Sección 12 en el extremo sureste en el ingreso del río al área de estudio (Figura 44). Las distancias de separación entre las secciones 12 y 9 se encuentran entre 50 m y 70 m, la sección 8 se encuentra a 180 m de la sección 9. Entre las secciones 8 y 7 no se cuenta con secciones para análisis de movilidad de orillas, debido a que este tramo del río presenta en todas las imágenes obtenidas una fuerte cobertura vegetal que impidió la determinación de las orillas del río y por lo tanto su digitalización.

De acuerdo a la posición de las secciones el análisis de estas se realizará desde la sección 12 hacia la sección 7.

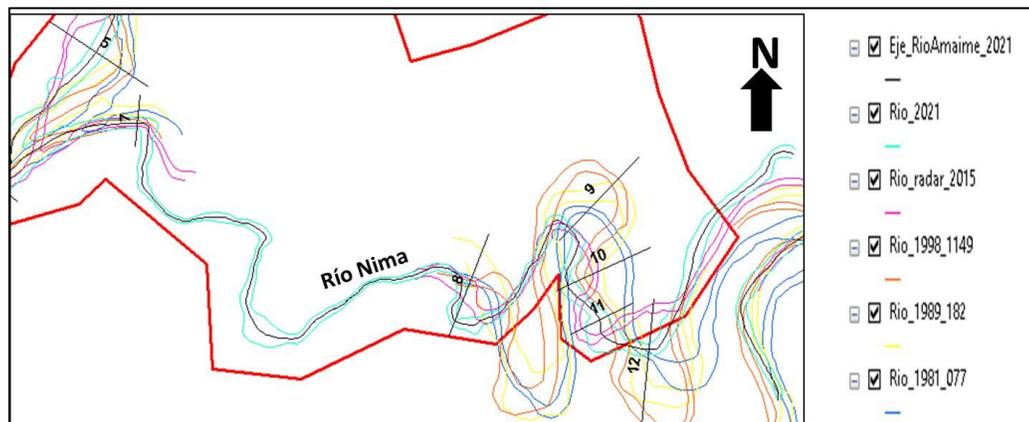
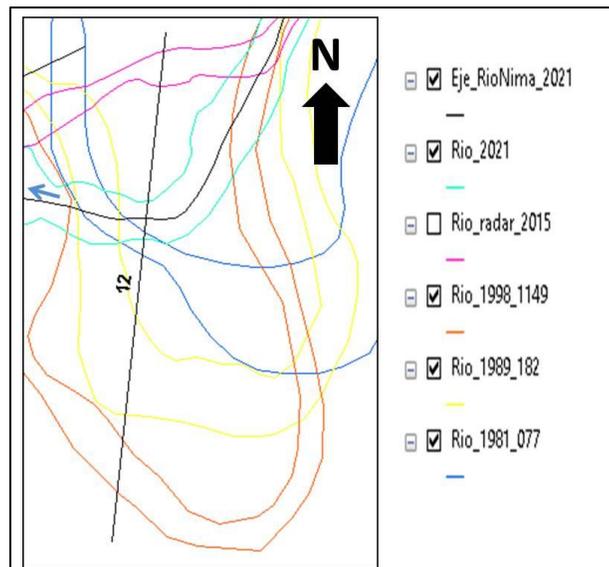


Figura 44. Secciones para análisis de movilidad de orillas a lo largo del río Nima2 en el sector de Barrio Azul

Fuente: Elaboración propia.

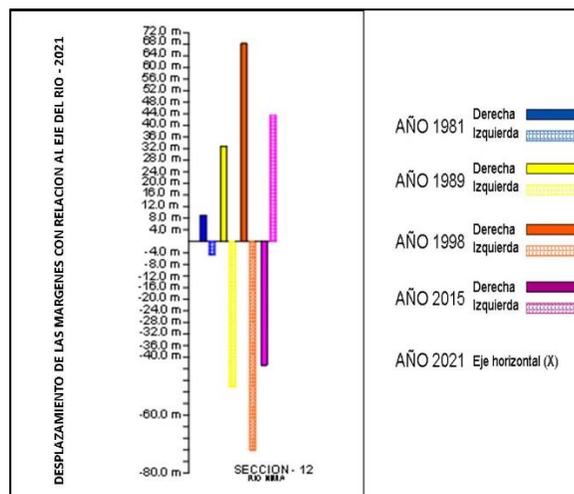
### 6.2.2.1. Sección 12

En la sección 12 para el año 1981 la margen derecha se encontraba a 8,87 m de la posición de la margen derecha del año de referencia (2021). Se puede observar como a partir de 1981 se presenta un proceso de retroceso de dicha margen hasta el año de 1998, donde se localizó a 68,28 m. Entre los años 1998 y 2015 se presenta un fuerte cambio en la tendencia del río, registrando hacia su margen derecha un avance o ampliación de su zona de divagación y localizándose a 42,80 m de la margen derecha del para el año 2021. A partir del 2015 se inicia un nuevo proceso de retroceso de la margen derecha hasta alcanzar su posición actual (2021) (Figura 45) (Figura 46). La margen izquierda para el año 1998 presentó su mayor distancia con relación a la margen izquierda del año de referencia, con 72,10 m.



**Figura 45.** Distribución cauces del río Nima – Sección 12 en el sector de Barrio Azul. La flecha azul indica el sentido de la corriente

**Fuente:** Elaboración propia.



**Figura 46.** Movilidad de las orillas del río Nima – Sección 12 en el sector de Barrio Azul

**Fuente:** Elaboración propia.

### 6.2.2.2. Sección 11

En la sección 11 se puede observar como la margen derecha del río Nima se encontraba para el año 1981 a una distancia de 30,86 m con relación a la margen derecha del año 2021 o año de referencia. A partir de 1981 se observa un proceso constante de retroceso de la margen hasta el año 2015, donde su margen derecha se encontraba a 32,09 m de la margen derecha del año de referencia. A partir de este año, se observa un nuevo proceso de avance o ampliación de la zona de divagación de su margen derecha hasta alcanzar la posición actual (2021) (Figura 47) (Figura 48).

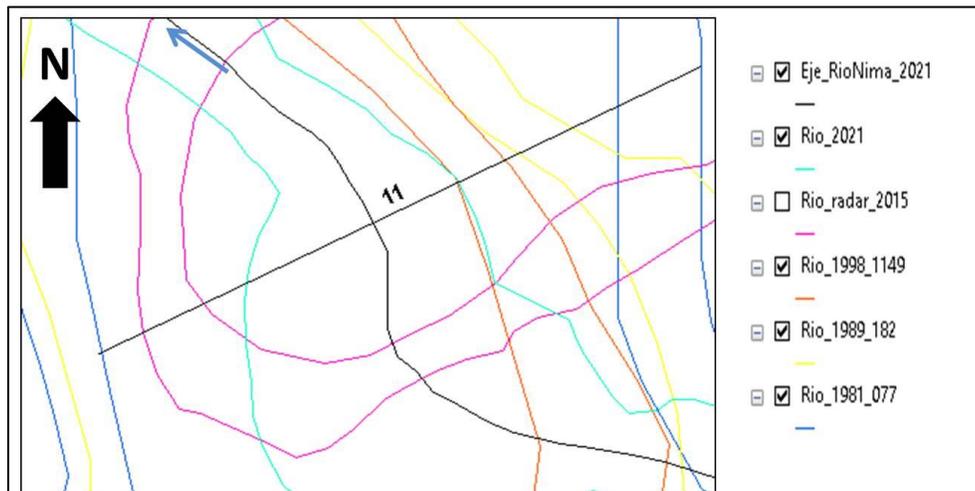
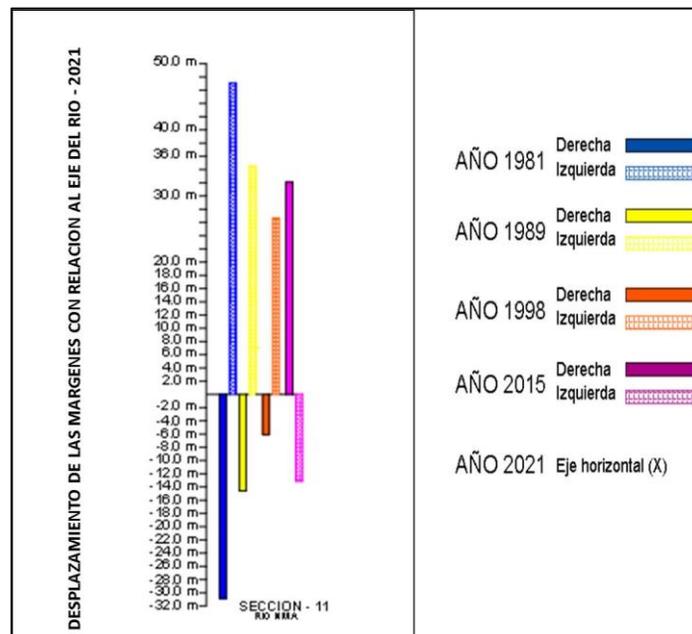


Figura 47. Distribución cauces del río Nima – Sección 11 en el sector de Barrio Azul. La flecha azul indica el sentido de la corriente

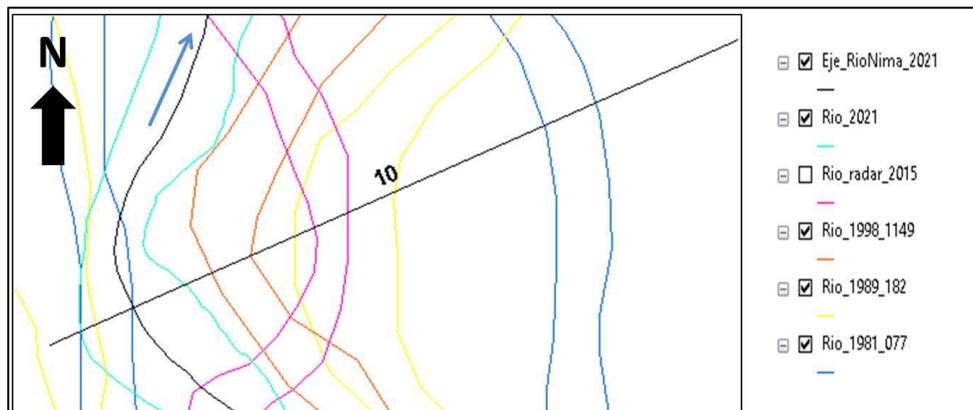
Fuente: Elaboración propia.



**Figura 48.** Movilidad de las orillas del río Nima – Sección 11 en el sector de Barrio Azul  
**Fuente:** Elaboración propia.

### 6.2.2.3. Sección 10

En la sección 10 se puede observar como la margen derecha del río Nima para el año 1981 se encontraba a 68,25 m de la posición de la margen derecha del río en el año 2021. Igualmente, se observa como a partir de 1981 se inicia un proceso de retroceso de esta margen hasta el año de 1998 donde se localiza a 10,80 m de la margen derecha del río para el año de referencia. Entre 1998 y 2015 el comportamiento del río cambia y se da un proceso de avance o ampliación de la zona de divagación, localizándose su margen derecha a 26,94 m de la margen derecha del río para el año 2021. Entre 2015 y el año 2021 se invierte nuevamente el movimiento del río y se presenta un retroceso hasta su posición actual (Figura 49) (Figura 50). La margen izquierda del río presenta con relación a la margen izquierda del río para el año de referencia una distancia máxima de 77,05 m en 1981 y una distancia mínima de 21,92 m en 1998.



**Figura 49.** Distribución cauces del río Nima – Sección 10 en el sector de Barrio Azul. La flecha azul indica el sentido de la corriente  
**Fuente:** Elaboración propia.

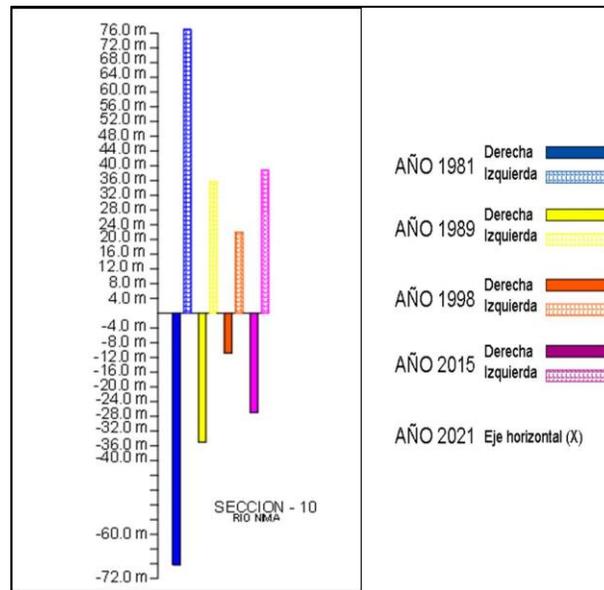
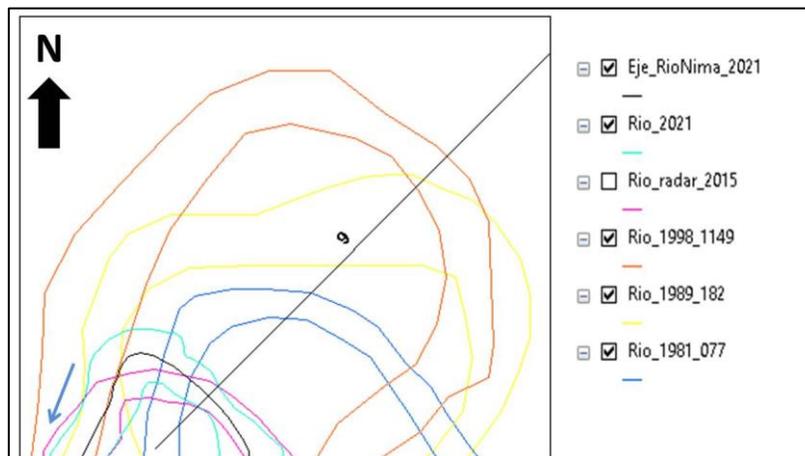


Figura 50. Movilidad de las orillas del río Nima – Sección 10 en el sector de Barrio Azul

Fuente: Elaboración propia.

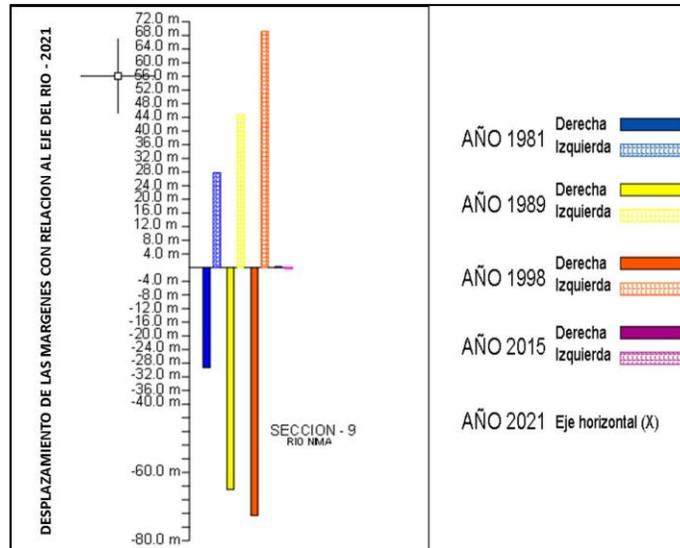
### 6.2.2.4. Sección 9

En la sección 9 se puede observar como la margen derecha del río Nima para el año 1981 se encontraba a 29,27 m de distancia de la posición de la misma margen para el año 2021. Igualmente, se observa como a partir de 1981 se inicia un proceso de avance de la margen derecha ampliando su zona de divagación hasta el año de 1998, donde esta margen se localizó a 72,58 m de la misma margen para el año 2021. Entre los años 1998 y 2015 se presentó un retroceso de la margen derecha hasta localizarse a una distancia de 0,23 m con relación a la margen derecha para el año 2021. A partir de 2015 se registra un leve movimiento de avance de la margen hasta alcanzar su posición actual (año 2021) (Figura 51) (Figura 52). La margen izquierda del río Nima presenta sus mayores distancias con relación a la margen izquierda de referencia del río para el año 2021 con 44,62 m y 69,22 en los años 1989 y 1998 respectivamente.



**Figura 51.** Distribución cauces del río Nima – Sección 9 en el sector de Barrio Azul. La flecha azul indica el sentido de la corriente

Fuente: Elaboración propia.

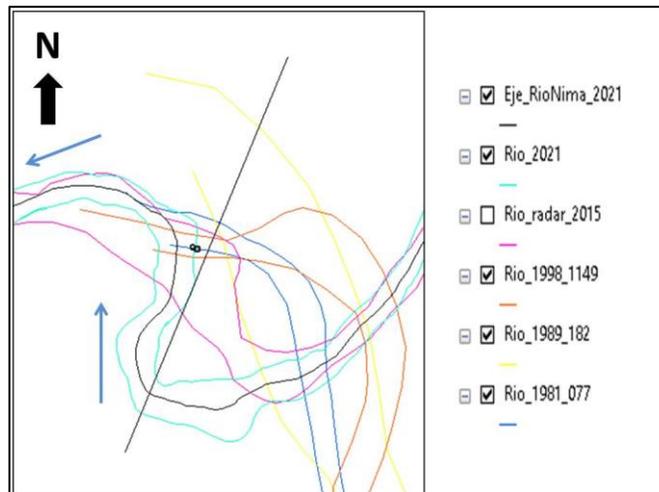


**Figura 52.** Movilidad de las orillas del río Nima – Sección 9 en el sector de Barrio Azul

Fuente: Elaboración propia.

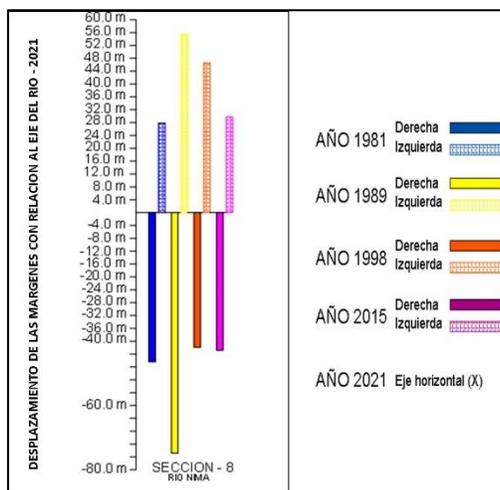
### 6.2.2.5. Sección 8

En la sección 8 se puede observar como la margen derecha del río Nima para el año 1981 se encuentra a 46,33 m de distancia con relación a la posición de la misma margen para el año 2021. Igualmente se aprecia como entre los años 1981 y 1989 se presenta un proceso de avance o ampliación de la zona de divagación, hasta posicionar dicha margen a una distancia de 74,84 m con relación a la margen derecha del río para el año 2021. Entre 1989 y 1998 se presenta un retroceso de dicha margen hasta localizarse a 41,85 m de la posición de dicha margen para el año de referencia. Entre 1998 y 2015 se registra una leve ampliación de la zona de divagación posicionando la margen a 42,83 m de la margen derecha para el año 2021. Entre los años 2015 y 2021 se presenta un retroceso de la margen hasta alcanzar su posición actual (año 2021) (Figura 53) (Figura 54). La margen izquierda presenta sus mayores distancias con relación a la margen izquierda del río en el año 2021, con 55,48 m y 46,50 m para los años 1989 y 1998 respectivamente.



