

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 corredor Calucé – Tenjo.



ESTUDIO 9: ZONIFICACIÓN DE LA AMENAZA POR SOCAVACIÓN LATERAL EN EL CORREDOR CALUCÉ -TENJO, 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**



**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 corredor Caluce - Tenjo
Convenio Interadministrativo MP968 de 2021**



Alcaldía de Palmira

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

1.	INTRODUCCIÓN	7
2.	OBJETIVOS	10
2.1.	General	10
2.2.	Específicos.....	10
2.3.	Alcance	10
3.	LOCALIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO	11
3.1.	Río Nima.....	12
3.2.	Corredor Caluce - Tenjo.....	13
4.	CLASIFICACIÓN DE LOS PROCESOS DE SOCAVACIÓN LATERAL	15
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
5.	METODOLOGÍA	22
5.1.	Erosión marginal por eventos históricos	24
5.1.1.	Fotointerpretación.....	24
5.1.2.	Trabajo de campo.....	25
5.2.	Análisis dinámico fluvial (multitemporal) del río Nima en el corredor Calucé - Tenjo	25
5.3.	Susceptibilidad por socavación lateral.....	28
5.3.1.	Método estadístico Bivariado	28
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	42
5.5.	Socavación lateral de cauces por hidráulica fluvial.....	42
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	43
5.5.3.	Estimación de velocidad crítica en los polígonos de erosión.....	44
5.5.4.	Cálculo de la tasa de erosión y el tiempo de aplicación del esfuerzo cortante en las paredes del cauce	45
5.6.	Falla de talud o geotécnica	46
5.7.	Amenaza por socavación lateral (consolidado)	47
6.	RESULTADOS	49
6.1.	Erosión marginal por eventos históricos.....	49
6.2.	Análisis dinámico fluvial	50
6.3.	Susceptibilidad por socavación lateral.....	51
6.3.1.	Descripción de las variables	51
6.4.	Exploración geotécnica y ensayos de laboratorio.....	67
6.4.1.	Perforación SPT	67
6.4.2.	Apique	69
6.4.3.	Líneas Sísmicas	71
6.5.	Socavación lateral de cauce por hidráulica fluvial	78
6.6.	Falla de talud o geotécnica	83
6.7.	Amenaza por socavación lateral	92
7.	CONCLUSIONES	95
8.	REFERENCIAS	97
9.	ANEXOS.....	102

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localización general municipio de Palmira.....	11
Figura 2. Localización subcuencas en estudio municipio de Palmira	13
Figura 3. Localización del corredor Caluce - Tenjo en la zona de estudio	14
Figura 4. Flujograma metodológico para el análisis de la susceptibilidad por socavación lateral	23
Figura 5. Flujograma metodológico para el análisis de la amenaza por socavación lateral... ..	24
Figura 6. Determinación del signo de la orilla derecha del río, con relación a su localización con respecto al eje de referencia para el año 2021.....	26
Figura 7. Determinación del signo de la orilla izquierda del río, con relación a su localización con respecto al eje de referencia para el año 2021.....	27
Figura 8. Cálculo del desplazamiento margen derecha río Nima para los años 2015 y 2021.	27
Figura 9. Cálculo del desplazamiento margen derecha río Nima para los años 2015 y 2021.	28
Figura 10. Diagrama de flujo simplificado del Análisis Estadístico Bivariado.....	30
Figura 11. Ejemplo de una curva de éxito	33
Figura 12. Montaje Equipo de Perforación SPT	36
Figura 13. Esquema de Operación para Penetración por Percusión y Prueba SPT	36
Figura 14. Características del Muestreador Empleado.....	37
Figura 15. Muestreador de Caña Partida	38
Figura 16 Sismógrafo Seistronix RAS-24.....	39
Figura 17 Geófonos de adquisición de datos.....	39
Figura 18 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	40
Figura 19 Ilustración típica del procesamiento de datos mediante el software Rayfract correspondiente a la línea de refracción LS-1 para ondas P	41
Figura 20 Ilustración típica del procesamiento de datos mediante el software Rayfract correspondiente a la línea de refracción LS-1 para ondas S.....	41
Figura 21. Esquema de polígonos de erosión fluvial a lo largo del cauce principal	43
Figura 22. a) Lateral Izquierda; b) Lateral Derecha.	44
Figura 23. Longitud de Erosión de la banca por acción del flujo	46
Figura 24. Análisis de estabilidad de laderas	47
Figura 25. (INS-64) Estaciones de campo geología y geomorfología en el corredor Calucé - Tenjo	49
Figura 26. (HIS-CT_1) Socavación lateral de eventos por historicidad	50
Figura 27. (INS-78) Multitemporal del río Nima (1981-2021).....	51
Figura 28. (INS-75) Modelo Digital del Terreno.....	52
Figura 29. (INS-77) Pendientes	54
Figura 30. (INS-76) Orientación	55
Figura 31. (GEOL-6) Unidades geológicas superficiales	57
Figura 32. (GMF-6) Geomorfología.....	59
Figura 33. (SL-7-CT) Socavación lateral activa.....	60
Figura 34. (SL-5-CT) Relación de la socavación lateral activa con la variable pendiente	62
Figura 35. Curva de éxito susceptibilidad por socavación lateral	63

Figura 36. (SL-8-CT) Susceptibilidad por socavación lateral	65
Figura 37. Porcentaje de susceptibilidad por socavación lateral	66
Figura 38. (INS-79) Exploraciones geotécnicas – Perforación SPT.....	68
Figura 39 Perfil estratigráfico del sondeo	69
Figura 40. (INS-78) Exploraciones geotécnicas – Apique	70
Figura 41 Perfil estratigráfico del apique	71
Figura 42. (INS-80) Exploraciones geotécnicas – Líneas sísmicas	72
Figura 43. Modelo 2D (MASW) de velocidad de onda S, – Líneas sísmicas LS-3.....	74
Figura 44. Clasificación de los perfiles de suelo.....	75
Figura 45. Estación JAE-CT-43.....	77
Figura 46. Estación JAE-CT-45.....	77
Figura 47. (INS-81) Secciones o modelos geológicos – geotécnicos	78
Figura 48. Perfiles transversales del río Nima (1) utilizados en la modelación.....	79
Figura 49. Perfiles transversales del río Nima (2) utilizados en la modelación.....	79
Figura 50. (INS-82) Socavación lateral por hidráulica fluvial	83
Figura 51. Perfil 1 de modelación para el río Nima. Factor de seguridad por equilibrio límite: banca izquierda	84
Figura 52. Perfil 2 de modelación para el río Nima. Factor de seguridad por equilibrio límite: banca izquierda	84
Figura 53. Perfil 3 de modelación para el río Nima. Factor de seguridad por equilibrio límite: banca izquierda	84
Figura 54. Perfil 4 de modelación para el río Nima. Factor de seguridad por equilibrio límite: banca izquierda	85
Figura 55. Perfil 5 de modelación para el río Nima. Factor de seguridad por equilibrio límite: banca izquierda	85
Figura 56. Perfil 6 de modelación para el río Nima. Factor de seguridad por equilibrio límite: banca izquierda	85
Figura 57. Perfil 7 de modelación para el río Nima. Factor de seguridad por equilibrio límite: banca izquierda	86
Figura 58. Perfil 8 de modelación para el río Nima. Factor de seguridad por equilibrio límite: banca izquierda	86
Figura 59. Perfil 9 de modelación para el río Nima. Factor de seguridad por equilibrio límite: banca izquierda	86
Figura 60. Perfil 10 de modelación para el río Nima. Factor de seguridad por equilibrio límite: banca izquierda	87
Figura 61. Perfil 11 de modelación para el río Nima. Factor de seguridad por equilibrio límite: banca izquierda	87
Figura 62. Perfil 12 de modelación para el río Nima. Factor de seguridad por equilibrio límite: banca izquierda	87
Figura 63. Perfil 13 de modelación para el río Nima. Factor de seguridad por equilibrio límite: banca izquierda	88
Figura 64. Perfil 14 de modelación para el río Nima. Factor de seguridad por equilibrio límite: banca izquierda	88
Figura 65. Perfil 15 de modelación para el río Nima. Factor de seguridad por equilibrio límite: banca izquierda	88