**Figura 53.** Distribución cauces del río Nima – Sección 8 en el sector de Barrio Azul. La flecha azul indica el sentido de la corriente

**Fuente:** Elaboración propia.



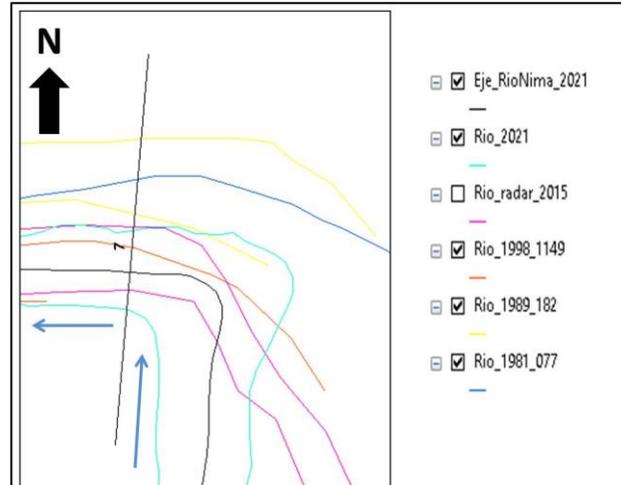
**Figura 54.** Movilidad de las orillas del río Nima – Sección 8 en el sector de Barrio Azul

**Fuente:** Elaboración propia.

### 6.2.2.6. Sección 7

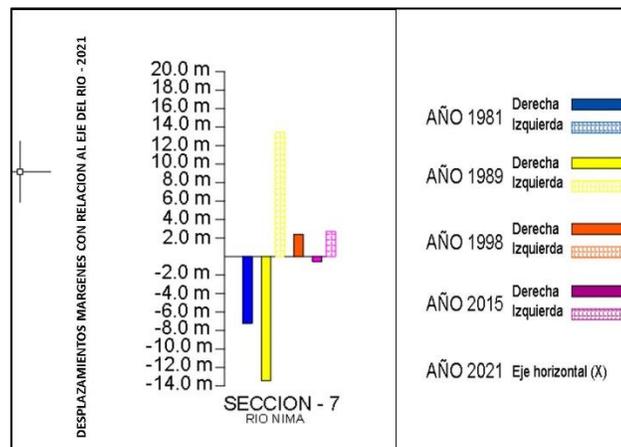
La sección 7 localizada previa a la desembocadura del río Nima en el río Amaime, permite observar como la margen derecha del río Nima se encontraba para el año de 1981 a una distancia de 7,23 m de la posición de la margen derecha del río para el año de referencia. Se puede apreciar como entre los años 1981 y 1989 se presenta un avance o ampliación de la zona de divagación sobre dicha margen, posicionándose a 13,43 m de la margen derecha del río para el año 2021. Entre 1989 y 1998 se registra el retroceso de la margen derecha perdiendo por lo tanto parte de su zona de divagación y localizándose a 2,39 m de la margen derecha del río para el año 2021. Entre 1998 y 2015, se registra un nuevo avance de la margen derecha recuperando parte de su zona de divagación y localizándose a 0,55 m de la posición de la margen derecha para el año 2021. Finalmente, entre los años 2015 y 2021 se registra

un leve proceso de retroceso hasta alcanzar su posición actual (Figura 55) (Figura 56). La margen izquierda presenta para el año de 1989 su mayor distancia con relación a la misma margen del río para el año 2021 con 13,43 m de separación.



**Figura 55.** Distribución cauces del río Nima – Sección 7 en el sector de Barrio Azul. La flecha azul indica el sentido de la corriente

**Fuente:** Elaboración propia.



**Figura 56.** Movilidad de las orillas del río Nima – Sección 7 en el sector de Barrio Azul

**Fuente:** Elaboración propia.

### 6.2.2.7. Movilidad de orillas en el tramo del río Nima – Sector barrio Azul

En la Figura 57 se puede observar el proceso de divagación de las orillas del río Nima, que fue explicado en las secciones previas para el sector de Barrio Azul.

El río Nima en el sector de Barrio Azul presenta un carácter sinuoso con una alta movilidad de sus orillas, donde se destaca la intercalación de periodos de ampliación y pérdida de su zona de divagación.

El tramo del río Nima donde se localizan las secciones 12 a 8, presentando a lo largo del período analizado una serie de meandros lo cuales por los procesos naturales de la dinámica del río se han estrangulado; dando origen a la formación de meandros abandonados y a los diferentes procesos de avance y retroceso de las márgenes del río que fueron anteriormente descritas.

El análisis multitemporal realizado al río Nima y que está comprendido entre los años 1981 y 2021, permite definir claramente como, el río en el sector de Barrio Azul presenta una tendencia a desplazarse hacia el sur; es decir tiende a presentar un avance o aumento de la zona de divagación de su orilla o margen izquierda.

Al igual que para el río Amaime, se recomienda la realización de un estudio de impacto ambiental para determinar los efectos que la actividad de extracción de arenas y gravas del cauce del río, está ejerciendo sobre su cauce y bancas y como podría esta actividad antrópica llegar a afectar su dinámica actual.

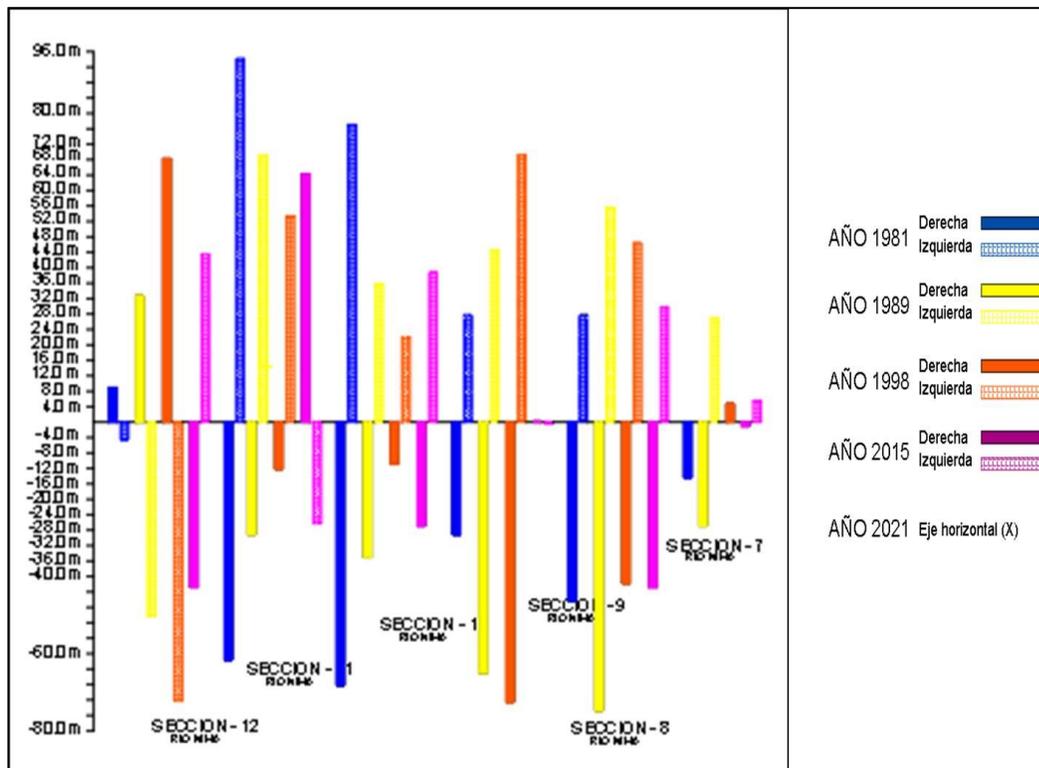
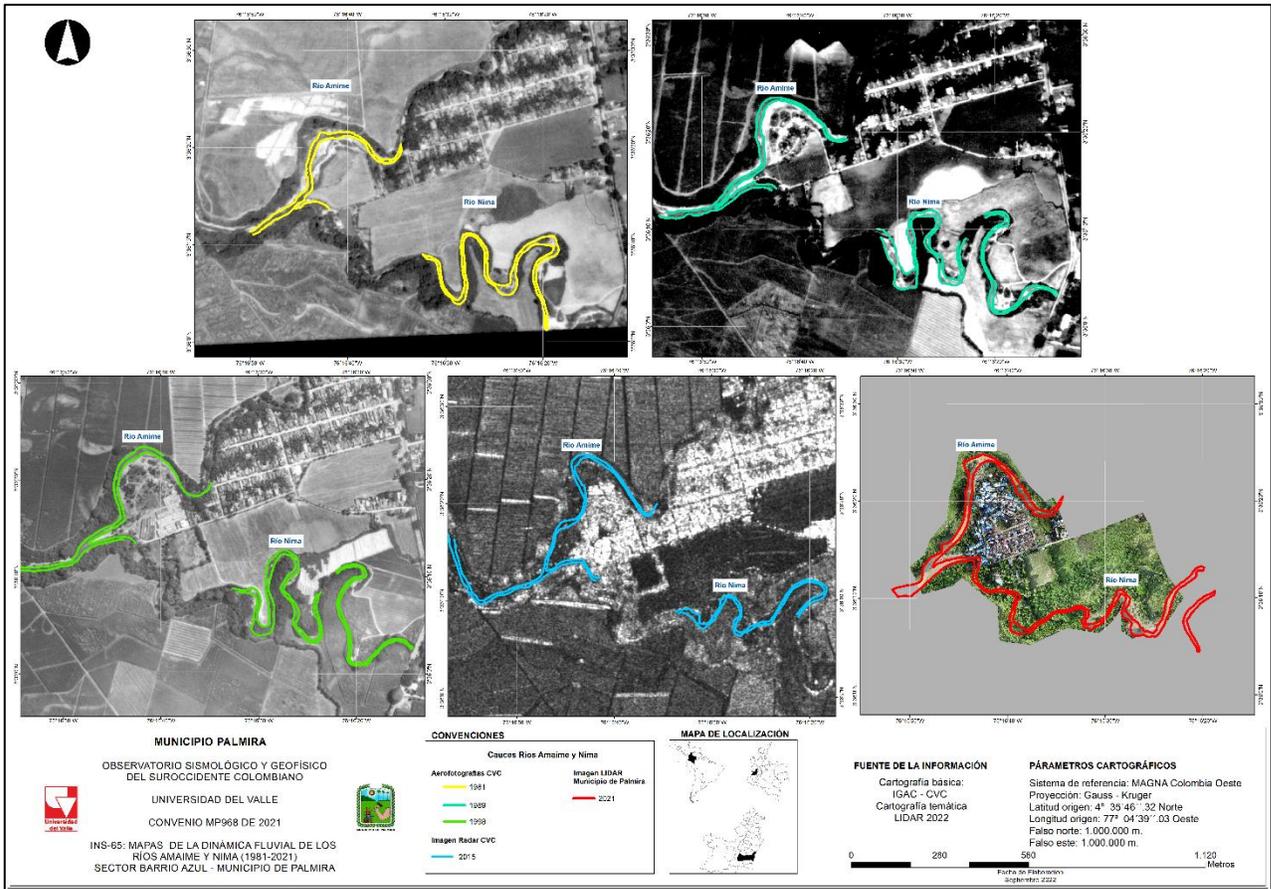


Figura 57. Movilidad de las orillas del río Nima – Período 1981 – 2021 en el sector de Barrio Azul

Fuente: Elaboración propia.

Después de realizar las doce (12) secciones y determinar la dinámica fluvial de los ríos Amaime y Nima, se obtuvo como resultado el corrimiento lateral de los cauces. En las Figura 58 y Figura 59 se presentan los resultados de los mapas multitemporales para los años 1981, 1989, 1998 y 2021.



**Figura 58. Dinámica fluvial de los ríos Amaime y Nima (1981 – 2021) (INS-65)**

**Fuente:** Elaboración propia.

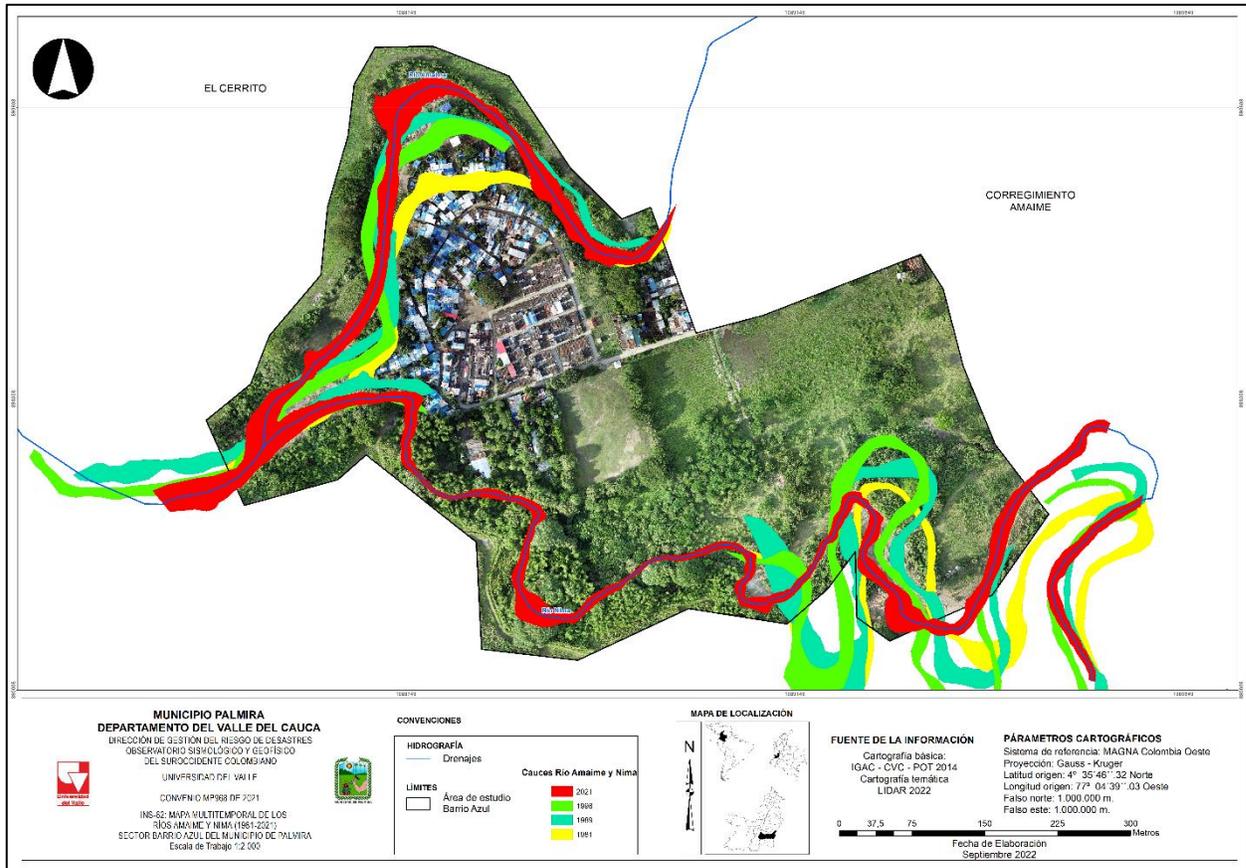


Figura 59. Multitemporal de los ríos Amaime y Nima (1981-2021) (INS-62)

Fuente: Elaboración propia.

## 6.3. Susceptibilidad por socavación lateral

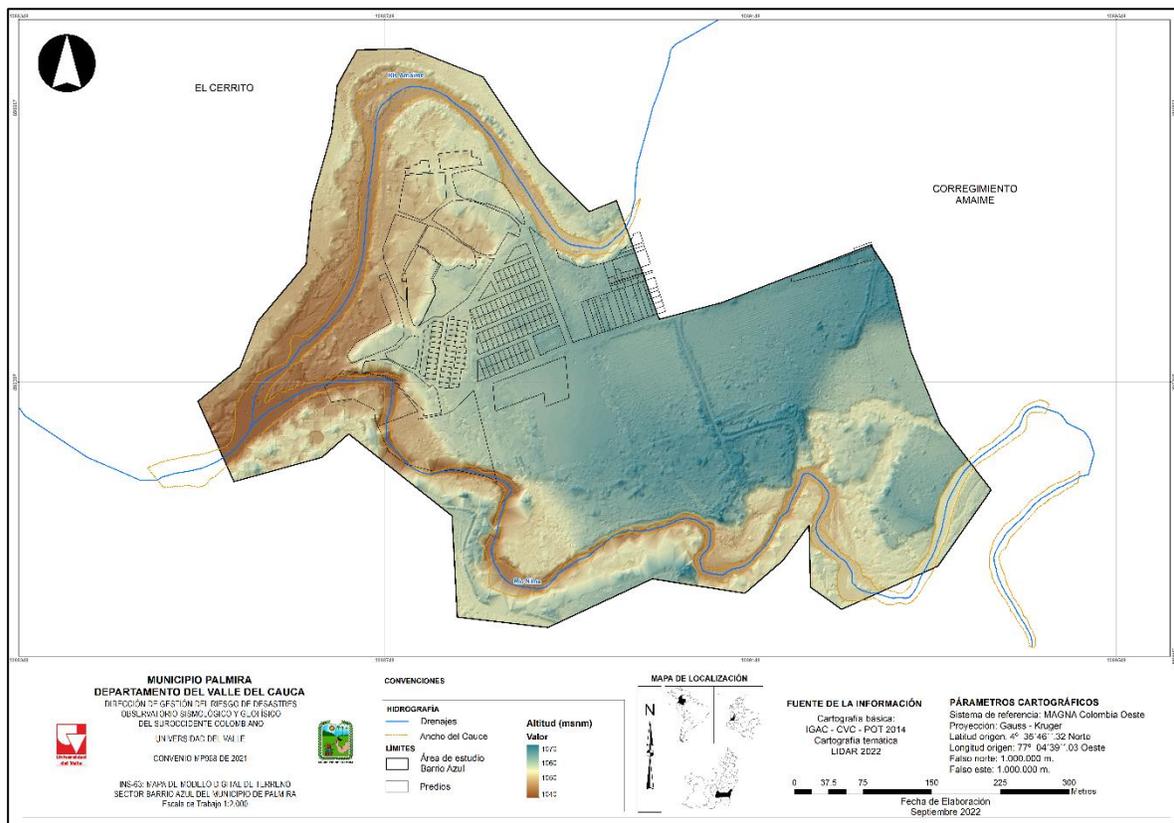
A continuación, se presentan una breve descripción de las variables utilizadas en la zonificación de la susceptibilidad por socavación lateral en el área de estudio en el municipio de Palmira.

### 6.3.1. Descripción de las variables

Para la evaluación de la susceptibilidad y su análisis se toman en cuenta factores críticos que afectan de manera directa el municipio de Palmira: pendiente, orientación de las laderas, geomorfología, modelo digital de elevaciones, movimientos (socavación lateral ocurrida en el área de estudio), unidades geológicas superficiales y orientación de la ladera, el análisis también se basa en el reconocimientos de campo y la caracterización de los riesgos derivados de terrenos inestables mediante el análisis geomorfológicos, a través del uso de fotografías aéreas, mapas y verificación en campo.

- **Modelo Digital del Terreno (MDT)**

Contiene información explícita acerca de la altitud y la distancia de un área específica, al igual que permite calcular diferentes variables. El MDT, se elaboró de con puntos tomados con LIDAR a resolución de 30cm. Esta variable se tomará como base para elaborar diferentes mapas o capas temáticas que posteriormente serán utilizadas para la evaluación de la susceptibilidad a la socavación lateral (Figura 60).



**Figura 60.** Modelo Digital del Terreno (INS-63)

Fuente: Elaboración propia

- **Pendiente**

El área de estudio corresponde a zonas planas con pendientes que van desde ligeramente suaves (planas) a fuertes (extremadamente abruptas). En la Tabla 6, se muestran los rangos de las pendientes utilizadas en el SGC, adaptado de Van Zuidam 1986.

El relieve de una determinada área juega un papel definitivo en la estabilidad de las laderas, puesto que es necesaria cierta pendiente para que se produzcan los movimientos gravitacionales de masas, en algunos casos aún con pendientes bajas se producen

movimientos, de ahí que la cartografía y el análisis de este factor está dentro de las características fundamentales en un estudio que busque evaluar la susceptibilidad.

**Tabla 6.** Categorización de la variable pendiente verificar

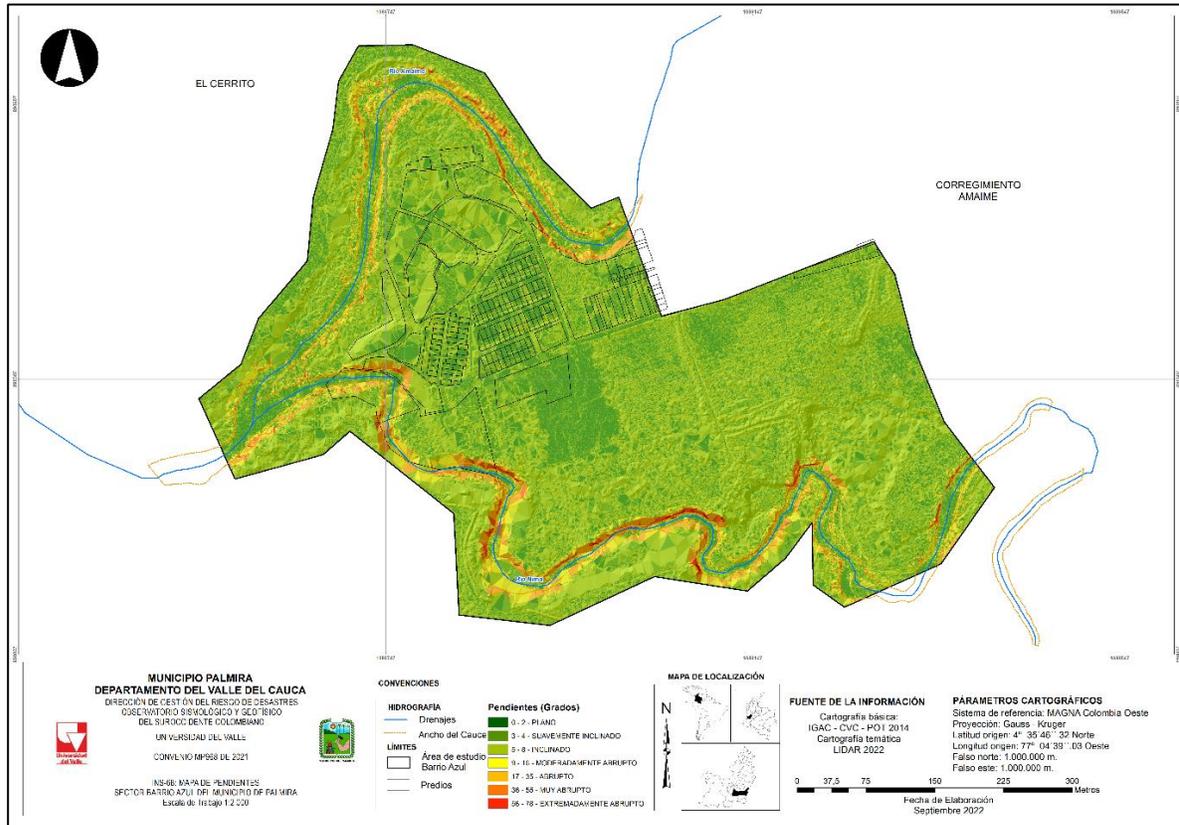
CLASES	RANGOS DE PENDIENTES (Grados)	CLASIFICACIÓN
1	0-2	Plano
2	2-4	Suavemente inclinado
3	4-8	Inclinado
4	8-16	Moderadamente abrupto
5	16-35	Abrupto
6	35-55	Muy abrupto
7	>55	Extremadamente abrupto

**Fuente:** Tomado de Zuidam 1986

Las pendientes del terreno son determinantes en la estabilidad que tenga una determinada área, ya que en pendientes más suaves será menos probable que el terreno se deslice, mientras que en pendientes mayores la probabilidad de que se presenten procesos de socavación lateral es más alta, cabe aclarar que el hecho de que la pendiente sea suave no lo exime de sufrir dichos procesos. Teniendo en cuenta lo anterior se puede decir que el mapa de pendientes es un elemento imprescindible para la evaluación.

El mapa de pendientes de la zona fue construido a partir de los valores de altura obtenidos del MDT. El cálculo se hace utilizando la función gradiente en dirección X y Y donde se obtienen las alturas y las distancias, resultando una capa raster expresada en grados.

Las pendientes del área de estudio oscilan entre  $0^\circ \geq 60^\circ$ , el rango más representativo está entre los  $9^\circ$  y  $35^\circ$ , tal como puede observarse en el mapa de pendientes (Figura 61), también se denota que existen áreas planas, con ello se puede intuir que la mayor de los ríos Amaime y Nima presentan zonas propensas a sufrir socavación lateral, dado que entre mayor sea el gradiente que presente una ladera mayor será la posibilidad de que ocurran este tipo de evento.



**Figura 61. Pendientes (INS-68)**  
 Fuente: Elaboración propia

▪ **Orientación de las laderas**

“Representa la dirección de máxima pendiente calculada para cada celda. Se calcula a partir del ángulo existente entre el norte geográfico y la proyección sobre el plano horizontal del vector normal a la superficie de un punto dado” (Santacana, 2001). Esta variable posee valores que van de 1° a 360° y valores de -1 que indican zonas planas (Tabla 7).

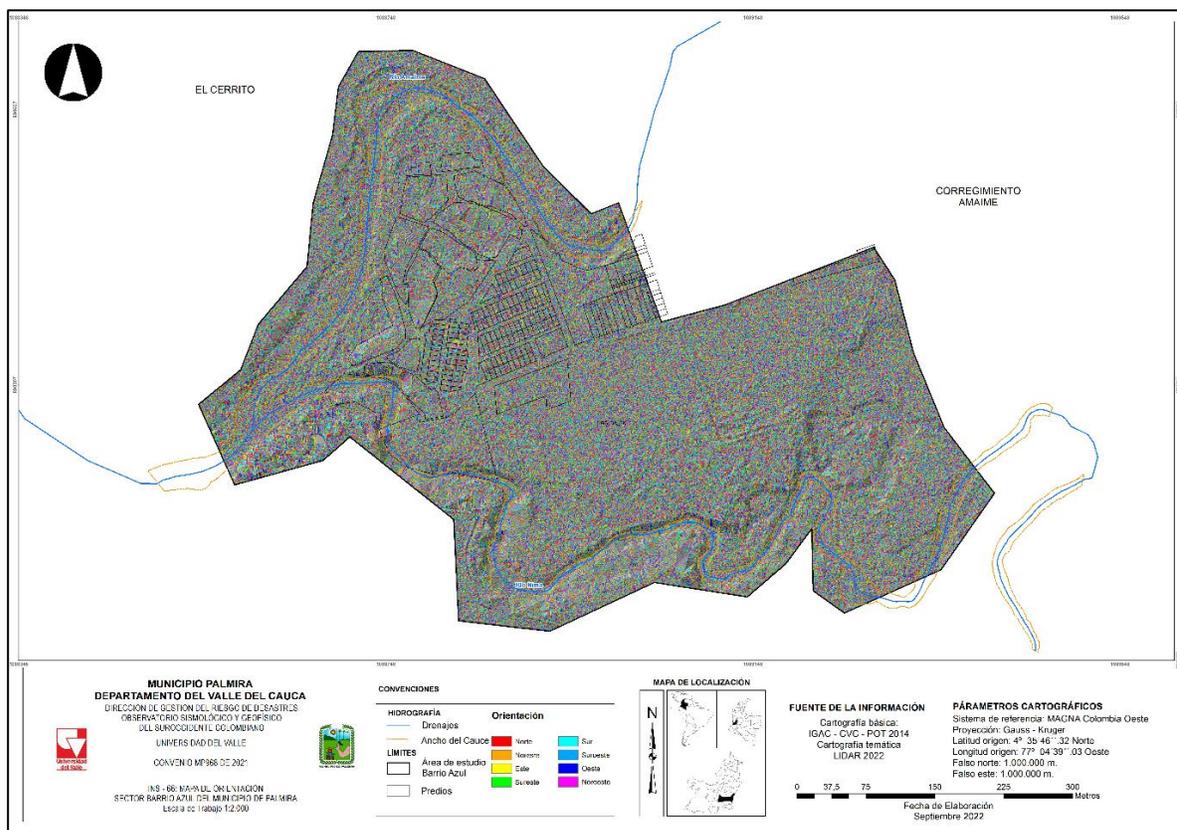
Según el ángulo de orientación de las laderas, se da el ángulo de incidencia de los rayos del sol, es decir en horas del mediodía los rayos del sol pueden tener una inclinación de aproximadamente 55°, lo que indica que la ladera recibe una radiación vertical, mientras que en el sombreado el ángulo de la pendiente es equivalente a 20°, siendo de esta manera más débil y escasa la cantidad de energía por unidad de superficie recibida, ya que la reflexión tiende a aumentar cuando el ángulo de incidencia disminuye.

**Tabla 7. Dirección de la ladera**

Clase	Rango (grados)	Dirección
0	-1	Plano
1	0 – 22,5	Norte
2	22,5 – 67,5	Noreste
3	67,5 – 112,5	Este
4	112,5 – 157,5	Sureste
5	157,5 – 202,5	Sur
6	202,5 – 247,5	Suroccidente
7	247,5 – 292,5	Occidente
8	292,5 – 337,5	Noroccidente
1	337,5 - 360	Norte

**Fuente:** ArcGIs

El mapa que representa la orientación de las laderas (Figura 62), ha sido generado a partir de los datos contenidos en el Modelo Digital del Terreno MDT, mediante la utilización del Sistema de Información Geográfica (SIG), el cálculo utiliza los datos de elevación, definiendo la dirección mediante una capa raster, expresado en grados, con base a los puntos cardinales, presentando tendencias de orientación SE, N – S, NE - SW, SE – S y NW el programa realiza los cálculos, permitiendo conocer la ubicación de las superficies que tienen mayor tiempo de luz solar al día.



**Figura 62. Orientación (INS-66)**

**Fuente:** Elaboración propia

## ▪ Unidades Geológicas Superficiales

Para la geología local y geología para ingeniería se hicieron visitas a campo y se verificó la información recopilada en oficina, estableciendo un levantamiento de datos estratigráficos, de comportamiento mecánico de los materiales, caracterización litología y rasgos estructurales relacionados con diaclasas, fallas y otros atributos.

Se definieron las Unidades Geológicas de Superficie teniendo en cuenta su origen: Roca (R) y Suelos (S) (Tabla 8); posteriormente se clasificaron según sus características litoestratigráficas (composición y estructura).

Suelos transportados aluviales: Los suelos transportados aluviales son aquellos que se han depositado en el fondo del cauce o en zonas adyacentes de un río o drenaje. En general, los suelos transportados de tipo aluvial evidencian en su registro geológico y sedimentológico el régimen de flujo y mecanismo de transporte al momento de la deposición

**Tabla 8.** Siglas de las unidades geológicas superficiales en el área de estudio

Unidad geológica superficial	Significado
(Sa)	Suelo antrópico
(St)	Suelo transportado

**Fuente:** Elaboración propia

El mapa realizado en este estudio (Figura 63), presenta diferentes unidades geológicas donde se identifican suelos transportados por diferentes agentes. En el mapa se visualiza que el área de estudio predomina los suelos transportados.





## ▪ Socavación lateral activa

Los procesos de socavación lateral tienen múltiples causas, tales como las condiciones geológicas, geomorfológicas, intervención antrópica y factores externos como las precipitaciones y los terremotos, los últimos, se consideran el estímulo que puede generar una respuesta casi inmediata de movilizar grandes volúmenes de material. Igualmente, la fecha y distribución de los deslizamientos permite analizar la propensión de la zona ante el fenómeno natural.

La urbanización modificó en algunos sectores la morfología del paisaje natural, generando nuevas formas y nuevos procesos que modifican el terreno y que se convierten en amenazas para sus habitantes generando procesos de socavación lateral.

Según la geomorfología, en la zona de barrio Azul, corregimiento de Amaime en el municipio de Palmira se han presentado 5 socavaciones. A continuación, en la Figura 65 se muestra la distribución de cada una de las socavaciones.

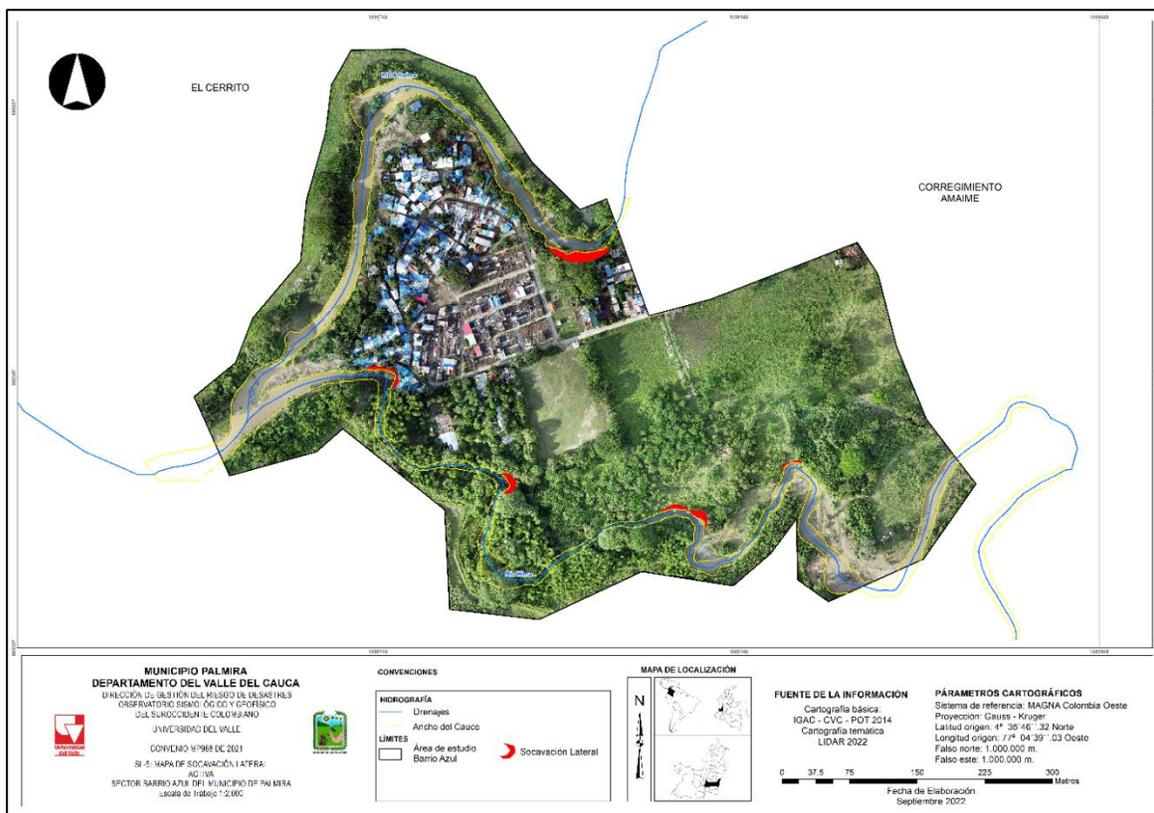


Figura 65. Socavación lateral activa (SL-5)

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 10 se muestran los resultados del método WofE, tomando como factor condicionante la capa de pendiente del terreno. En estas tablas se relacionan los datos obtenidos de la superposición de la socavación lateral con las clases del factor condicionante, se calculan las estadísticas, los pesos positivos y negativos, las densidades del método y los pesos finales o contraste.