Figura 66. Perfil 16 de modelación para el río Nima. Factor de seguridad por equilibrio límite: banca izquierda	89
Figura 67. Perfil 17 de modelación para el río Nima. Factor de seguridad por equilibrio límite: banca izquierda	89
Figura 68. Perfil 18 de modelación para el río Nima. Factor de seguridad por equilibrio límite: banca izquierda	89
Figura 69. Perfil 19 de modelación para el río Nima. Factor de seguridad por equilibrio límite: banca izquierda	90
Figura 70. Perfil 20 de modelación para el río Nima. Factor de seguridad por equilibrio límite: banca izquierda	90
Figura 71. (INS-83) Falla de talud o geotécnica	91
Figura 72. (SL-9-CT) Amenaza por socavación lateral.....	93
Figura 73. Porcentaje de amenaza por socavación lateral	94

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Procesos de erosión hídrica y su contribución a la inestabilidad	17
Tabla 2. Insumos de fotointerpretación	25
Tabla 3. Insumos utilizados para el análisis multitemporal de las orillas del río Nima en el corredor Calucé - Tenjo	26
Tabla 4. Norma para ensayos	42
Tabla 5. Matriz de comparación entre zonas de susceptibilidad y otras variables.....	48
Tabla 6. Categorización de la variable pendiente verificar	52
Tabla 7. Dirección de la ladera	55
Tabla 8. Siglas de las unidades geológicas superficiales en el área de estudio.....	56
Tabla 9. Siglas de las unidades geológicas superficiales en el área de estudio.....	58
Tabla 10. Categorización de la variable pendiente.....	61
Tabla 11. Resultado de la sumatoria de los factores determinantes con la variable movimientos	61
Tabla 12. Rangos y porcentaje del área bajo la curva	63
Tabla 13 Relación de las perforaciones realizadas, coordenadas (geográficas).....	67
Tabla 14 Relación de resultados de ensayos de laboratorio realizados a las muestras recuperadas en las labores de exploración.....	69
Tabla 15 Relación de los apiques realizados, coordenadas (geográficas).....	70
Tabla 16 Relación de resultados de ensayos de laboratorio realizados a las muestras recuperadas en las labores de exploración.....	71
Tabla 17 Relación de las líneas sísmicas realizadas, coordenadas (geográficas).....	72
Tabla 18 Contenido del subsuelo y clasificación de acuerdo a la NSR-10.....	75
Tabla 19. Características geotécnicas de los materiales en el río Nima.....	80
Tabla 20. Esfuerzo crítico de los materiales en la banca del cauce en el río Nima	80
Tabla 21. Esfuerzo cortante de los materiales en la banca del cauce en el río Nima.....	81
Tabla 22. Tasa de erosión en las bancas del cauce del río Nima	82
Tabla 23. Longitud de erosión lateral del cauce del río Nima.....	82
Tabla 24. FS por equilibrio limite y FS por cantiléver en el río Nima	90
Tabla 25. Distancia entre el inicio de la falla y la corona de la banca	92

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 prerrequisito 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 corredor Calucé – Tenjo.

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 el corredor Calucé - Tenjo,

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 el corredor Calucé – Tenjo, 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 del cauce Nima a escala 1:2000 en el corredor Calucé - Tenjo, en el municipio de Palmira.
- Evaluar la susceptibilidad por socavación local o colapso de banca a escala 1:2000 en el corredor Calucé - Tenjo, en el municipio de Palmira.
- Estimar la socavación lateral de cauces por hidráulica fluvial a escala 1:2000 en el corredor Calucé - Tenjo, en el municipio de Palmira.
- Evaluar la faja de terreno con amenaza de colapso de banca por falla geotécnica a escala 1:2000 en el corredor Calucé - Tenjo, en el municipio de Palmira.
- Estimar la amenaza por Socavación lateral (consolidado de los mapas aquí enunciados), a escala 1:2000 en el corredor Calucé - Tenjo, 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 el corredor Calucé - Tenjo. 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.

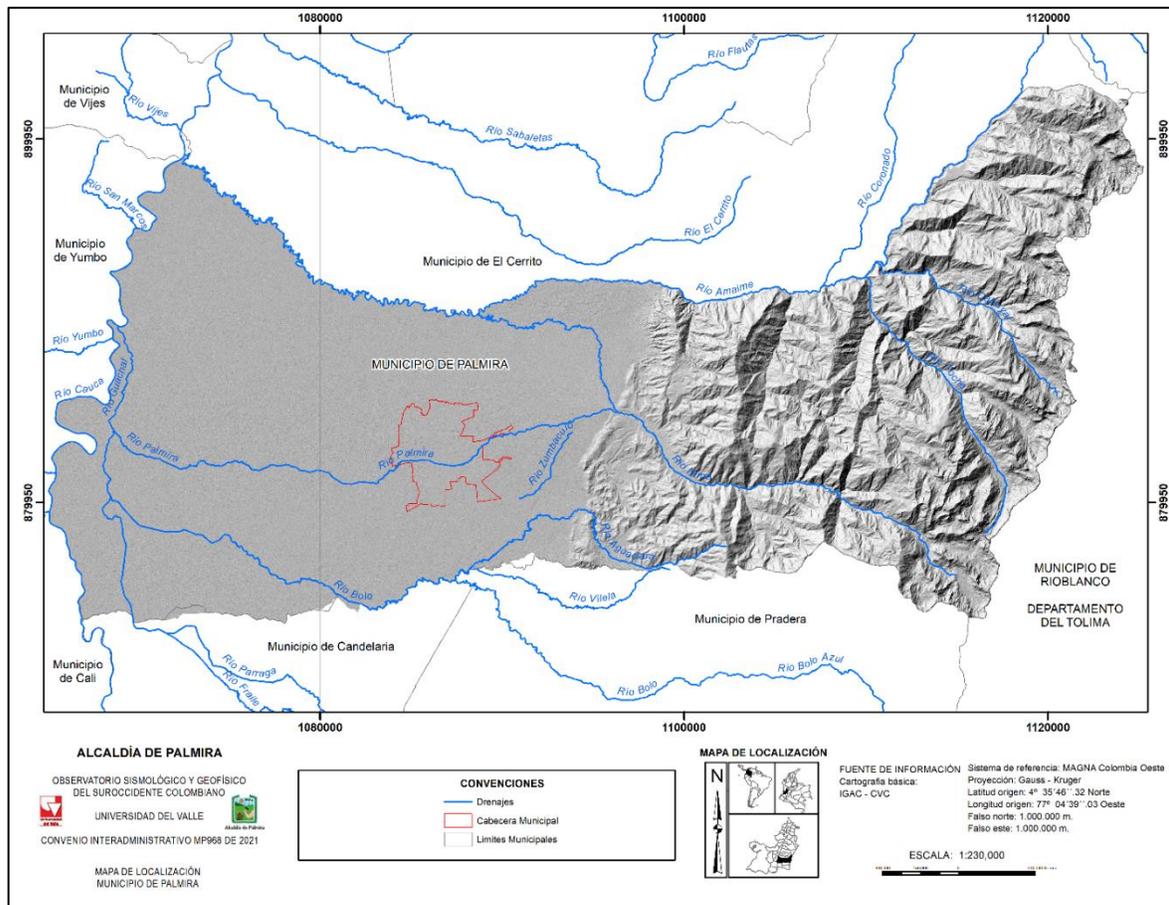


Figura 1. Localización general municipio de Palmira

Fuente: elaboración propia

En el presente estudio el análisis dinámico fluvial se desarrolla de forma particular, para la orilla del río Nima en su recorrido por el sector de Calucé - Tenjo la socavación lateral de cauces por hidráulica fluvial en el municipio de Palmira; con el fin de determinar la socavación lateral de cauces por hidráulica fluvial. Bajo este contexto, las cuencas hidrográficas del río Nima son las que presentan influencia en el área de estudio y su descripción general se presenta a continuación:

3.1.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 km² 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.

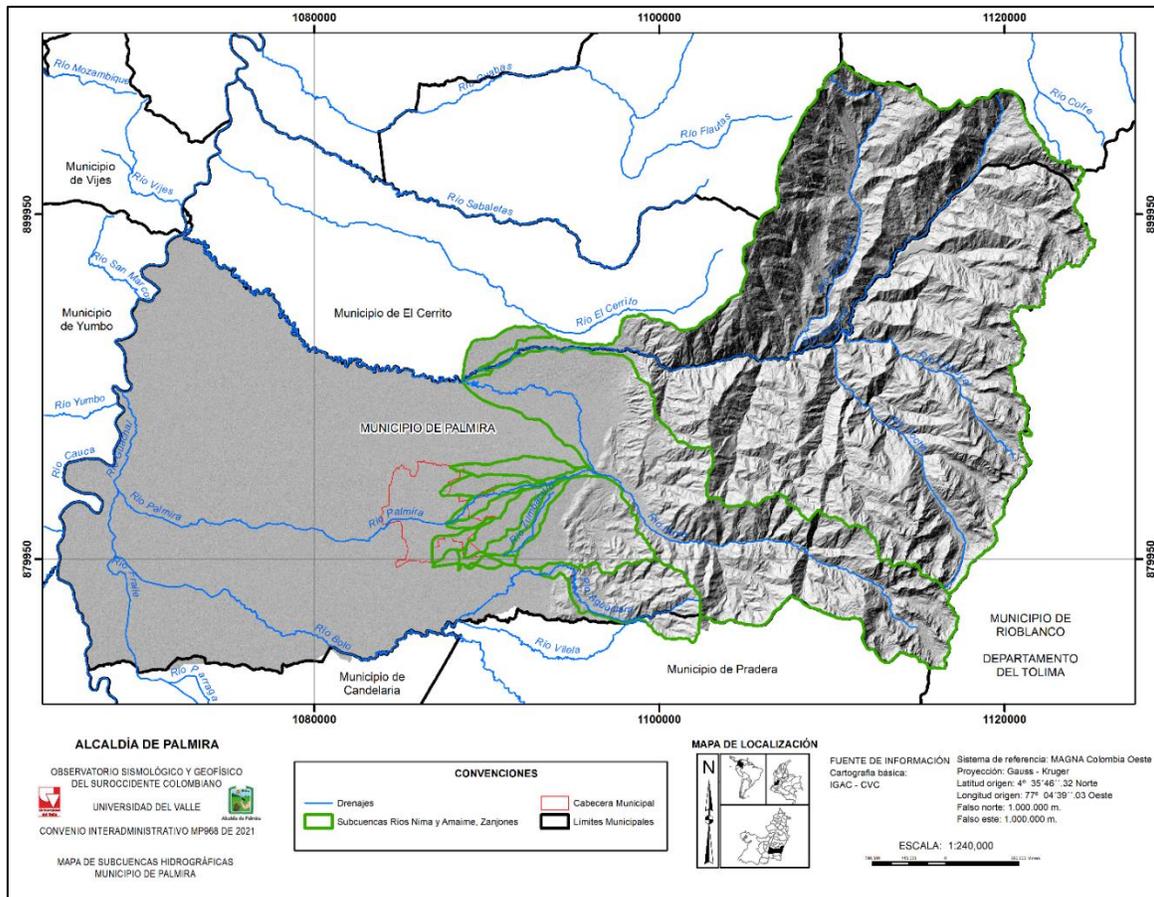


Figura 2. Localización subcuencas en estudio municipio de Palmira

Fuente: elaboración propia

3.2. Corredor Caluce - Tenjo

El centro poblado de Tenjo, que pertenece al municipio de Palmira, se encuentra ubicado en la vertiente occidental de la cordillera central.

El corregimiento de Tenjo se encuentra ubicado en la vertiente occidental de la cordillera central en el municipio de Palmira, departamento del Valle del Cauca a 1500 msnm. Latitud 3° 32' Norte. Longitud 76° 10' Occidente. Su distancia del municipio de Palmira es de 15.4 km en línea recta y 21 km por carretera, la cual está pavimentada en un 92.8% que equivale a 19.5km. Los límites del corregimiento de Tenjo son los siguientes:

- Al norte con el corregimiento de la Quizquina y Toche
- Al occidente con el corregimiento de Calucé
- Al sur con el corregimiento de El Arenillo y El Mesón
- Al oriente con el departamento del Tolima

Debido a que el corregimiento de Tenjo está ubicado en una zona montañosa el núcleo poblacional es campesina en su mayoría de origen Nariñense y otros de origen Paisa y Valluno.