**Tabla 10.** Categorización de la variable pendiente

Convención	# Píxeles movimiento	% Movimiento	# Píxeles clase	% Clase	Npix 1	Npix 2	Npix 3	Npix 4	Wi +	Wi -	Wf
Plano	5	0.86	17683 682	21.4 9	5	576	176836 77	646150 00	- 3.2176 00	0.2332 65	- 3.4508 65
Inclinado	8	1.38	22527 874	27.3 7	8	573	225278 66	597708 08	- 2.9897 07	0.3059 73	- 3.2956 80
Moderadamente Abrupto	20	3.44	15120 824	18.3 7	20	561	151208 04	671778 58	- 1.6747 35	0.1679 81	- 1.8427 16
Abrupto	167	28.74	63566 12	7.72	167	414	635644 5	759420 70	1.3141 27	- 0.2585 03	1.5726 29
Muy Abrupto	279	48.02	74437 4	0.9	279	302	744095	815543 08	3.9723 99	- 0.6452 41	4.6176 40
Extremadamente Abrupto	92	15.83	59015	0.07	92	489	58923	822396 67	5.3989 16	- 0.1716 72	5.5705 88
Suavemente Inclinado	10	1.72	19806 882	24.0 7	10	571	198068 72	624918 00	- 2.6378 40	0.2579 58	- 2.8957 98

Fuente: elaboración propia

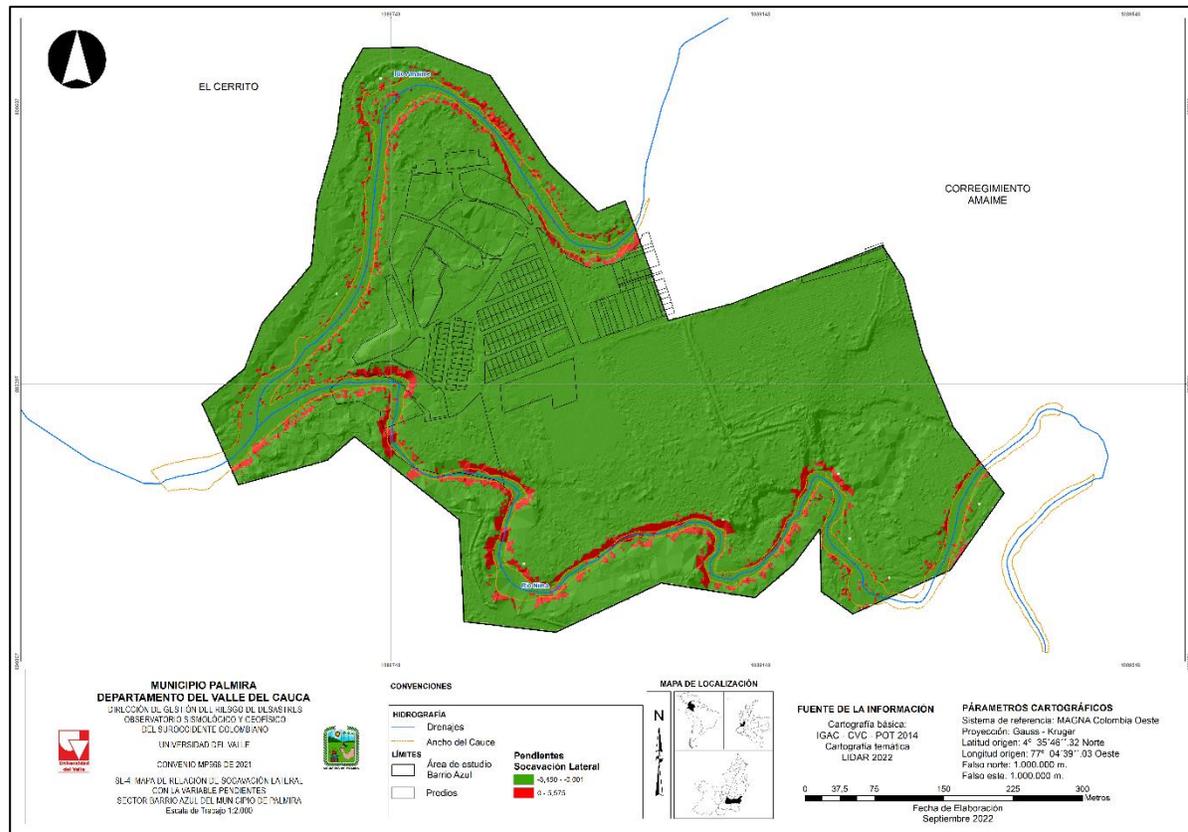
A partir del método Bivariado, se establecen las áreas que podrían ser propensas a experimentar susceptibilidad frente a este fenómeno. La variable movimientos, se utiliza como variable de agrupamiento para el análisis estadístico e indica la presencia o ausencia de movimientos previos, permitiendo constituir las relaciones estadísticas con cada una de las variables condicionantes, es decir, muestra las evidencias de movimientos pasados a partir de los cuales es posible establecer la predicción de ocurrencia espacial del fenómeno. Los valores negativos indican poca o nula predisposición del factor a generar deslizamientos, y los valores positivos revelan la posibilidad que se dé este evento. Este proceso se hace para cada una de las cinco (5) variables que se tienen en cuenta como factor determinante para generar socavación lateral. Tabla 11, enseña los rangos obtenidos al cruzar la variable movimientos con cada una de las variables condicionantes.

**Tabla 11.** Resultado de la sumatoria de los factores determinantes con la variable movimientos

Variables	Rango en pesos
Modelo digital de elevación (DEM)	-5.061 a 1.513
Pendiente	-3.450 a 5.575
Orientación de las laderas	-2.069 a 0.951
Unidades geológicas superficiales	-1.839 a 0.971
Geomorfología	-2.254 a 3.243

**Fuente:** Elaboración propia

De acuerdo con la metodología usada, cada variable se cruzó por separado con los movimientos ocurridos en el área de estudio, estos cruces dan como resultado los mapas de pesos  $W_f$ . A cada conjunto de celdas que representa una variable determinada le corresponde el mismo número de celdas que representa el peso de esa categoría. En la Figura 66 se muestra el ejemplo del mapa  $w_f$  de la variable pendiente. En el Anexo 1 se puede ver las otras variables reclasificadas.



**Figura 66.** Relación de la socavación lateral con la variable pendiente (SL-4)

**Fuente:** Elaboración propia.

Una vez obtenidos todos los factores  $W_f$  (a partir de la resta entre los  $W_f^+$  y los  $W_f^-$ ), se suman las variables para obtener el grado o Índice de Susceptibilidad por socavación lateral o de la tierra (LSI por sus siglas en inglés (Land Susceptibility Index)), obteniendo así el Mapa de Susceptibilidad. A continuación, se presenta la sumatoria o ecuación que se aplicará según la siguiente expresión.

$LSI = W_fDEM + W_fPendiente + W_fOrientación \text{ de la ladera} + W_fUnidades \text{ geológicas superficiales} + W_fGeomorfología$

Se establecieron diferentes rangos y se determinó la curva de éxito para poder validar el modelo. Se establecieron 4 rangos (ver Tabla 12) y se determinó un porcentaje de área bajo la curva de 75.9 (Figura 67), con la cual, se valida el modelo de susceptibilidad por socavación lateral (Figura 68), dado que es mayor al 70%.

Tabla 12. Rangos y porcentaje del área bajo la curva

SUSCEPTIBILIDAD										
Rangos	Categorías	# Pixeles Movimiento	% Movimiento	# Pixeles Rangos	% Rangos	% Acumulado de Movimientos	% Acumulado de Rangos	% Acumulado de Rangos	% Acumulado de Rangos	% Área bajo la curva
						0.00	0%	0.00	0%	0.00
9.11458_3.4179	Muy Alta	23	13.07	953	2.03	13.07	13%	2.03	2%	0.13
3.4179_0.4829	Alta	78	44.32	7066	15.08	57.39	57%	17.12	17%	5.31
-0.4829_-1.40	Media	33	18.75	5548	11.84	76.14	76%	28.96	29%	7.91
-1.40_+6.50	Baja	42	23.86	33284	71.04	100.00	100%	100.00	100%	62.57
<b>TOTAL</b>		<b>176</b>		<b>46851</b>		Y		X		<b>75.9</b>

Fuente: Elaboración propia.

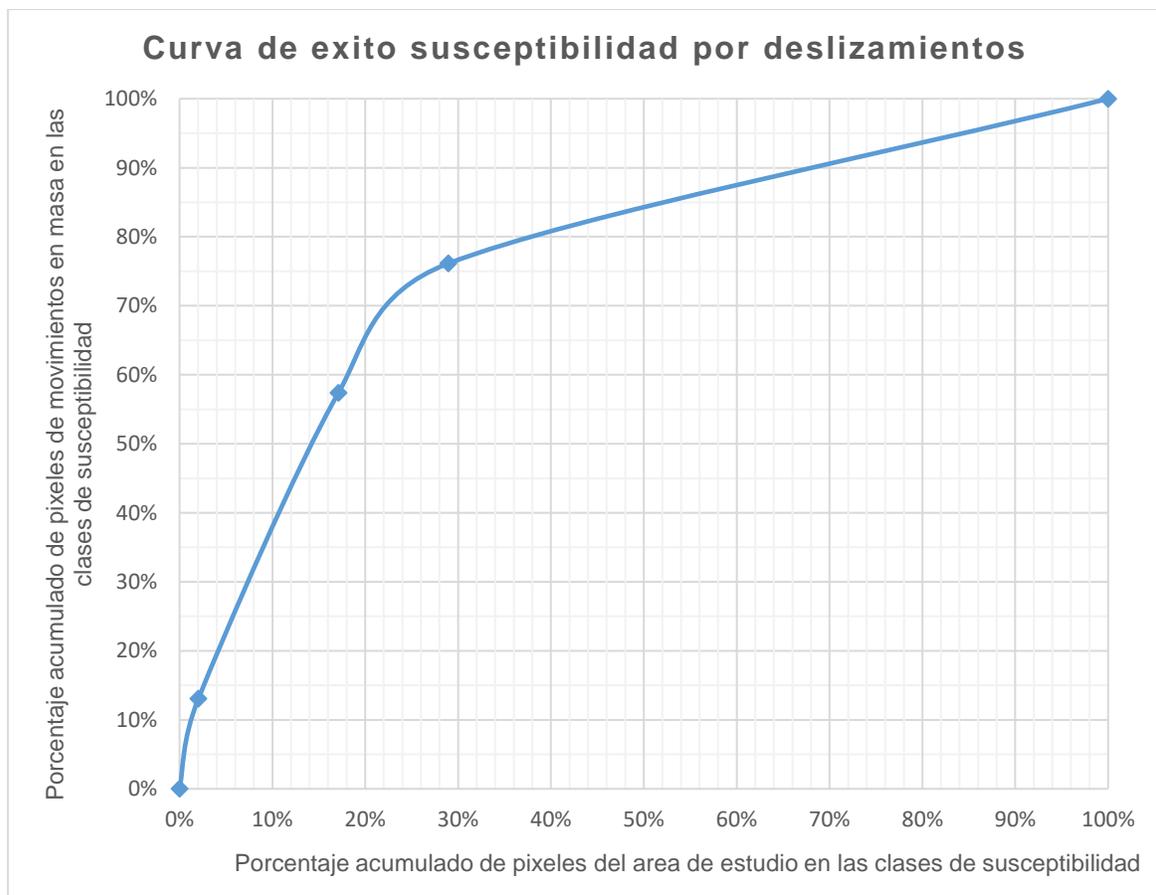


Figura 67. Curva de éxito susceptibilidad por socavación lateral

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se presenta la susceptibilidad por socavación lateral.

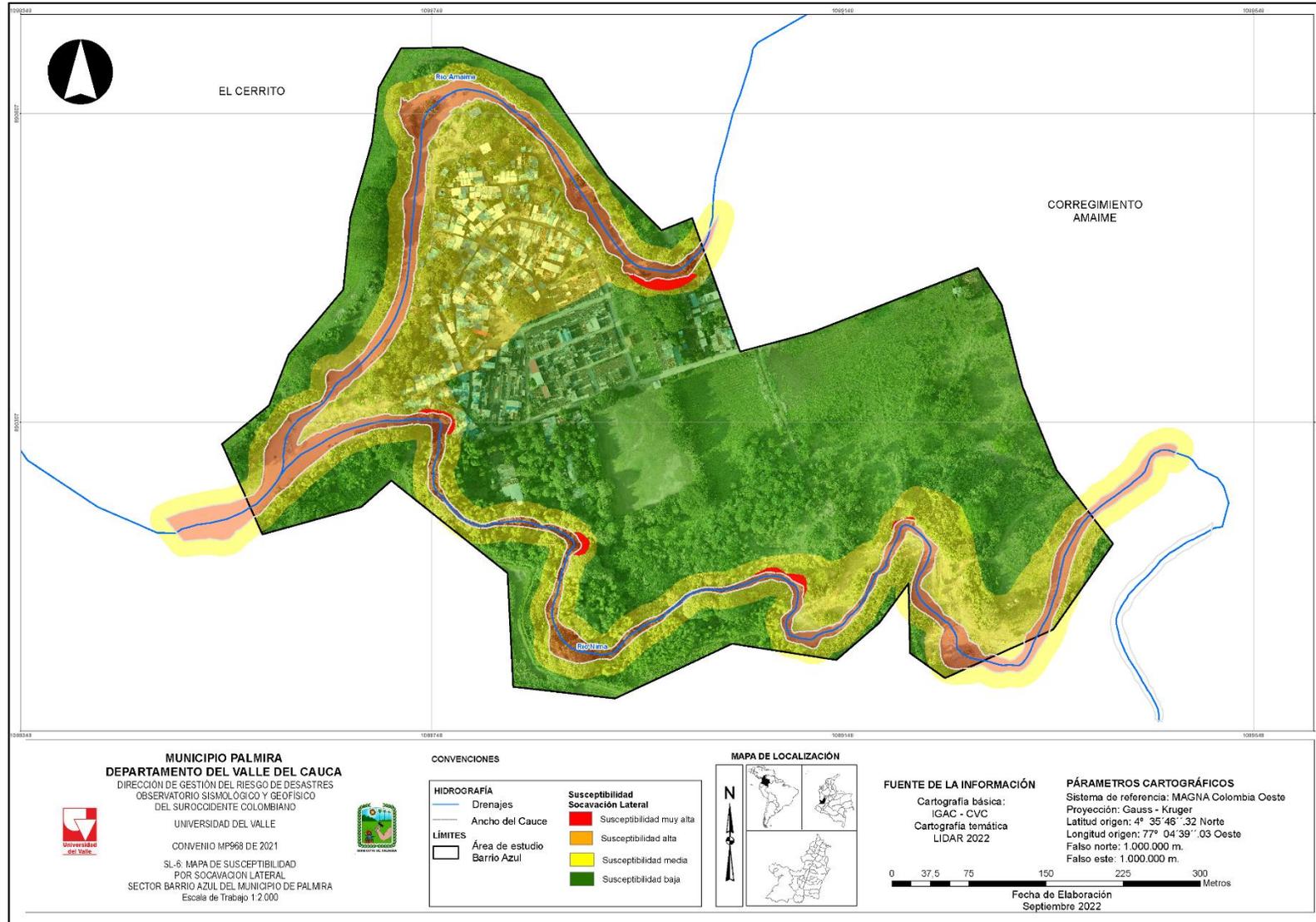
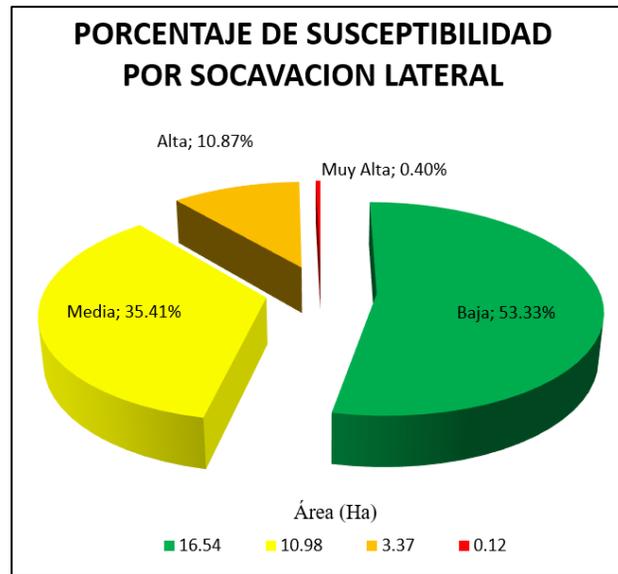


Figura 68. Susceptibilidad por socavación lateral (SL-6)

Fuente: Elaboración propia.



**Figura 69.** Porcentaje de susceptibilidad por socavación lateral  
**Fuente:** Elaboración propia.

En el mapa de susceptibilidad, se presentan las zonas propensas a socavación lateral en las categorías muy alta, alta, media y baja para barrio Azul, corregimiento de Amaime en el municipio de Palmira (Figura 68), las cuales son descritas a continuación:

- **Susceptibilidad muy alta:**

En general, los efectos que se esperan en estas zonas (susceptibilidad muy alta) son los más catastróficos e implicarían una mayor intervención, control y/o recuperación en caso que se presente el evento. La susceptibilidad muy alta hace referencia a los procesos morfodinámicos activos y se presentan mayormente en el río Nima del área de estudio con un porcentaje de 0.40 %.

- **Susceptibilidad alta:**

En susceptibilidad alta, se encuentran las zonas con condiciones favorables a la ocurrencia de procesos de inestabilidad relacionados con socavación lateral y zonas afectadas, aunado a las características litológicas en el área, geomorfología y las pendientes que caracterizan la banca de los ríos. Nótese que la susceptibilidad alta abarca una proporción de 10.87 % dentro de la zona de estudio.

- **Susceptibilidad media:**

En conclusión, esta categoría de susceptibilidad comprende aproximadamente el 35.41% del área de estudio.

- **Susceptibilidad baja:**

Zonas con mínimas o ninguna condición favorable a la inestabilidad, en otras palabras, el potencial de ocurrencia de la socavación es bajo. Algunas de estas pueden ser susceptibles a procesos de inundación localizadas. Como se muestra en la Figura 69, la susceptibilidad baja por socavación lateral se presenta en el 53.33 % del área de estudio.

## 6.4.Exploración geotécnica y ensayos de laboratorio

La exploración geotécnica y ensayos de laboratorio es un insumo para determinar los análisis de estabilidad de las bancas (falla geotécnica) y la socavación lateral por hidráulica fluvial de los ríos Amaime y Nima, la consistió en la ejecución de cuatro (4) perforaciones SPT a una profundidad de 10m, cinco (5) apiques a una profundidad de 2m y tres (3) líneas sísmicas a una profundidad de 30m. A continuación, se relaciona los resultados de las exploraciones y sus ensayos de laboratorio.

### 6.4.1. Perforación SPT

Se llevó a cabo el día 04 de marzo del 2022, la investigación del subsuelo que consistió en tres (3) sondeos (Tabla 13 y Figura 70): un (1) sondeo a diez (10,00) metros, un (1) sondeo a seis (6,00) metros, un (1) sondeo a ocho con cincuenta (8,50) metros.