La distribución de familias en el centro poblado es en su gran mayoría de una familia por vivienda, en algunos casos se presentan 2 o 3 familias por vivienda. El número total de familias en este corregimiento es de 72 que tienen un promedio de 4.02 personas. A continuación, se presenta la ubicación espacial del corregimiento de Tenjo.

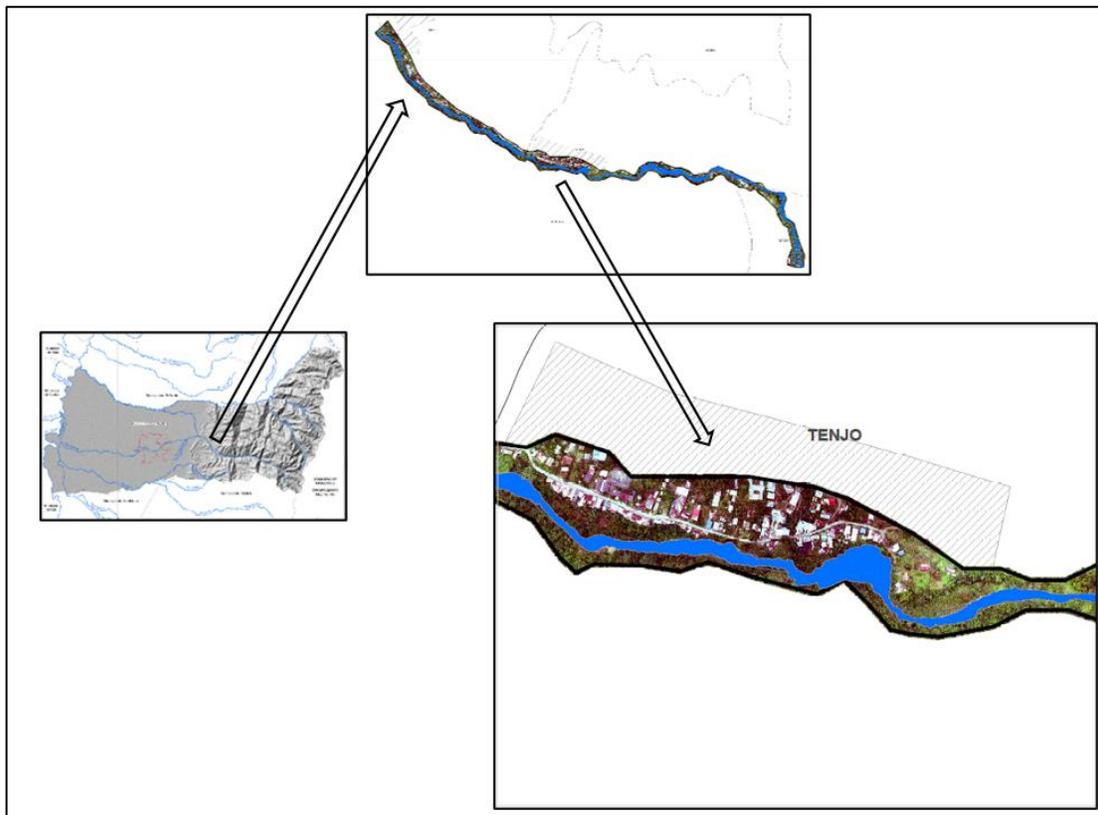


Figura 3. Localización del corredor Caluce - Tenjo en la zona de estudio

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:

1. **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.
2. **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.
3. **Erosión eólica:** Es el modelado del suelo por la acción del viento, cuando arranca, transporta y deposita los suelos finos, desprovistos de vegetación.
4. **Erosión glaciar:** Es el resultado del modelado del relieve por la acción de los glaciares cuando movilizan, transportan y depositan materiales.
5. **Erosión periglacial:** Es propia de zonas cercanas a los casquetes polares cuando se presentan procesos de congelamiento, descongelamiento, combinado con otros tipos de erosión.
6. **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.
7. **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 zanjonés 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 lateral

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
EROSION HIDRICA La acción de las aguas lluvias y de esorrentía son más intensos en laderas desprovistas de vegetación.	Erosión Pluvial 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.
	ESCURRIMIENTO SUPERFICIAL DIFUSO	
	Erosión Laminar 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.
ESCURRIMIENTO SUPERFICIAL CONCENTRADO		
	Erosión en surcos 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
	Erosión en cárcavas 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.
	ESCURRIMIENTO SUB-SUPERFICIAL	
EROSIÓN KARSTICA	Tubificación y cavernas 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.
	Socavación de Fondo	
EROSION FLUVIAL.	Socavación lateral	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.
	Acción de las aguas encauzadas: Torrentes, quebradas ríos	
	Descarga torrencial	

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.

- **Fujos:** 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:
Fujos 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.
Fujos 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.

En el presente estudio, se evaluará la erosión fluvial, por acción de la socavación lateral y análisis de estabilidad de taludes en Tenjo.

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 4 y Figura 5), se presenta el esquema metodológico para determinar la susceptibilidad y la amenaza por socavación lateral.

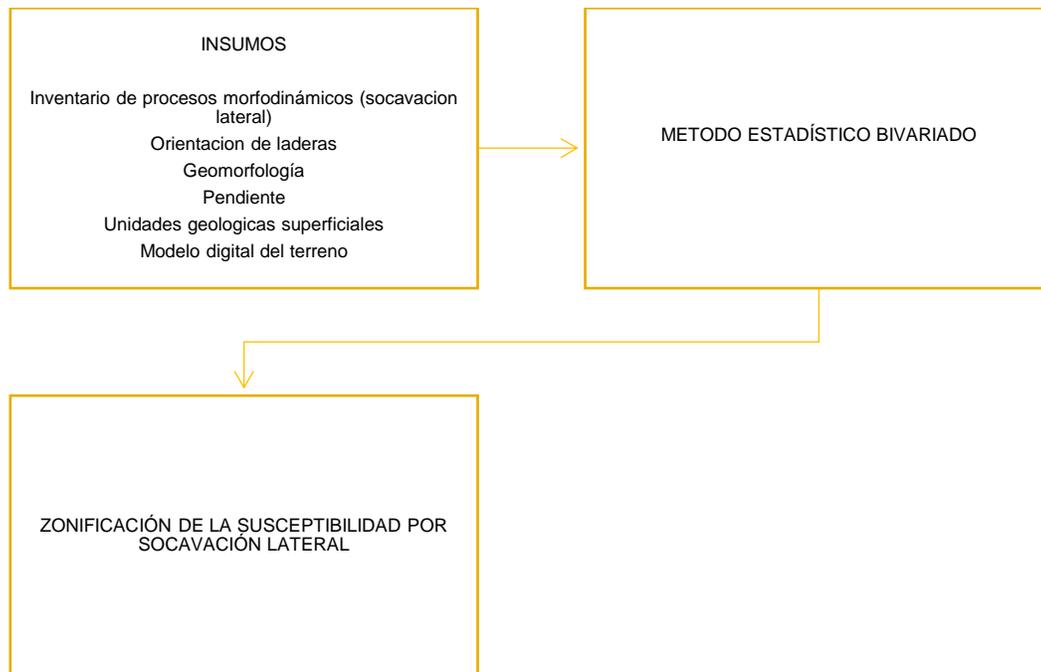


Figura 4. Flujograma metodológico para el análisis de la susceptibilidad por socavación lateral

Fuente: SGC 2017

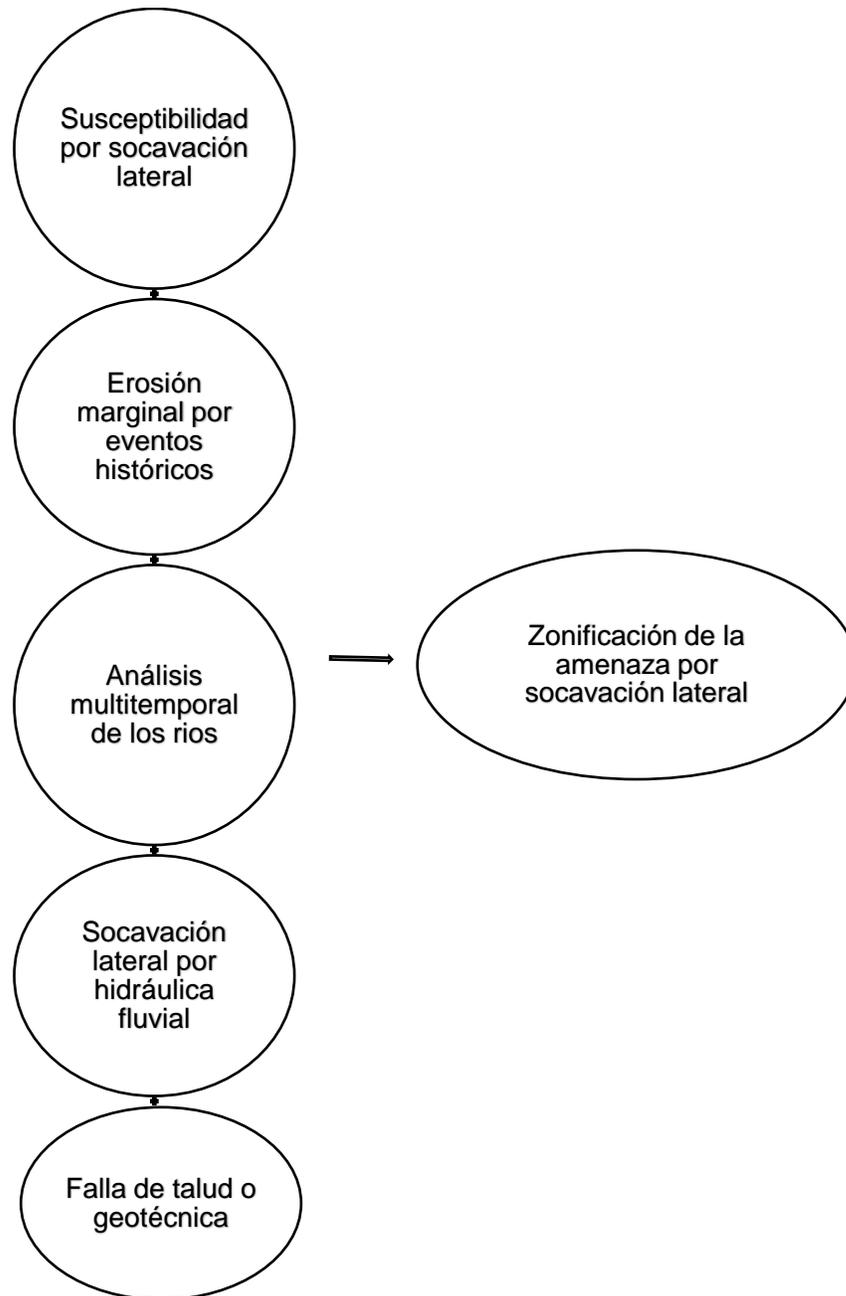


Figura 5. Flujograma metodológico para el análisis de la amenaza por socavación lateral
Fuente: Elaboración propia

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) del río Nima en el corredor Calucé - Tenjo

En el análisis de sinuosidad o movilidad de las orillas del río Nima en el sector de Calucé - Tenjo, 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 del río Nima en el corredor Calucé - Tenjo

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 del río Nima en su recorrido por el sector de Calucé - Tenjo, 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 del río 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 6 y Figura 7).

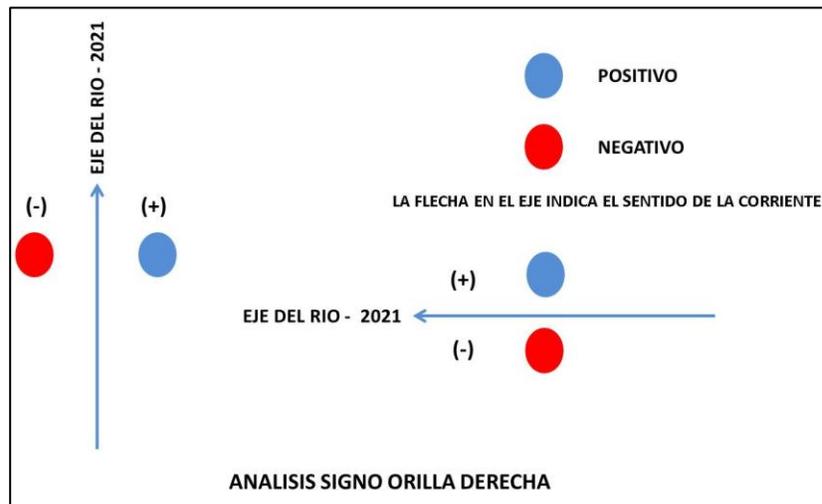


Figura 6. Determinación del signo de la orilla derecha del río, con relación a su localización con respecto al eje de referencia para el año 2021

Fuente: Elaboración propia

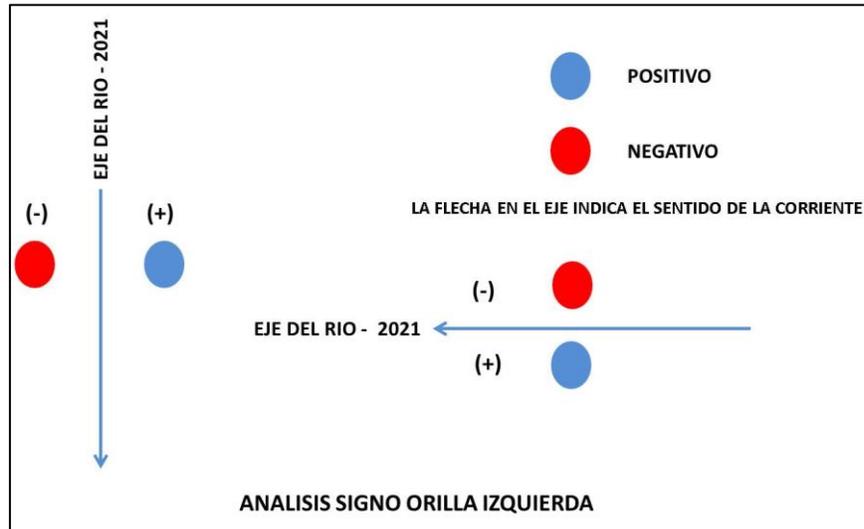


Figura 7. Determinación del signo de la orilla izquierda del río, con relación a su localización con respecto al eje de referencia para el año 2021.