**Tabla 13** Relación de las perforaciones realizadas, coordenadas (geográficas)

Sondeo	Coordenadas Gps	
	Latitud	Longitud
1	3°36'20.6"N	76°16'39.2"W
2	3°36'18.5"N	76°16'37.5"W
3	3°36'14.2"N	76°16'43.2"W

Fuente: Elaboración propia

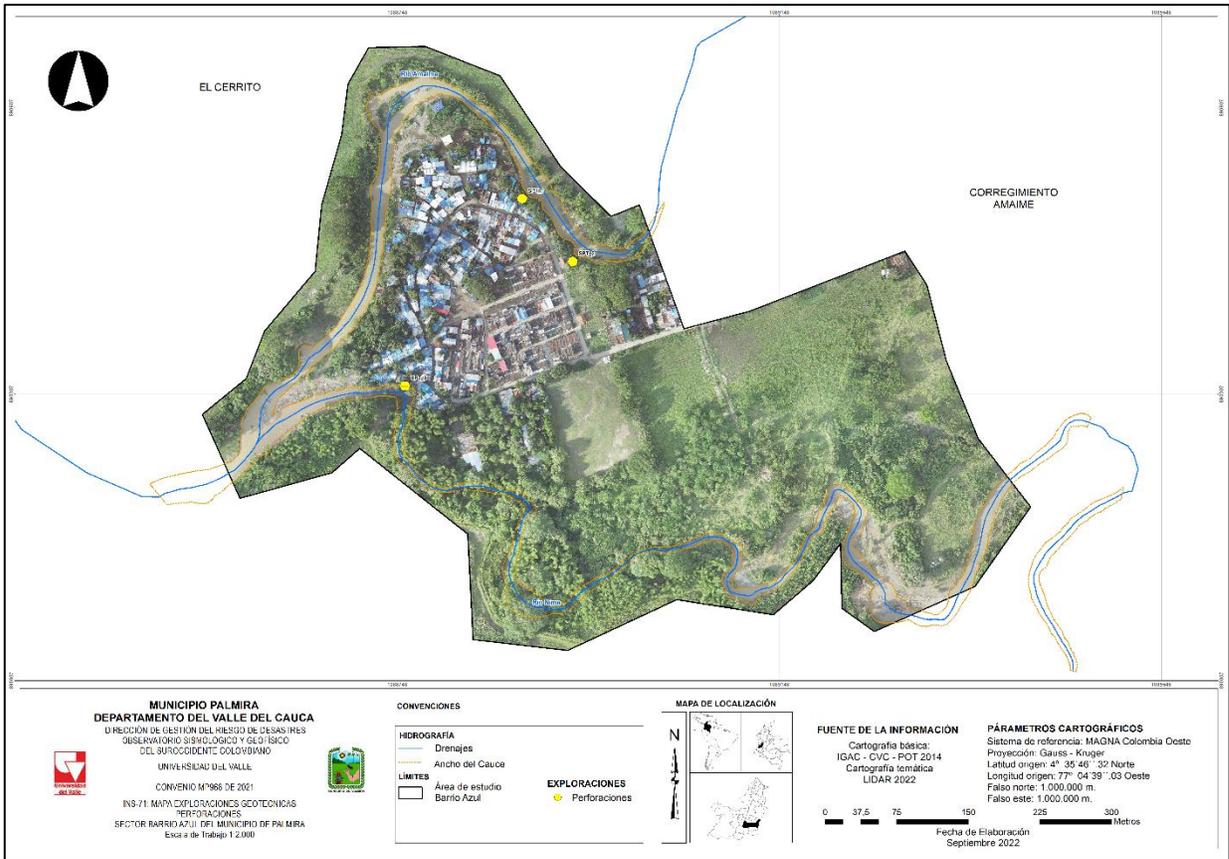


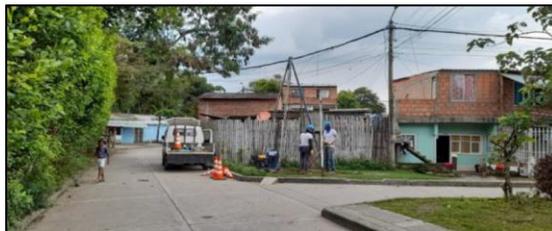
Figura 70. Exploraciones geotécnicas – Perforaciones SPT (INS-71)  
 Fuente: Elaboración propia



Sondeo 1



Sondeo 2



Sondeo 3

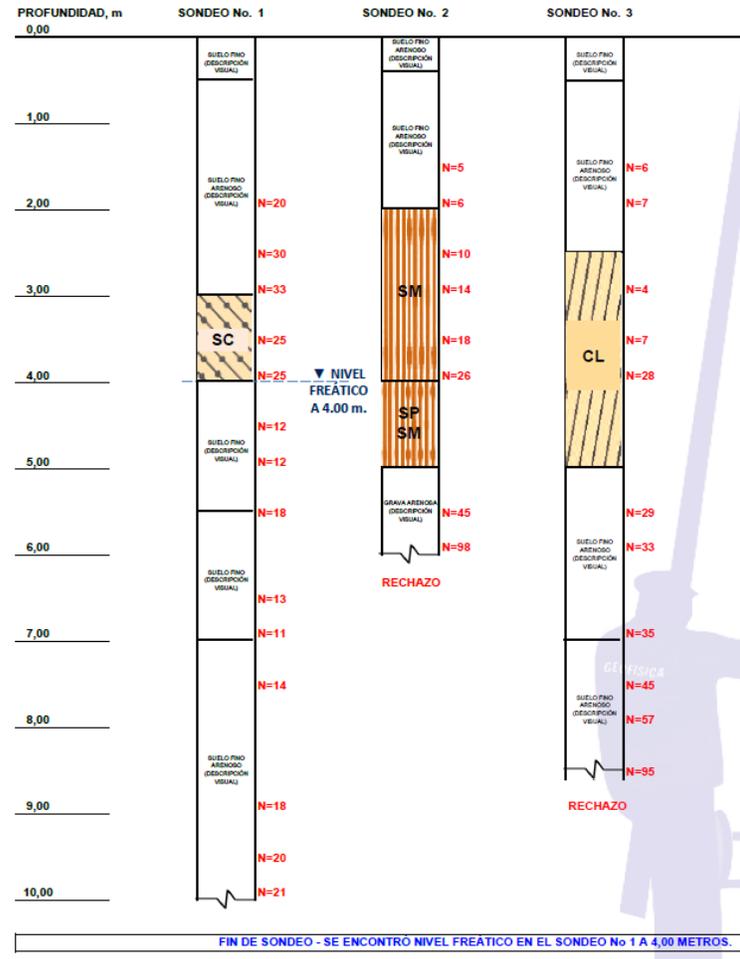


Figura 71 Perfil estratigráfico de los sondeos

Fuente: Elaboración propia

En el Sondeo No. 1, hasta una profundidad de 1,50 metros, se encuentra suelo fino (descripción visual), de 1,50 a 3,00 metros, se encuentra suelo fino arenoso (descripción visual), de 3,00 a 4,00 metros, se encuentra arena arcillosa (SC), de 4,00 a 7,00 metros, se encuentra suelo fino (descripción visual), de 7,00 a 10,00 metros, se encuentra suelo fino arenoso (descripción visual), Fin del Sondeo. Se encontró nivel freático a 4,00 metros (Figura 71).

En el Sondeo No. 2, hasta una profundidad de 2,00 metros, se encuentra suelo fino arenoso (descripción visual), de 2,00 a 4,00 metros, se encuentra arena limosa (SM), de 4,00 a 5,00 metros, se encuentra arena mal gradada limosa (SP-SM), de 5,00 a 6,00 metros, se encuentra grava arenosa (descripción visual), Rechazo. Fin del Sondeo. No se encontró nivel freático (Figura 71).

En el Sondeo No. 3, hasta una profundidad de 0,50 metros, se encuentra suelo fino (descripción visual), de 0,50 a 2,50 metros, se encuentra suelo fino arenoso (descripción



Con el ánimo de estimar los parámetros de resistencia al corte de los materiales, se realizaron ensayos de corte directo sobre muestras de suelo, recuperadas en las perforaciones y apiques realizados. Este ensayo se realizó para condiciones pico, lo que permitió obtener una envolvente residual para así estimar los parámetros de resistencia en estado crítico. Se realizaron sobre muestras de suelo a nivel superficial (2 a 4 metros de profundidad), incluyendo la estimación de los parámetros de resistencia del suelo (cohesión y ángulo de fricción interna). Este ensayo se realizó para tres niveles de esfuerzos, cada uno a través de tres etapas: saturación, consolidación y falla.

Los formatos de ejecución de los ensayos se presentan en los anexos. A manera de ejemplo, en la Figura 72 se presentan los resultados de uno de los cortes realizados.

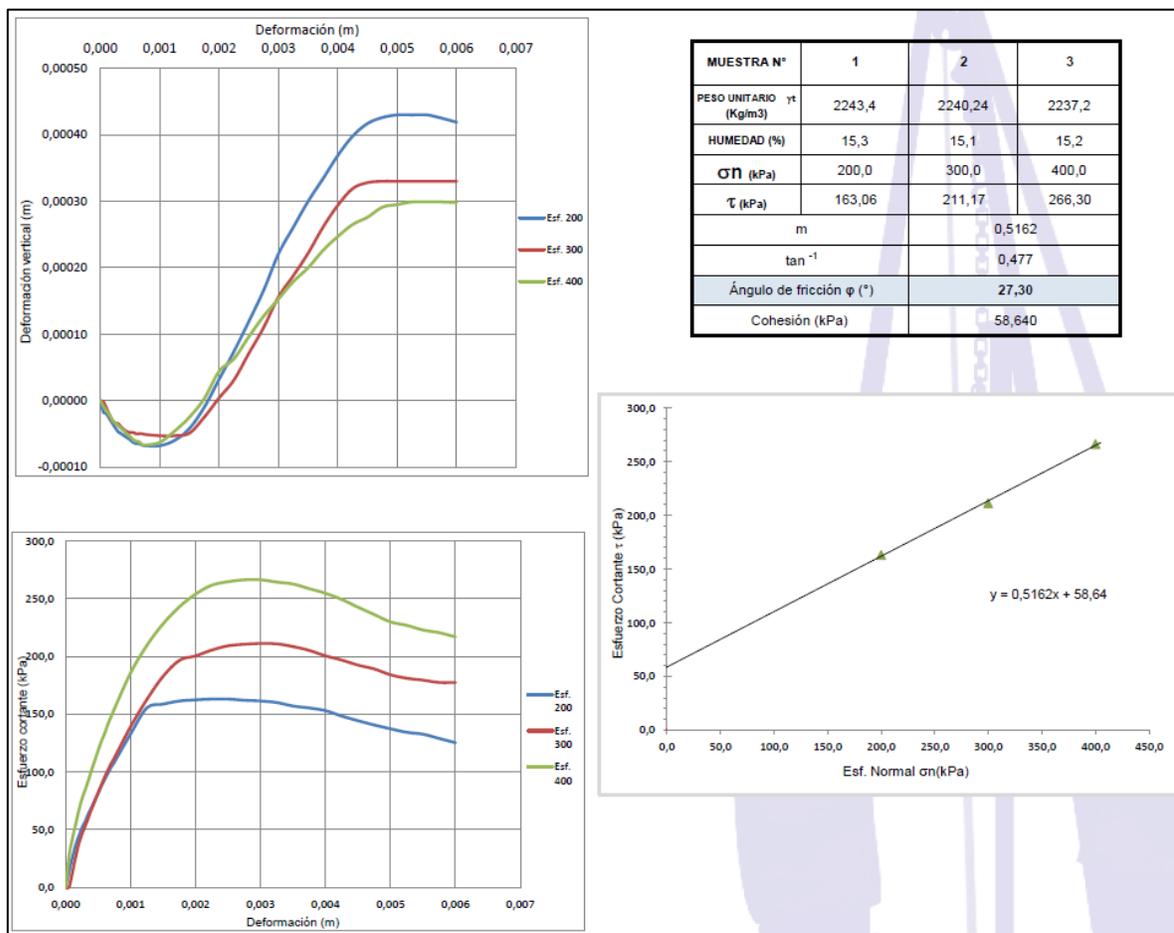


Figura 72 Gráficas esfuerzo-deformación pico (izq) y cohesión\_ángulo de fricción (der) obtenidas del ensayo de corte directo sobre la Muestra M2 de la Perforación P-02.

Fuente: Elaboración propia

## Ensayo de Compresión Inconfinada



Apique	Coordenadas Gps	
	Latitud	Longitud
1	3°36'15.9"N	76°16'44.2"W
2	3°36'19.0"N	76°16'34.7"W
3	3°36'23.5"N	76°16'41.5"W
4	3°36'11.7"N	76°16'39.9"W

Fuente: Elaboración propia

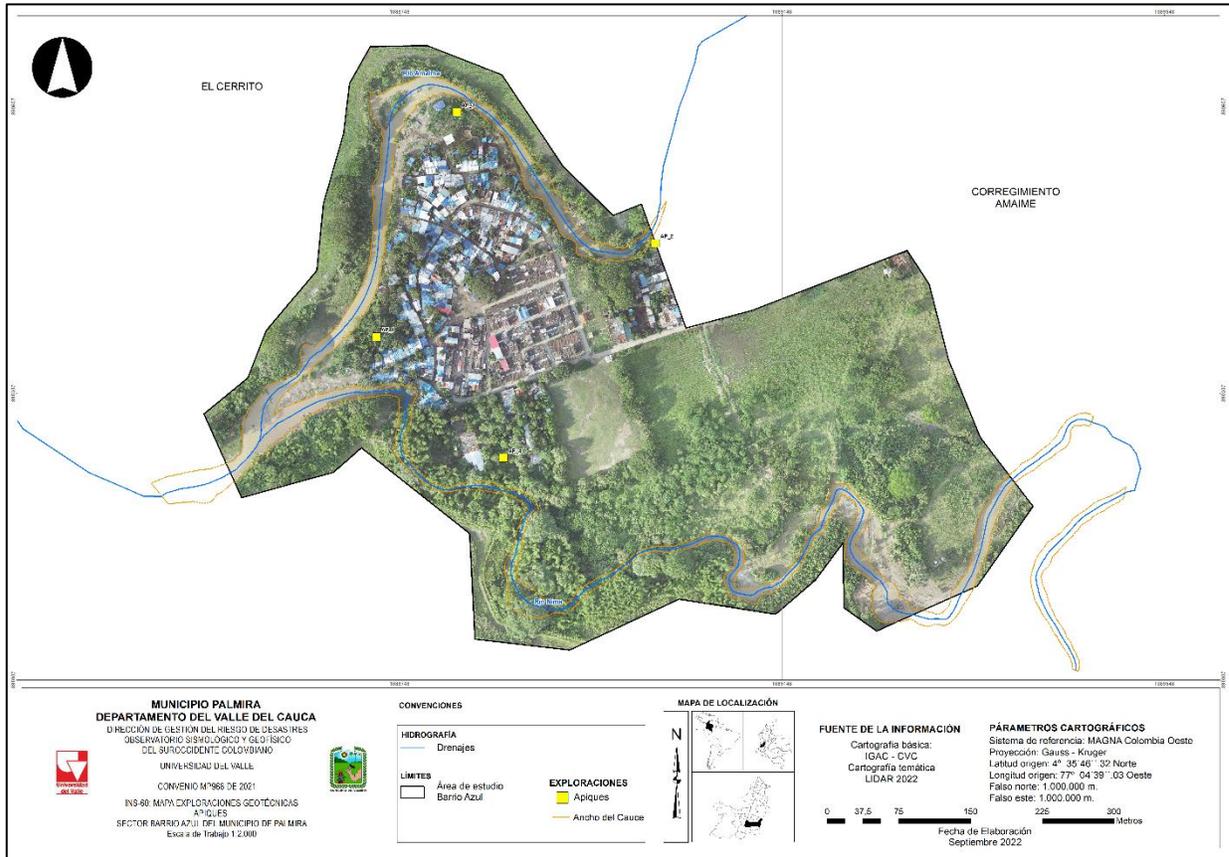


Figura 73. Exploraciones geotécnicas – Apiques (INS-60)

Fuente: Elaboración propia



Apique 1



Apique 2





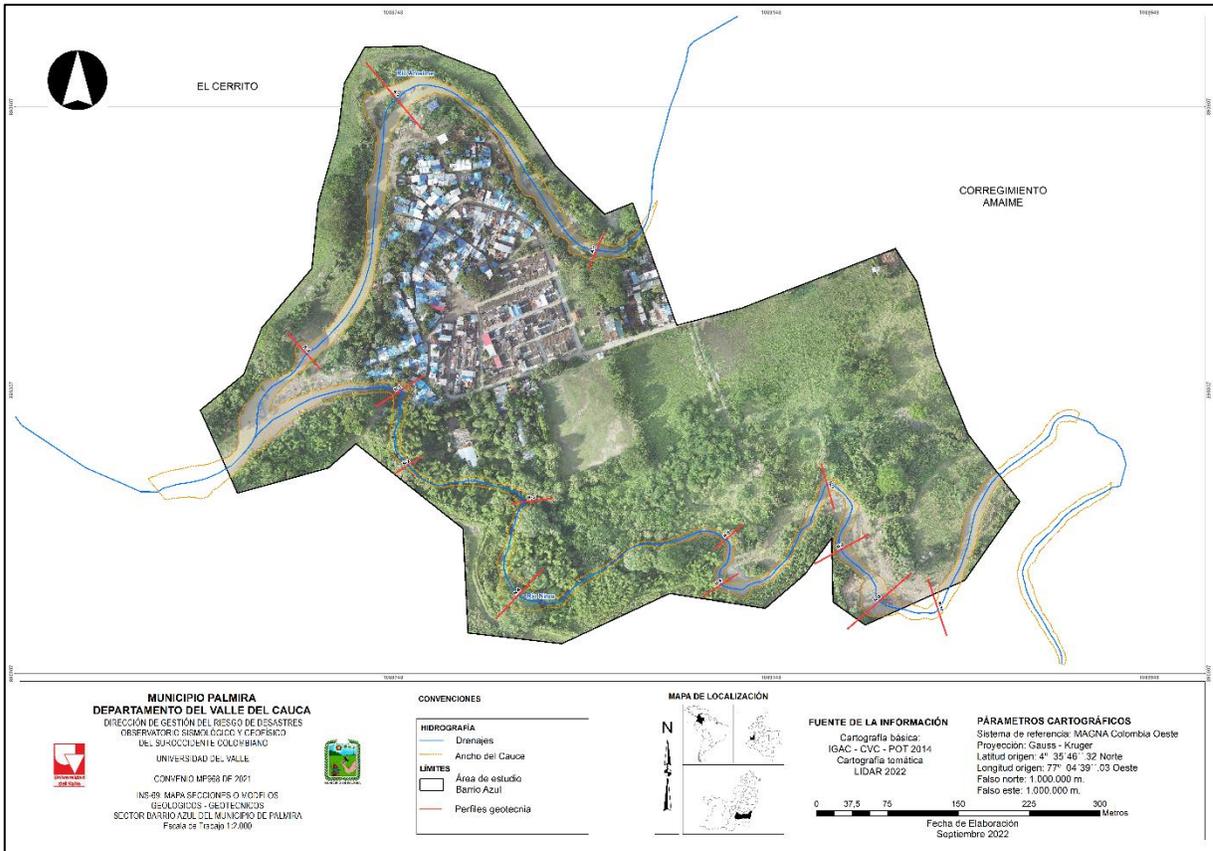


Figura 75. Secciones o modelos geológicos – geotécnicos (INS-69)

Fuente: Elaboración propia.

Los perfiles obtenidos en los análisis se muestran en la Figura 76 a la Figura 79.

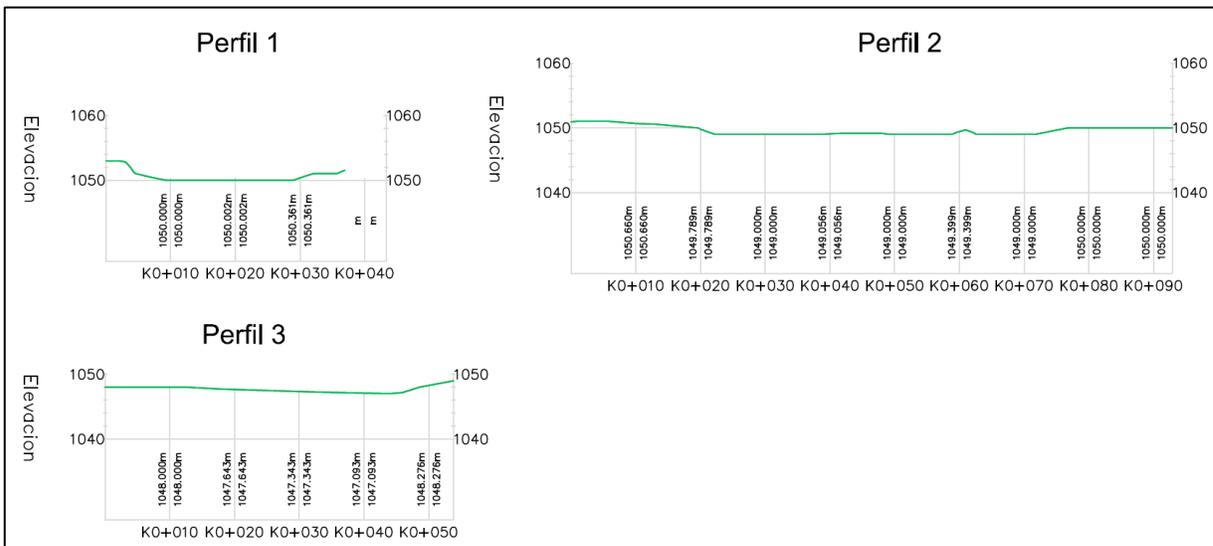


Figura 76. Perfiles transversales del río Amaime utilizados en la modelación

Fuente: Elaboración propia.