Fuente: Elaboración propia

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 8 y Figura 9).

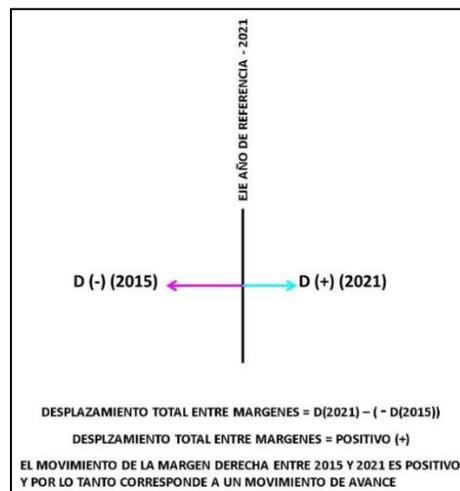


Figura 8. Cálculo del desplazamiento margen derecha río Nima para los años 2015 y 2021.

Fuente: Elaboración propia

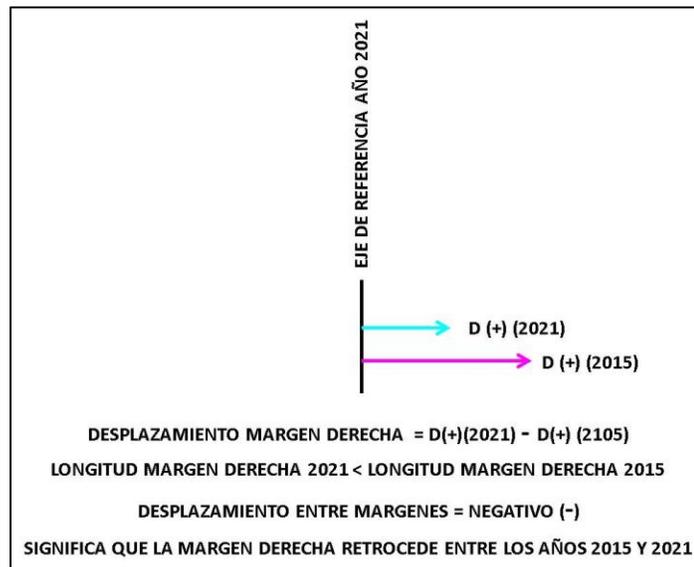


Figura 9. Cálculo del desplazamiento margen derecha río Nima para los años 2015 y 2021.

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 10), las variables fueron definidas según el análisis del grupo multidisciplinario (geólogos, ingenieros civiles, geógrafos, hidrólogos, geotecnista, entre otros).

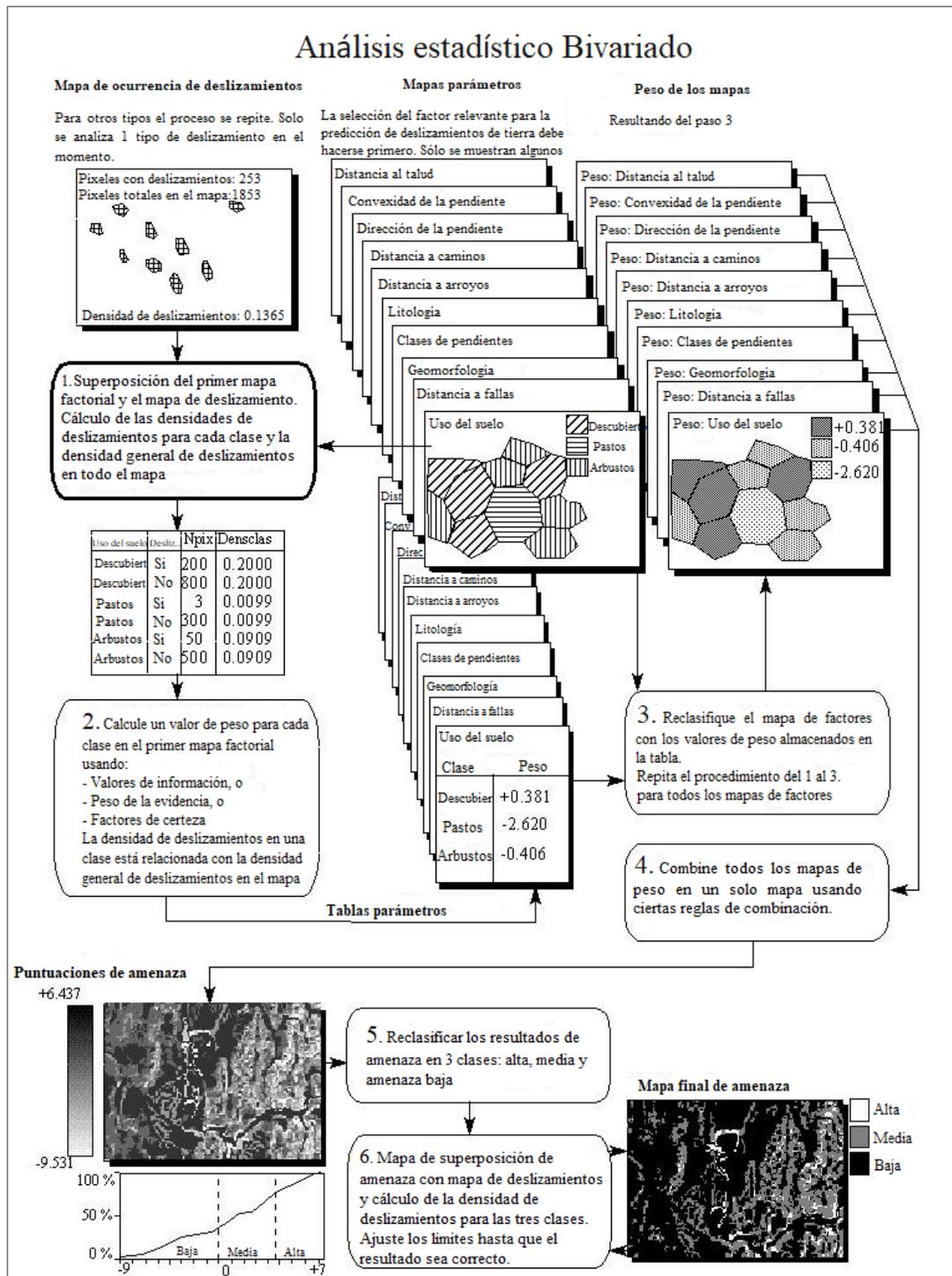


Figura 10. Diagrama de flujo simplificado del Análisis Estadístico Bivariado

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.

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

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).

$$Wj^+ = Ln \frac{P\left(\frac{D}{Bt}\right)}{P\left(\frac{D}{Bt}\right)} \text{ (Ecuación 2)}$$

$$Wj^- = Ln \frac{P\left(\frac{D}{Bj}\right)}{P\left(\frac{D}{Bj}\right)} \text{ (Ecuación 3)}$$

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.

$$Wi^+ = Ln \frac{\frac{Npix_1}{Npix_1 + Npix_2}}{Npix_3 / Npix_3 + Npix_4} \text{ (Ecuación 4)}$$

$$Wi^- = Ln \frac{\frac{Npix_2}{Npix_1 + Npix_2}}{Npix_4 / Npix_3 + Npix_4} \text{ (Ecuación 5)}$$

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:

$$LSI = \sum Wfi \text{ (Ecuación 6)}$$

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 11).

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.

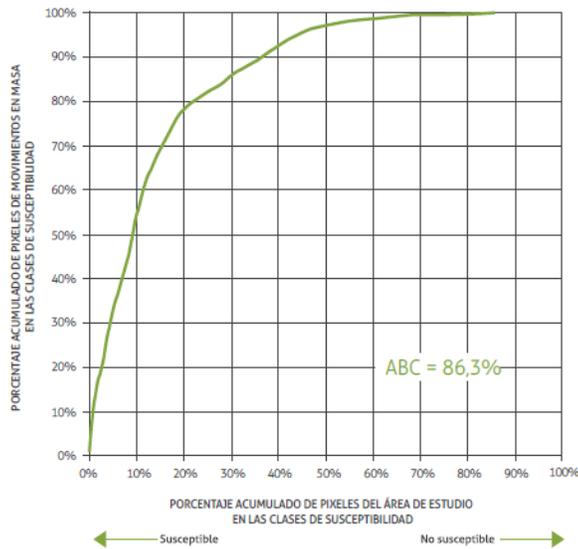


Figura 11. Ejemplo de una curva de éxito

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.

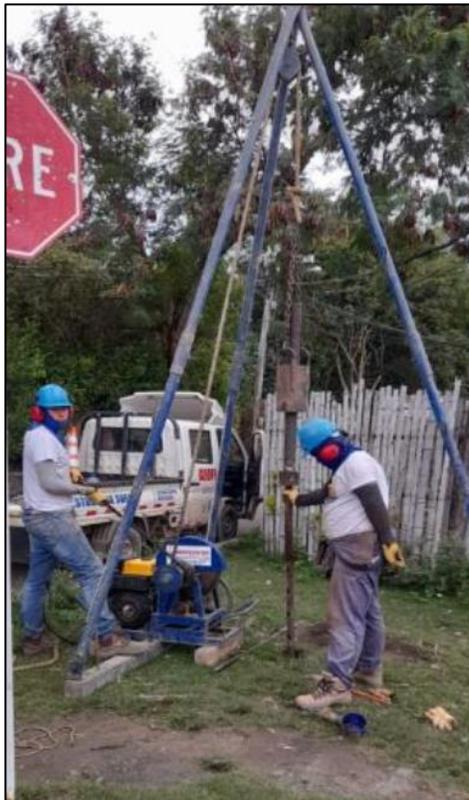


Figura 12. Montaje Equipo de Perforación SPT

Fuente: elaboración propia

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

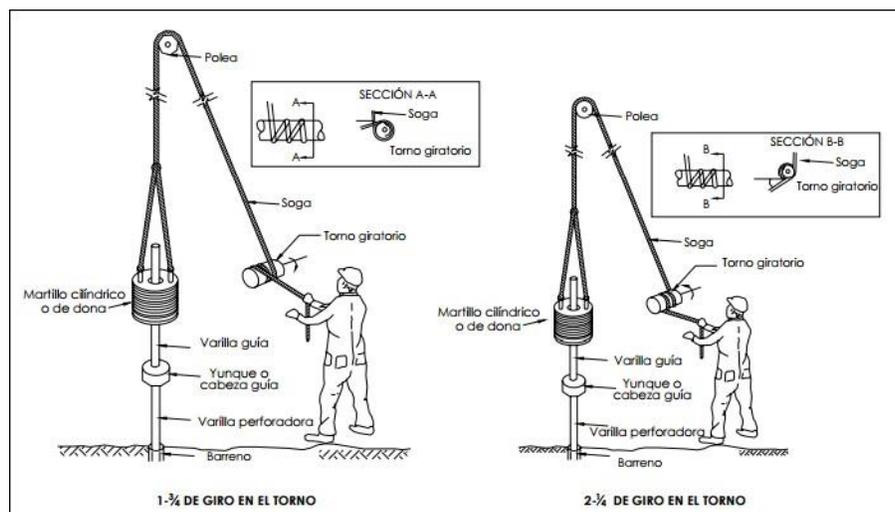


Figura 13. Esquema de Operación para Penetración por Percusión y Prueba SPT

Fuente: elaboración propia

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

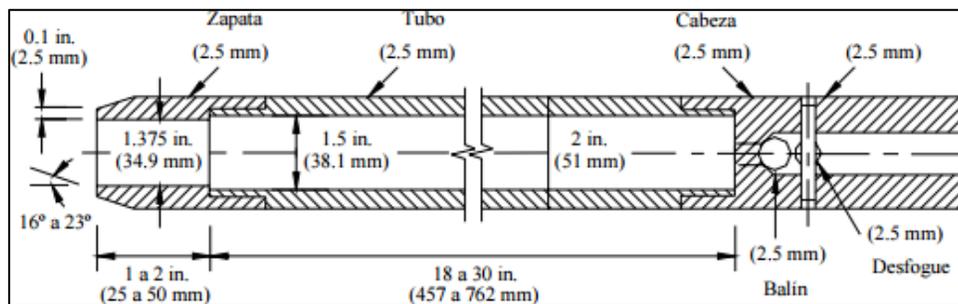


Figura 14. Características del Muestreador Empleado

Fuente: elaboración propia



Figura 15. Muestreador de Caña Partida
Fuente: elaboración propia

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 16 Sismógrafo Seistronix RAS-24

Fuente: elaboración propia



Figura 17 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.