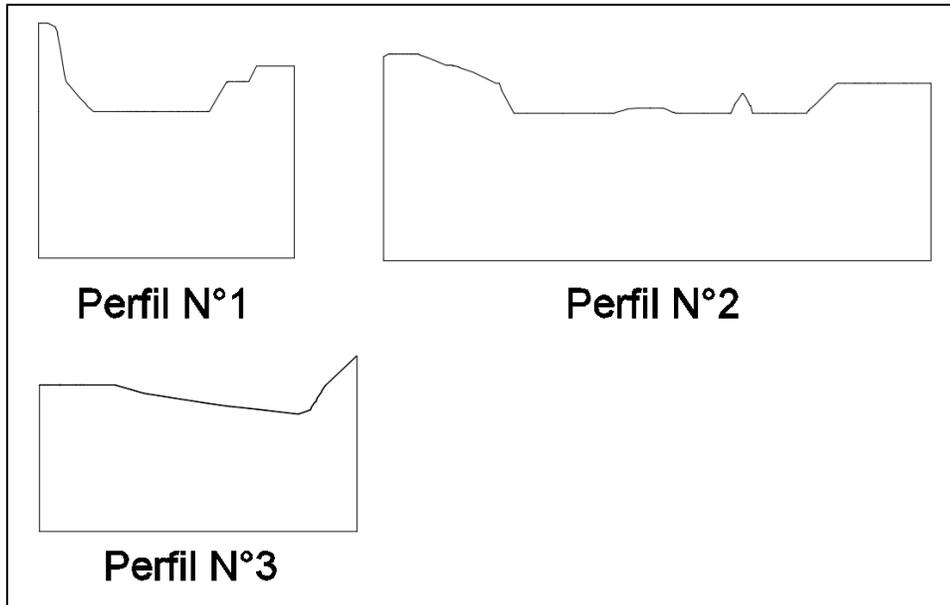


Figura 77. Perfiles transversales del río Amaime escalados 5 veces en el eje vertical

Fuente: Elaboración propia.

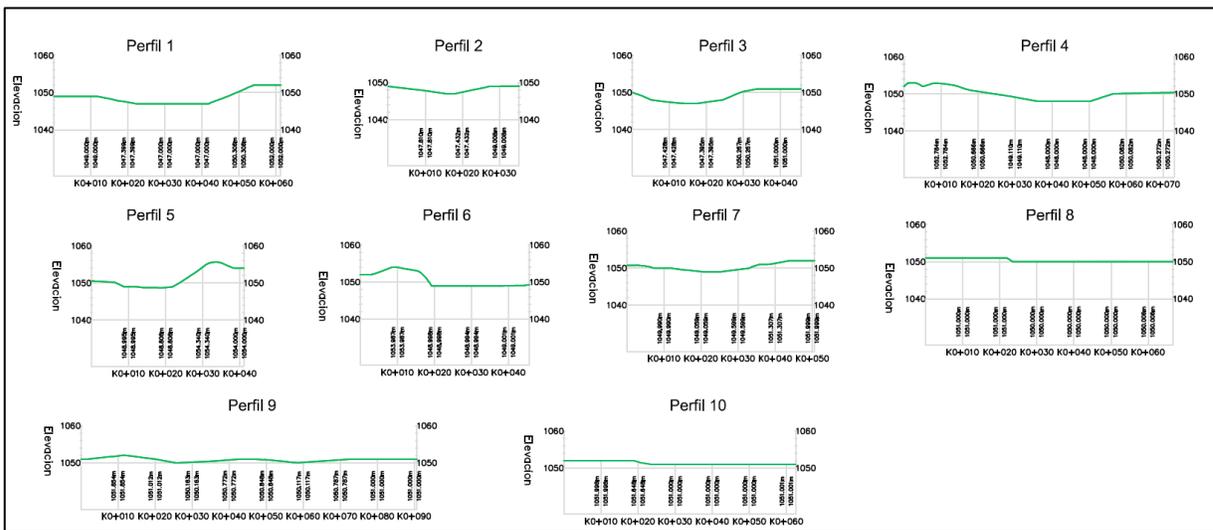
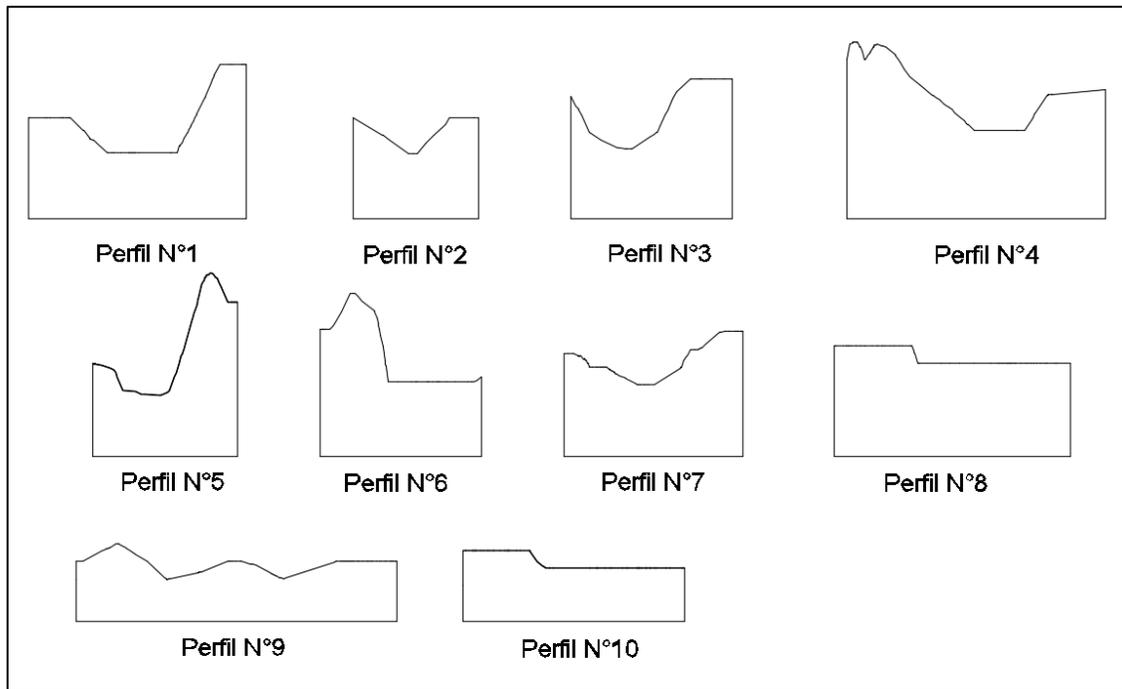


Figura 78. Perfiles transversales del río Nima utilizados en la modelación

Fuente: Elaboración propia.



**Figura 79.** Perfiles transversales del río Nima escalados 5 veces en el eje vertical

**Fuente:** Elaboración propia.

A continuación, se presentan las propiedades geotécnicas y los cálculos para un periodo de retorno de 100 años.

**Tabla 18.** Características geotécnicas de los materiales en el río Amaime

Periodo de retorno 100 años											
Punto	Coordenadas		Propiedades Geotécnicas								
			SUCS	w (%)	Y (kN/m <sup>3</sup> )	Y <sub>sat</sub> (kN/m <sup>3</sup> )	C (kN/m <sup>2</sup> )	F <sub>i</sub>	D <sub>50</sub> (m)	G <sub>s</sub>	
1	1088953.86	890440.40	SM	15,4	17,7	20,6	1	31	0,052	2,698	
2	1088766.97	890600.54	CH	21,6	17,2	20,8	20	27	0,010	2,787	
3	1088663.57	890338.55	ML	19,0	17,2	20,8	15	28	0,020	2,650	

**Fuente:** Elaboración propia.

**Tabla 19.** Esfuerzo crítico de los materiales en la banca del cauce en el río Amaime

Punto	Ángulo de inclinación promedio de la banca del cauce	Esfuerzo crítico T <sub>c</sub> (Pa)
1	30	6,11
2	15	3,59
3	17	6,59

**Fuente:** Elaboración propia.

**Tabla 20.** Esfuerzo cortante de los materiales en la banca del cauce en el río Amaime

Punto	ALTURA MAXIMA DE LAMINA DE AGUA (Hmax) [m]	TR 100	n	C <sub>r</sub>	Velocidad crítica (m/s)	Velocidad promedio superior a la crítica (m/s)	Esfuerzo crítico T <sub>b</sub> (Pa)
1	3.591			0.0157	0.66	1.18	14.36
2	3.260		0.035	0.0162	0.50	0.90	8.68
3	3.230			0.0163	0.68	1.22	15.94

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 21.** Características geotécnicas de los materiales en el río Nima

Periodo de retorno 100 años										
Punto	Coordenadas		Propiedades Geotécnicas							
			SUCS	w (%)	Y (kN/m <sup>3</sup> )	Y <sub>sat</sub> (kN/m <sup>3</sup> )	C (kN/m <sup>2</sup> )	F <sub>i</sub>	D <sub>50</sub> (m)	G <sub>s</sub>
1	1088766.35	890312.55	SC	14,9	17,2	20,0	5	29	0,071	2,688
2	1088766.01	890228.48	SC	14,9	17,2	20,0	5	34	0,071	2,688
3	1088893.83	890189.61	SC	10,4	17,0	19,8	5	34	0,071	2,521
4	1088891.10	890099.98	SC	16,2	16,3	19,2	5	34	0,071	2,650
5	1089103.13	890151.92	SC	16,2	16,3	19,2	5	34	0,071	2,650
6	1089098.82	890103.66	CL	10,4	17,0	19,2	12	13	0,018	2,521
7	1089205.24	890208.34	CL	20,8	16,4	19,2	12	13	0,018	2,636
8	1089229.63	890143.06	CL	18,3	16,5	19,2	12	13	0,018	2,759
9	1089275.94	890093.79	CL	18,3	16,5	19,2	12	13	0,018	2,759
10	1089322.41	890086.35	CL	20,8	16,4	19,2	12	16	0,018	2,636

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 22.** Esfuerzo crítico de los materiales en la banca del cauce en el río Nima

Punto	Ángulo de inclinación promedio de la banca del cauce	Esfuerzo crítico T <sub>c</sub> (Pa)
1	18	24,57
2	10	36,88
3	24	23,99
4	13	34,72
5	30	16,98
6	9	2,18
7	6	2,89
8	7	2,95
9	7	2,95
10	8	3,50

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 23.** Esfuerzo cortante de los materiales en la banca del cauce en el río Nima

Punto	ALTURA MAXIMA DE LAMINA DE AGUA (Hmax) [m]	TR 100	n	C <sub>r</sub>	Velocidad crítica (m/s)	Velocidad promedio superior a la crítica (m/s)	Esfuerzo crítico T <sub>b</sub> (Pa)
1	3.380			0.0160	1.32	2.38	59.42
2	2.521			0.0177	1.54	2.78	89.20
3	1.357			0.0217	1.13	2.03	58.71
4	3.201			0.0163	1.60	2.88	88.61
5	2.378		0.035	0.0180	1.07	1.92	43.34
6	1.877			0.0195	0.36	0.65	5.33
7	2.172			0.0186	0.43	0.78	7.33
8	1.805			0.0197	0.42	0.76	7.43
9	3.617			0.0157	0.47	0.85	7.43
10	2.381			0.0180	0.48	0.87	8.87

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 24.** Tasa de erosión en las bancas de los cauces de los ríos Amaime y Nima

Río Amaime				Río Nima			
Punto	K <sub>d</sub>	T <sub>b</sub> - T <sub>c</sub> (Pa)	ε (m/s)	Punto	K <sub>d</sub>	T <sub>b</sub> - T <sub>c</sub> (Pa)	ε (m/s)
1	8.09E-08	8.25E+00	6.67E-07	1	4.03E-08	34.85	1.41E-06
2	1.06E-07	5.09E+00	5.38E-07	2	3.29E-08	52.31	1.72E-06
3	7.79E-08	9.35E+00	7.28E-07	3	4.08E-08	34.71	1.42E-06
				4	3.39E-08	53.89	1.83E-06
				5	4.85E-08	26.36	1.28E-06
				6	1.35E-07	3.15	4.27E-07
				7	1.18E-07	4.44	5.22E-07
				8	1.16E-07	4.49	5.22E-07
				9	1.16E-07	4.49	5.22E-07
				10	1.07E-07	5.37	5.75E-07

Fuente: Elaboración propia.

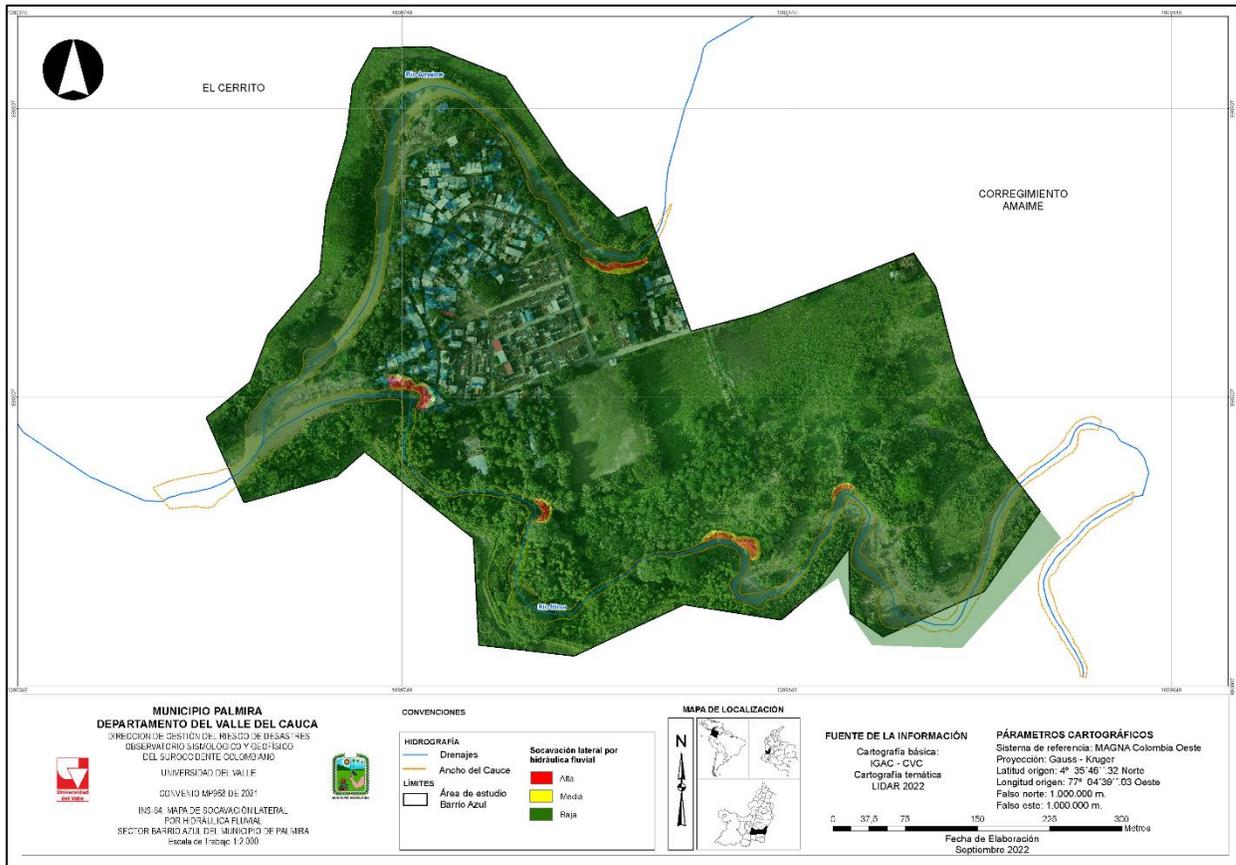
**Tabla 25.** Longitud de erosión lateral del cauce de los ríos Amaime y Nima

Río Amaime			Río Nima		
Punto	Δt (s)	LE (m)	Punto	Δt (s)	LE (m)
1	62712	0.0418	1	63180	0.089
2	67572	0.0363	2	70992	0.122
3	68940	0.0502	3	60192	0.085
			4	64980	0.119
			5	57348	0.073
			6	57816	0.025
			7	59652	0.031
			8	63072	0.033

Río Amaime		Río Nima	
	9	63576	0.033
	10	71784	0.041

Fuente: Elaboración propia.

Después de obtener la longitud y está al ser mayor a 0, nos dice que se va a presentar socavación lateral en los puntos de interés. A continuación, en la Figura 80 se presenta la socavación lateral por hidráulica fluvial en Barrio Azul.



**Figura 80.** Socavación lateral por hidráulica fluvial (INS-64)

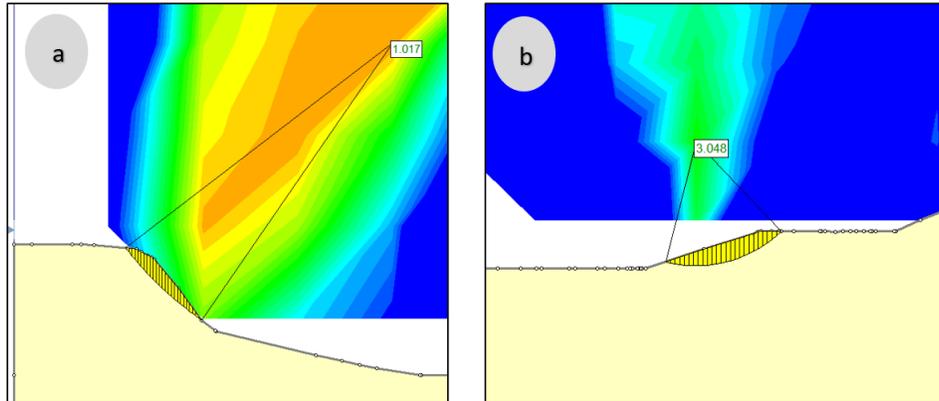
Fuente: Elaboración propia

## 6.6. Análisis de estabilidad

A partir del MDT y las propiedades geotécnicas obtenidas en el trabajo de campo mediante apiques y toma de muestras de suelo en las márgenes, se determinó la estabilidad de las bancas derecha e izquierda de los cauces de los ríos Amaime y Nima usando la herramienta computacional SLIDE.

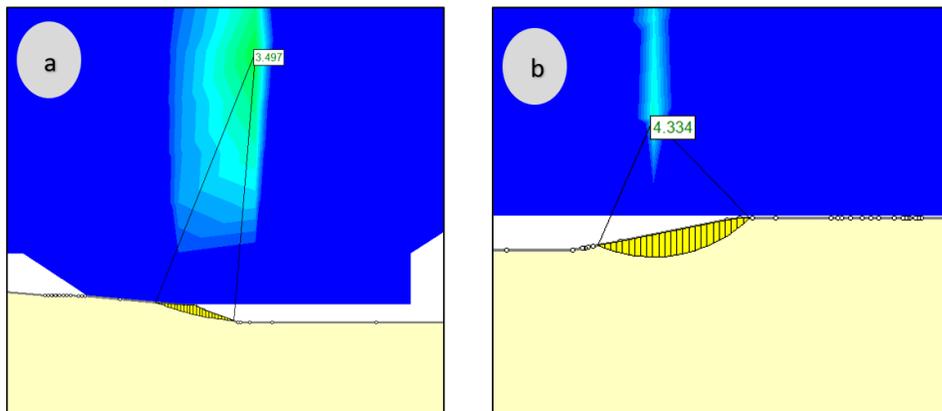
En la Figura 81 a la Figura 93 se muestran respectivamente los resultados del factor de seguridad por equilibrio límite obtenidos en las banquetas de los cauces de los ríos Amaime y Nima.

### Perfiles modelación río Amaime



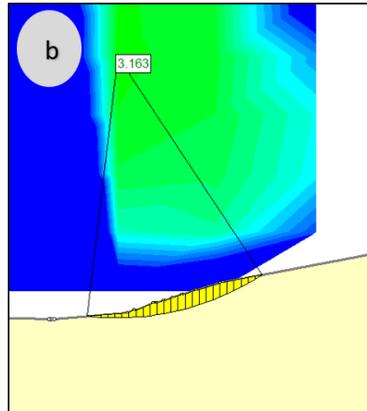
**Figura 81.** Perfil 1 de modelación para el río Amaime. Factor de seguridad por equilibrio límite: a) banca izquierda, b) banca derecha

**Fuente:** Elaboración propia



**Figura 82.** Perfil 2 de modelación para el río Amaime. Factor de seguridad por equilibrio límite: a) banca izquierda, b) banca derecha

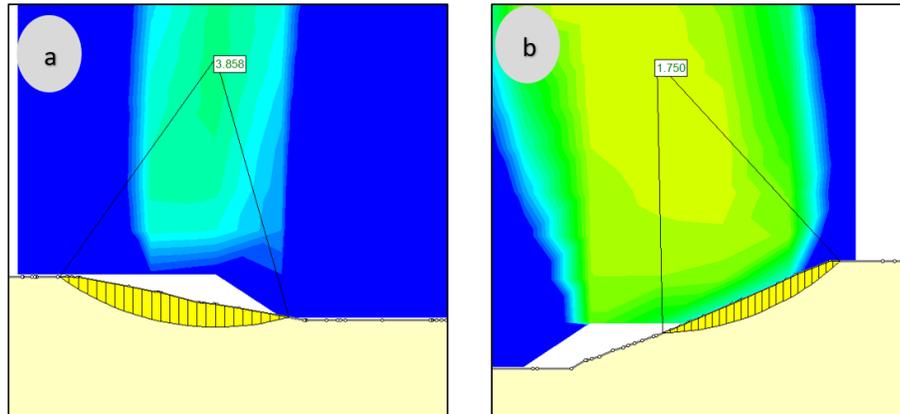
**Fuente:** Elaboración propia



**Figura 83.** Perfil 3 de modelación para el río Amaime. Factor de seguridad por equilibrio límite: a) banca izquierda, b) banca derecha

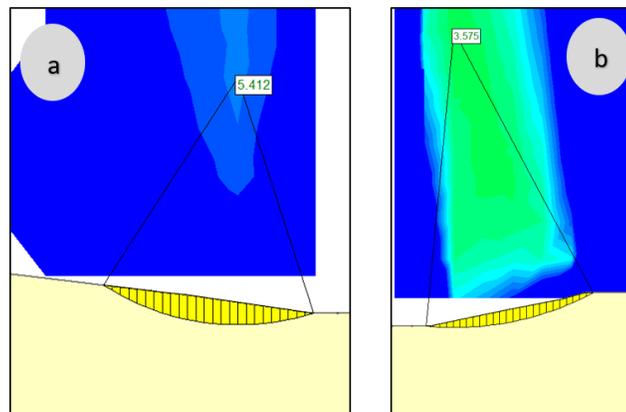
**Fuente:** Elaboración propia

### Perfiles modelación río Nima



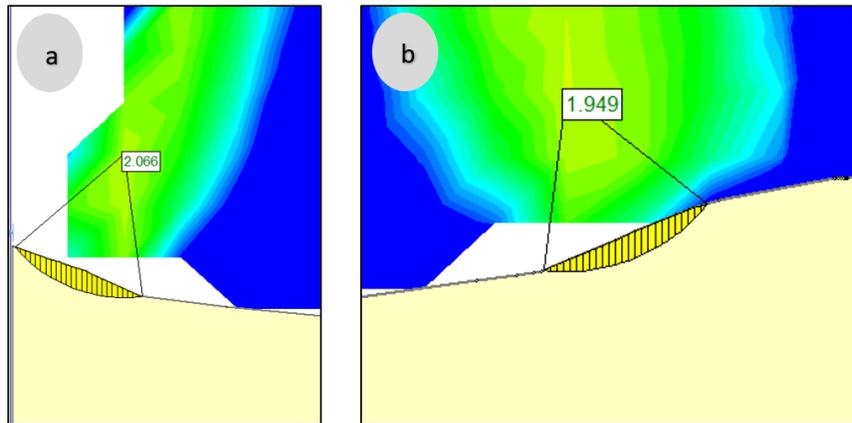
**Figura 84.** Perfil 1 de modelación para el río Nima Factor de seguridad por equilibrio límite: a) banca izquierda, b) banca derecha

**Fuente:** Elaboración propia



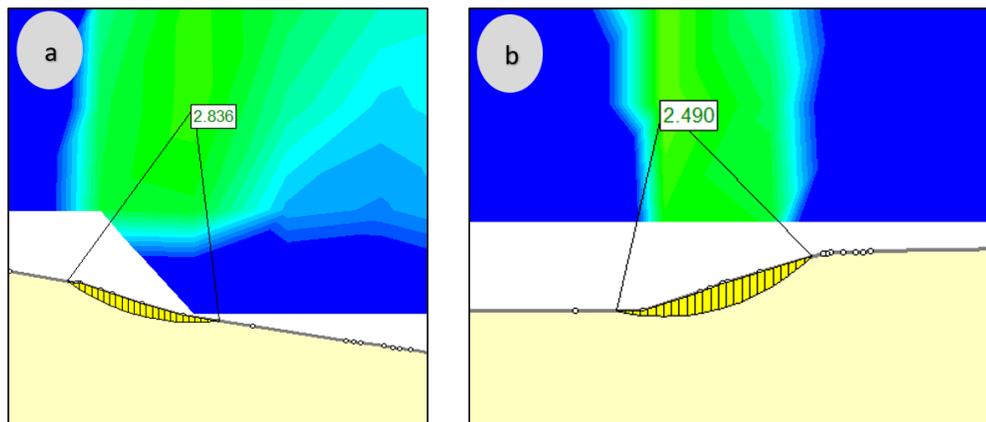
**Figura 85.** Perfil 2 de modelación para el río Nima. Factor de seguridad por equilibrio límite: a) banca izquierda, b) banca derecha

**Fuente:** Elaboración propia



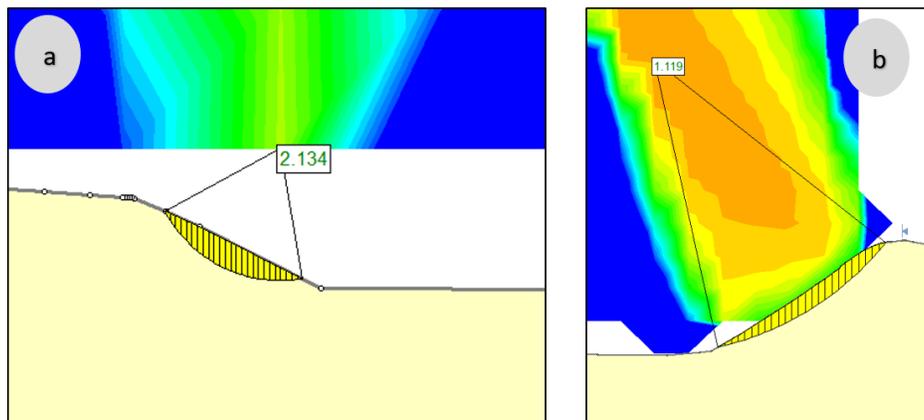
**Figura 86.** Perfil 3 de modelación para el río Nima Factor de seguridad por equilibrio límite: a) banca izquierda, b) banca derecha

**Fuente:** Elaboración propia



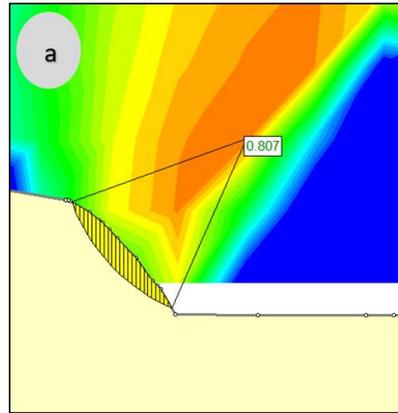
**Figura 87.** Perfil 4 de modelación para el río Nima Factor de seguridad por equilibrio límite: a) banca izquierda, b) banca derecha

**Fuente:** Elaboración propia

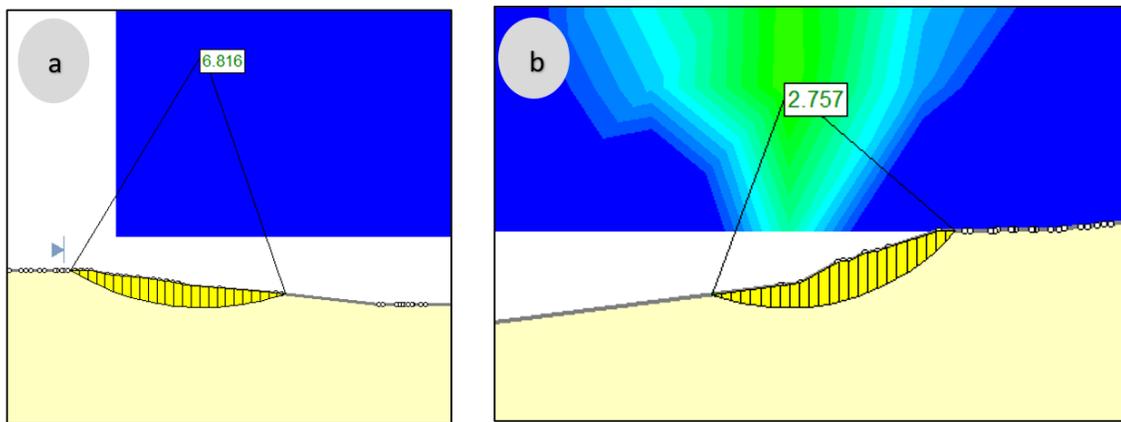


**Figura 88.** Perfil 5 de modelación para el río Nima Factor de seguridad por equilibrio límite: a) banca izquierda, b) banca derecha

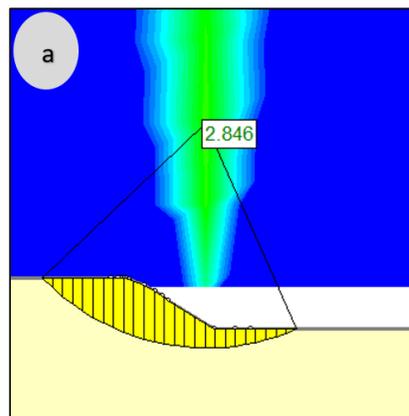
**Fuente:** Elaboración propia



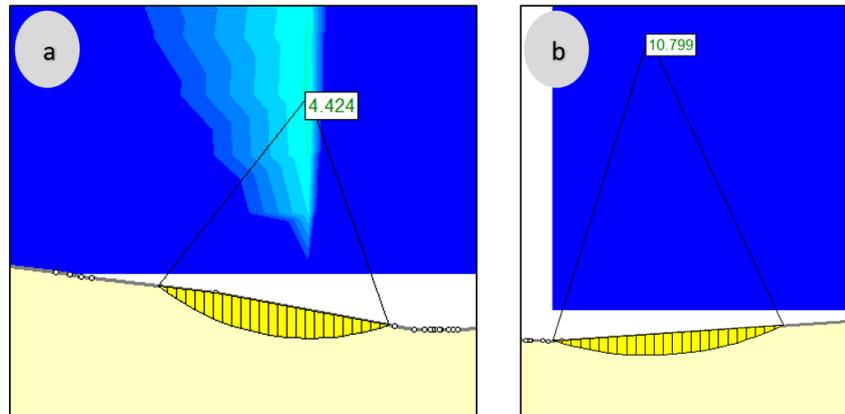
**Figura 89.** Perfil 6 de modelación para el río Nima Factor de seguridad por equilibrio límite: a) banca izquierda.  
**Fuente:** Elaboración propia



**Figura 90.** Perfil 7 de modelación para el río Nima Factor de seguridad por equilibrio límite: a) banca izquierda, b) banca derecha  
**Fuente:** Elaboración propia

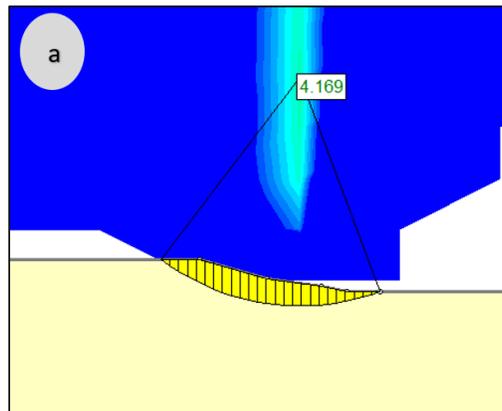


**Figura 91.** Perfil 8 de modelación para el río Nima Factor de seguridad por equilibrio límite: a) banca izquierda.  
**Fuente:** Elaboración propia



**Figura 92.** Perfil 9 de modelación para el río Nima Factor de seguridad por equilibrio límite: a) banca izquierda, b) banca derecha

**Fuente:** Elaboración propia



**Figura 93.** Perfil 10 de modelación para el río Nima Factor de seguridad por equilibrio límite: a) banca izquierda.

**Fuente:** Elaboración propia

Después de realizar los análisis de estabilidad por equilibrio límite, se procede a calcular el factor de seguridad (FS) por cantiléver como se muestra en las Tabla 26 y

Tabla 27.

**Tabla 26.** FS por equilibrio limite y FS por cantiléver en el rio Amaime

Punto	FS Equilibrio Limite	Área de deslizamiento (m <sup>2</sup> □ m)	FS Cantiléver
1	1,017 I-D	4.14	0.023
2	3,497 I-D	9.50	0.137
3	3,163 D-I	9.76	0.105

**Fuente:** Elaboración propia

Tabla 27. FS por equilibrio límite y FS por cantiléver en el río Nima

Punto	FS Equilibrio Límite	Área de deslizamiento (m <sup>2</sup> □ m)	FS Cantiléver
1	1,750 D-I	17.32	0.056
2	3,575 D-I	20.28	0.029
3	1,949 D-I	11.06	0.059
4	2,490 D-I	13.84	0.047
5	1,119 D-I	22.31	0.087
6	0,807 I-D	8.75	0.306
7	2,757 D-I	9.50	0.114
8	2,846 I-D	10.30	0.097
9	4,424 I-D	13.01	0.084
10	4,169 I-D	14.05	0.076

Fuente: Elaboración propia

Después de obtener los factores de seguridad por los dos métodos y se presentan valores menores a 1, nos indicara que el talud está fallando por socavación lateral. A continuación, en la Figura 94 se presenta la socavación lateral por falla geotécnica en Barrio Azul.

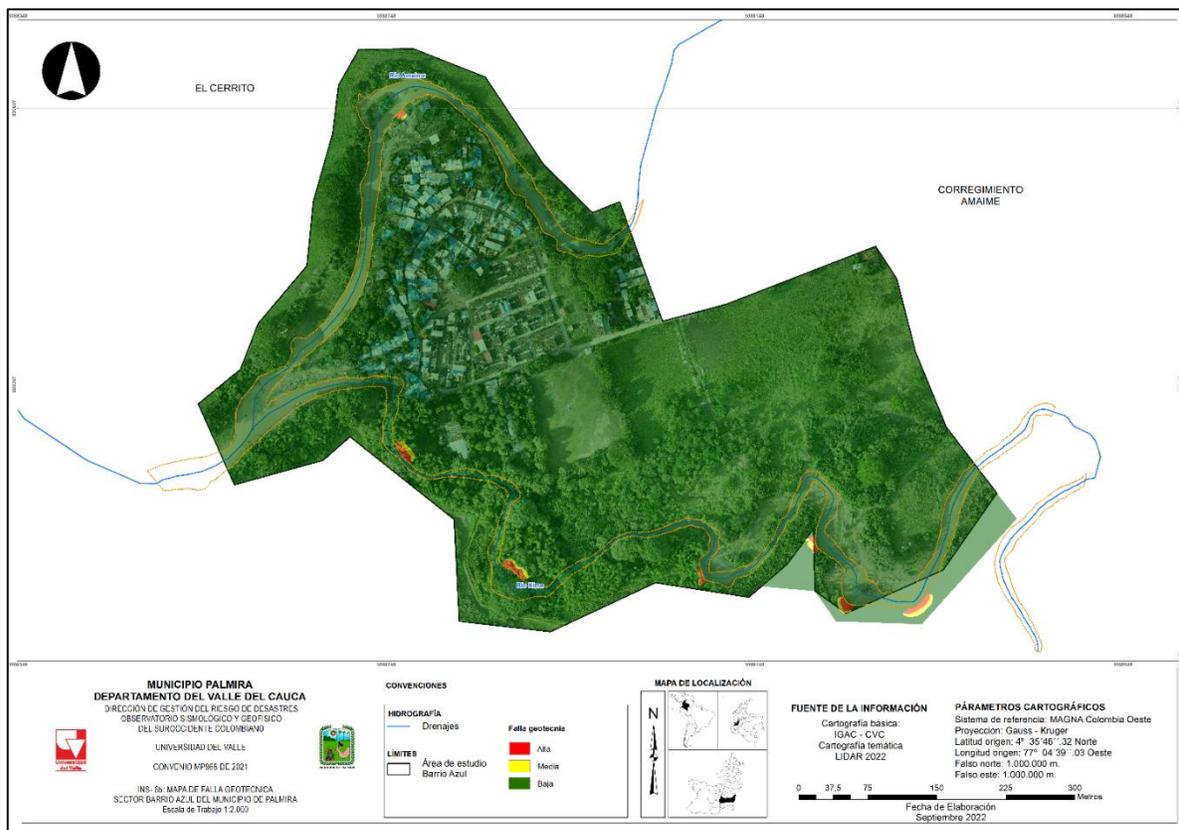


Figura 94. Socavación lateral por falla geotécnica (INS-67)

Fuente: Elaboración propia

Para identificar las zonas de posible retroceso de la banca, en la Tabla 28 se presenta la distancia entre la corona de la banca hasta el punto de inicio de la falla de los perfiles en los ríos Amaime y Nima.

**Tabla 28.** Distancia entre el inicio de la falla y la corona de la banca

Río Amaime	
Punto	Distancia (m)
1	5.84
2	5.13
3	12.05

Río Nima	
Punto	Distancia (m)
1	9.31
2	7.19
3	8.06
4	7.79
5	12.76
6	3.23
7	3.50
8	1.90
9	7.37
10	5.55

Fuente: Elaboración propia

## 6.7.Amenaza por socavación lateral

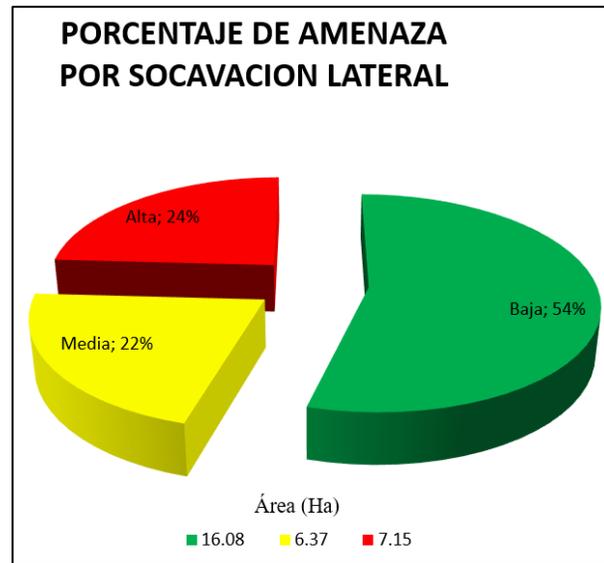
Para la caracterización de la amenaza es necesario integrar las categorías de susceptibilidad alta y muy alta, de tal manera que se cuente solo con tres categorías de amenaza de acuerdo con la normatividad vigente (Decreto 1807 de 2014). Ver Figura 95.

Después de realizar los cruces de los píxeles de cada temática presentada en este informe, en la Figura 95 se presenta el mapa consolidado de amenaza por socavación lateral.



Figura 95. Amenaza por socavación lateral (SL-8)

Fuente: Elaboración propia



**Figura 96.** Porcentaje de amenaza por socavación lateral  
**Fuente:** Elaboración propia.

- **Amenaza alta:**

Esta categoría ocupa el 24 % del área de estudio, cubriendo un área de 7.15 ha, principalmente en el río Amaime. En esta zona se pueden presentar pérdida de la banca y generar afectaciones a la población cercana.

- **Amenaza media:**

En esta categoría se presenta en gran parte de los rellenos que se encuentran en el río Amaime con un área 6.37 ha. En conclusión, esta categoría de amenaza comprende aproximadamente el 22 % del área de estudio.

- **Amenaza baja:**

Zonas con mínimas o ninguna condición favorable a la inestabilidad, en otras palabras, el potencial de ocurrencia de la socavación lateral es bajo. La amenaza baja por socavación lateral que se presenta es del 54 % con un área de 16.08 ha, localizadas en gran parte de la zona de estudio.

## 7. CONCLUSIONES

El área de estudio correspondiente al sector de Barrio Azul del municipio de Palmira posee un ambiente morfológico diverso, en donde las principales formaciones que coadyuvan a la generación de ambientes condicionantes ante la socavación lateral, se encuentran principalmente en las zonas norte y sur oriental, así lo denotan los resultados de las diferentes variables analizadas (geomorfología y formaciones geológicas superficiales).

Se definieron las Unidades Geológicas de Superficie teniendo en cuenta su origen: Roca (R) y Suelos (S); posteriormente se clasificaron según sus características litoestratigráficas (composición y estructura). Es así como los Suelos se clasifican en transportados y antrópicos.

Durante el levantamiento de información (Historicidad y geomorfología) se realizó el inventario y descripción de dos (02) y cinco (05) socavaciones respectivamente, distribuidos en todo el municipio.

En los sondeos realizados para el presente estudio, se encontraron niveles freáticos entre 1.50 m y 4.00 m de profundidad, debido a la cercanía de los ríos.

El plan de ensayos de laboratorio tuvo por objeto la caracterización geomecánica de los materiales que componen el subsuelo bajo el área de estudio, para lo cual se llevaron a cabo ensayos de clasificación y de resistencia. Dentro de los ensayos de clasificación de suelos se realizaron humedad natural, límites de consistencia, granulometría y peso unitario. Por otro lado, los ensayos de resistencia en suelos corresponden a ensayos de compresión confinada y corte directo consolidado drenado.

A partir de las unidades geológicas superficiales, los registros estratigráficos de las perforaciones y los resultados de los ensayos de laboratorio se establecieron trece (13) secciones o modelos geológico-geotécnicos de análisis, representativos de la condición actual del terreno. Tales modelos representan, en promedio, las zonas homogéneas presentes en el área de estudio, en cuanto a las condiciones y comportamientos geológicos y geomecánicos similares.

Los métodos de análisis utilizados están basados en la teoría de equilibrio límite y cantiléver. Para efectos de cálculo (equilibrio límite), se utilizó el programa SLIDE v6.0 para modelar los movimientos con mecanismo de falla rotacional y para cantiléver se aplicó el concepto de Samadi, Davoudi y AmiriTokaldany (2011) que sirve para la erosión causada por las riberas de los ríos.

Se debe tener en cuenta que una unidad territorial como el municipio, posee unas dinámicas especiales, donde se presentan diferentes escenarios, como infraestructuras, varias fuentes hídricas, que prestan una serie de servicios y posee una amplia variedad de recursos naturales y económicos, que también se encuentran sometidas a actividades antrópicas que en su

mayoría afectan de manera negativa la conservación de este tipo de lugares, razón por la cual deben considerarse las áreas de amenaza media y alta que pueden llegar a convertirse en un riesgo futuro. Es necesario valorar el efecto adverso al cual se encuentran sometidos el territorio y la población asentada en el área de estudio, con el fin de tomar medidas en pro de la reducción de la susceptibilidad y posterior amenaza por socavación lateral.

La amenaza alta corresponde a las zonas en las que se presenta socavación lateral, debido a la condición de los materiales presentes (suelos antrópicos), ocupando el 24 % del área de estudio, cubriendo un área de 7.15 ha, principalmente en el río Amaime. En esta zona se pueden presentar pérdida de la banca y generar afectaciones a la población cercana.

En esta categoría (amenaza media) se presenta en gran parte de los rellenos que se encuentran en el río Amaime con un área 6.37 ha. En conclusión, esta categoría de amenaza comprende aproximadamente el 22 % del área de estudio.

En la amenaza baja hay zonas con mínimas o ninguna condición favorable a la inestabilidad, en otras palabras, el potencial de ocurrencia de la socavación lateral es bajo. La amenaza baja por socavación lateral que se presenta es del 54 % con un área de 16.08 ha, localizadas en gran parte de la zona de estudio.

Se recomienda delimitar las zonas con amenaza alta y media por socavación lateral, con el fin de disminuir el proceso erosivo implementando obras que protejan los taludes de las bancas.

## 8. REFERENCIAS

- Alvarado F. C, Medina B. E, Sandoval R. J, García N. J. (2012). Zonificación de amenaza por socavación lateral aplicando un método bivariado y un proceso heurístico. Caso aplicado a la cuenca del río Combeima, Ibagué-Tolima-Colombia. Recuperado de: [https://www.researchgate.net/publication/308926844\\_zonificacion\\_de\\_amenaza\\_por\\_movimientos\\_en\\_masa\\_aplicando\\_un\\_metodo\\_bivariado\\_y\\_un\\_proceso\\_heuristico\\_caso\\_aplicado\\_a\\_la\\_cuenca\\_del\\_rio\\_combeima\\_ibague-tolima-colombia](https://www.researchgate.net/publication/308926844_zonificacion_de_amenaza_por_movimientos_en_masa_aplicando_un_metodo_bivariado_y_un_proceso_heuristico_caso_aplicado_a_la_cuenca_del_rio_combeima_ibague-tolima-colombia).
- Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, (2009). Estudio General de Amenaza Sísmica de Colombia. Bogotá. 226 p. Recuperado de: [http://www.rcrisis.com/Content/files/EstudioGeneraldeAmenazaSismicadeColombia2009\\_AIS\\_lowres.pdf](http://www.rcrisis.com/Content/files/EstudioGeneraldeAmenazaSismicadeColombia2009_AIS_lowres.pdf)
- Australian Geomechanics Society -AGS (2007). Commentary on guideline for landslides susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning. Aust Geomech, 42 (1), 37-62.
- Barrero, D. (1979). Geology of the central Western Cordillera, West of Buga and Roldanillo, Colombia. Publicaciones Geológicas Especiales de INGEOMINAS, 4, 75p.
- Becerra Y; Chamba L; Chillón E; Cusma J; Manchay A; Monja Y; Roncal A; Torres R (2015). Ensayo Consolidación de Suelos. Informe de Laboratorio. Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental, (Usat). Universidad católica. Santo Toribio de Mogrovejo, Perú.
- Bonham-Carter, G.F (2002). Geographic information systems for geoscientist: Modelling with GIS. In: Merriam, D.F. (Ed.), Computer Methods in the Geosciences, vol. 13. Pergamon/Elsevier, New York, pp. 302–334.
- Carrara, A. (1983). Multivariate model for landslide hazard evaluation. Mathematical Geology, vol. 15, No. 3 pp. 403 – 427
- Carvajal, J. H. (2012). Propuesta de estandarización de la cartografía geomorfológica en Colombia. Bogotá: INGEOMINAS. Recuperado de: <https://www2.sgc.gov.co/Publicaciones/Cientificas/NoSeriadadas/Documents/Propuesta%20de%20estandarizaci%C3%B3n.PDF>
- Corominas, J. (1996). The angle of reach as a mobility index for small and large landslides. Canadian Geotechnical Journal, 33, 260-271
- Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca -CVC- y Universidad del Valle - Univalle (2010). Zonificación de Amenazas y Escenarios de Riesgo por Socavación lateral, Inundaciones y Crecientes Torrenciales del Área Urbana y de Expansión de los Municipios de Buga, Riofrío, Dagua, El Cairo y La Unión. Proyecto Midas, Contrato Interadministrativo CVC – Univalle 188 De 2008



- Ibañez, D., Castro, E., Arturo J., Perez, R. y Cuellar M. (2012) Geología y Geomorfología para la evaluación de la amenaza por socavación lateral en el municipio de Soacha, Cundinamarca, Colombia. Servicio Geológico Colombiano.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi -IGAC. (2012). Metodología para la Zonificación de Susceptibilidad General del Terreno a los Socavación lateral. Bogotá D.C., Cundinamarca, Colombia.
- INGEOMINAS (2002). Clasificación Regional de Amenaza Relativa de Socavación lateral en Colombia. Bogotá D.C., mayo de 2002.
- INGEOMINAS (2005). Estudio de microzonificación sísmica de Santiago de Cali. Convenio INGEOMINAS-DAGMA, Bogotá.
- INGEOMINAS (2006), Mapa Geológico de Colombia, Escala 1:2.800.000, Bogotá
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM (2018). Documento en línea. Consultado el 1 agosto de 2018. Recuperado de: <http://www.ideam.gov.co/web/ecosistemas/coberturas-tierra>
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM (2016). Información pluviométrica.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia - IDEAM (2012). Metodología para la zonificación de susceptibilidad general del terreno a los socavación lateral. Consultado el 16 de junio de 2018. Recuperado de: [http://www.ideam.gov.co/documents/11769/152732/Metodologia+suscept+FRM\\_oficial\\_final.pdf/6ded04e2-9378-440f-8902-2e6c92fcc745](http://www.ideam.gov.co/documents/11769/152732/Metodologia+suscept+FRM_oficial_final.pdf/6ded04e2-9378-440f-8902-2e6c92fcc745)
- Jimeno, C. L. (Ed.). (2013). Ingeniería del terreno. UD Proyectos, ETSI Minas, UPM.
- Lal, R. (2001). Soil degradation by erosion. Land degradation & development, 12(6), 519-539. Disponible en, consulta 10 de dic de 2018 <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/ldr.472>
- Lee, S., Choi, J., (2004). Landslide susceptibility mapping using GIS and the weights-of-evidence model. International Journal of Geographical Information Science 18, 789–814.
- Lozano, H. (1986). Oro y plata en Colombia, Áreas promisorias. I Taller Latinoamericano sobre Exploración y Explotación de Oro Aluvial, Memorias, I, 56p
- McCourt, W. J., (1984). The Geology of the Central Cordillera in the Department of Valle del Cauca, Quindío and NW Tolima: British Geological Survey Report, v. Series 84, p. 8 - 49.
- Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial (2010). Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente: NRS 10. Título H- Estudios geotécnicos. Bogotá DC.
- Ministerio de Vivienda, Salud y Territorio de Colombia (2014). Decreto 1807 del 19 septiembre de 2014. "Por el cual se reglamenta el artículo 189 del Decreto Ley 019 de 2012 en lo

relativo a la incorporación de la gestión del riesgo en los planes de ordenamiento territorial y se dictan otras disposiciones”. Recuperado de:

<http://wsp.presidencia.gov.co/Normativa/Decretos/2014/Documents/SEPTIEMBRE/19/DECRETO%201807%20DEL%2019%20DE%20SEPTIEMBRE%20DE%202014.pdf>

- Nivia, A., Galvis, N., y Maya, M. (1995). Mapa geológico de Colombia, plancha 242-Zarzal, Scale: 1: 100,000. INGEOMINAS, Cali.
- Nivia, A., Galvis, N., y Maya, M. (1997). Geología de la Plancha 242, Zarzal. INGEOMINAS. (1997). Mapa geológico de Colombia. Geología de la plancha 242-Zarzal. Escala 1:100.000. Memoria explicativa, Bucaramanga, INGEOMINAS. Bogotá.
- Parra, E., Caballero, H., Muñoz, R. Zapata, G. y Zuluaga, J. (1984). Pág. 24. Mapa Geológico de Colombia - Escala 1:100000, Plancha 223 - El Cairo. INGEOMINAS. Bogotá.
- Peña M, C. y Mosquera A, C. (2010). Reevaluación de la amenaza sísmica en la ciudad de Cali por medio de un método de análisis integral de la información sismológica. geofísica y geológica. Memoria de Tesis para optar al título de Ingeniero Civil. Escuela de Ingeniería Civil y Geomática. Universidad del Valle. Santiago de Cali. Colombia,122p.
- Organización de las Naciones Unidas (ONU), (2018). Taxonomía de suelos USDA. Consulta 14 de junio de 2018 Recuperad en: <http://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/clasificacion-de-suelos/taxonomia-de-suelos-de-usda/es/>
- Romana, M. (1995). “The geomechanical classification SMR for slope correction”. En: FUJII (ed.) Proc. 8th Int. ISRM Congress.
- Santacana. (2001). Analisis de la Susceptibilidad del Terreno a la Formación de Deslizamientos Mediante el Uso de Sistemas de Información Geografica. Aplicación a la Cuenca Alta del Río Llobregar. Barcelona, Catalunya, España: Universidad Politecnica de Catalunya.
- Secretaría Jurídica Distrital de la Alcaldía Mayor de Bogotá D.C (13 de julio de 2006). Resolución 227 de 2006. "Por la cual se adoptan los términos de referencia para la ejecución de estudios detallados de amenaza y riesgo por fenómenos de remoción en masa para proyectos urbanísticos y de construcción de edificaciones en Bogotá D.C. Recuperado de: <https://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjurMantenimiento/normas/Norma1.jsp?i=20845>
- Servicio Geológico Colombiano -SGC (2017). Guía Metodológica Para la Zonificación de Amenaza por Socavación lateral Escala 1: 25.000. Bogotá, D. C, Cundinamarca, Colombia: Imprenta Nacional de Colombia
- Servicio Geológico Colombiano -SGC (2016). Guía Metodológica para Estudios de Amenaza, Vulnerabilidad y Riesgo por Socavación lateral. Bogotá, D. C, Cundinamarca, Colombia: Imprenta Nacional de Colombia

- Servicio Geológico Colombiano -SGC y Universidad Nacional (2010). Mapa Nacional de Amenaza Sísmica Periodo de Retorno 475 años. Escala 1:1.500.000.
- Servicio Geológico Colombiano -SGC (s.f). Glosario de términos Documento en línea. Consultado el 20 de junio de 2018. Recuperado de:  
<https://www2.sgc.gov.co/atencionalciudadano/lists/glosario%20de%20terminos/allitems.aspx#InplviewHash5aa0669c-85e8-44a8-a289-25b056edb64e=>
- Suárez J. (1998). Deslizamientos y Estabilidad de Taludes en Zonas Tropicales. Disponible en: <http://desastres.usac.edu.gt/documentos/docgt/pdf/spa/doc0101/doc0101.pdf>
- Sistema de Información Ambiental de Colombia (SIAC). (s.f). Degradación de suelos. Disponible en: <http://www.siac.gov.co/erosion>
- Suriol Castellví, J., Josa García-Tornel, A., y Lloret Morancho, A. (2007). Reconocimiento geotécnico del terreno. Universitat Politècnica de Catalunya. Iniciativa Digital Politècnica.
- Varnes, D. (1978). Slope Movement: Types and Proceses. In Scuster & Krizek, Landslides: Analysis and Control. Special report 176. Transportation Comisión on Sociotechnical Systems, National Research Council. Washington. D.C: National Academy of Sciences.
- Van Westen, C.J. (1996). Análisis estadístico de riesgo de deslizamiento, International Institute for Geoinformation Science and Earth Observation (ITC), The Netherlands.
- Villalta A y González M (2011). Zonificación de Amenazas Geológicas por Socavación lateral que permita el Ordenamiento Territorial en la Urbanización Ciudad Victoria de Loja (Tesis de pregrado). Universidad Nacional de Loja, Loja, Ecuador. Recuperado de: <http://dspace.unl.edu.ec/jspui/bitstream/123456789/16301/1/Gonz%C3%A1lez%20Capa%2C%20Mar%C3%ADa%20Paola%2C%20Villalta%20Castillo%2C%20Azucena%20Ondina.pdf>
- Yue, Z. Q. (2014). Dynamics of large and rapid landslides with long travel distance underdense gas expanding power. *Landslide Science for a Safer Geoenvironment*, 3. Springer, pp. 233-240.

## 9. ANEXOS

### Mapas

**Anexo 1.** Variables clasificadas

**Anexo 2.** Registros de perforación y ensayos de laboratorio