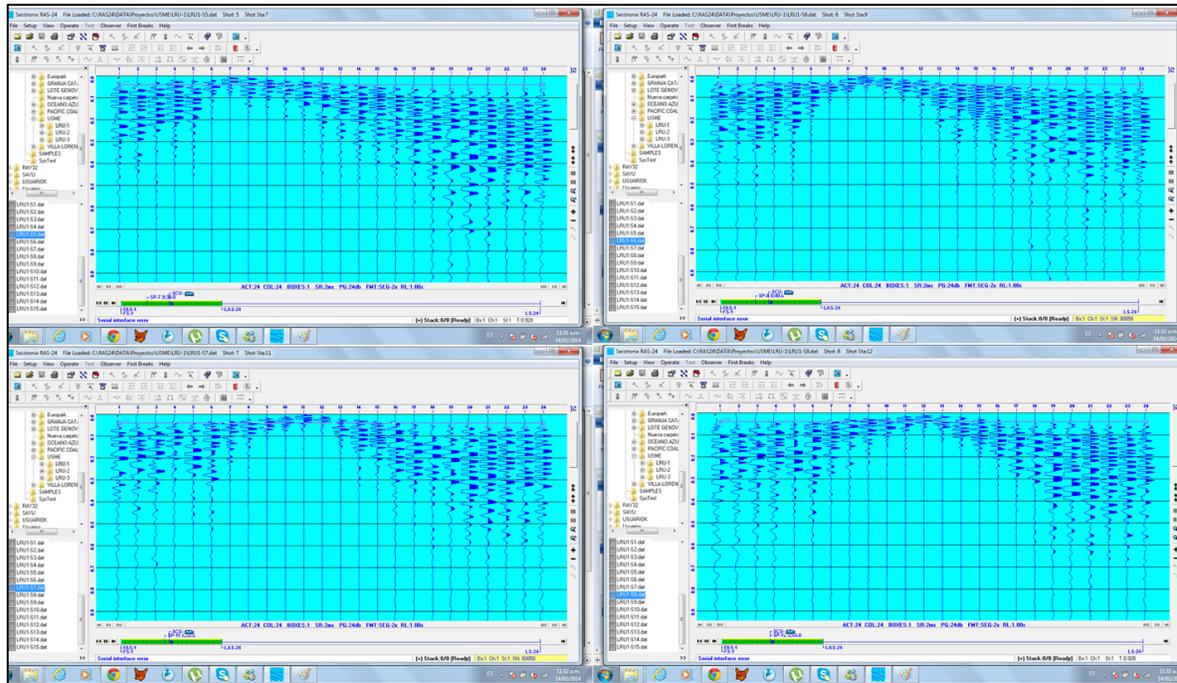


Figura 18 Ilustración típica de la captura de datos en campo mediante el software RAS-24 correspondiente a la ejecución de la línea de refracción LS-1 para ondas S

Fuente: elaboración propia

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 tomo 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 aun 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.

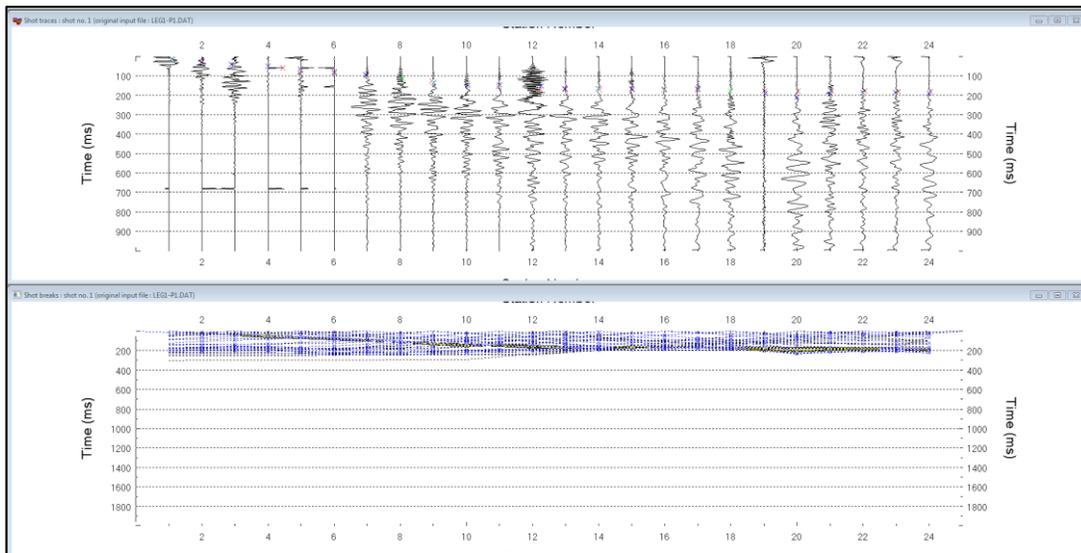


Figura 19 Ilustración típica del procesamiento de datos mediante el software Rayfract correspondiente a la línea de refracción LS-1 para ondas P
Fuente: elaboración propia

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

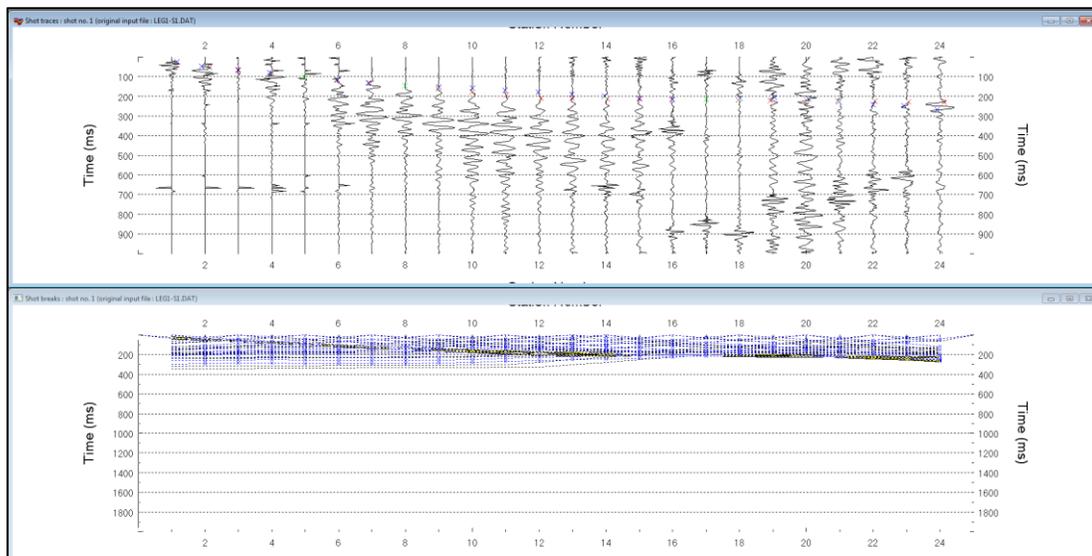


Figura 20 Ilustración típica del procesamiento de datos mediante el software Rayfract correspondiente a la línea de refracción LS-1 para ondas S
Fuente: elaboración propia

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 inconfineda 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

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 moverse 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 21 se presenta el esquema de los polígonos de erosión lateral a lo largo del cauce.

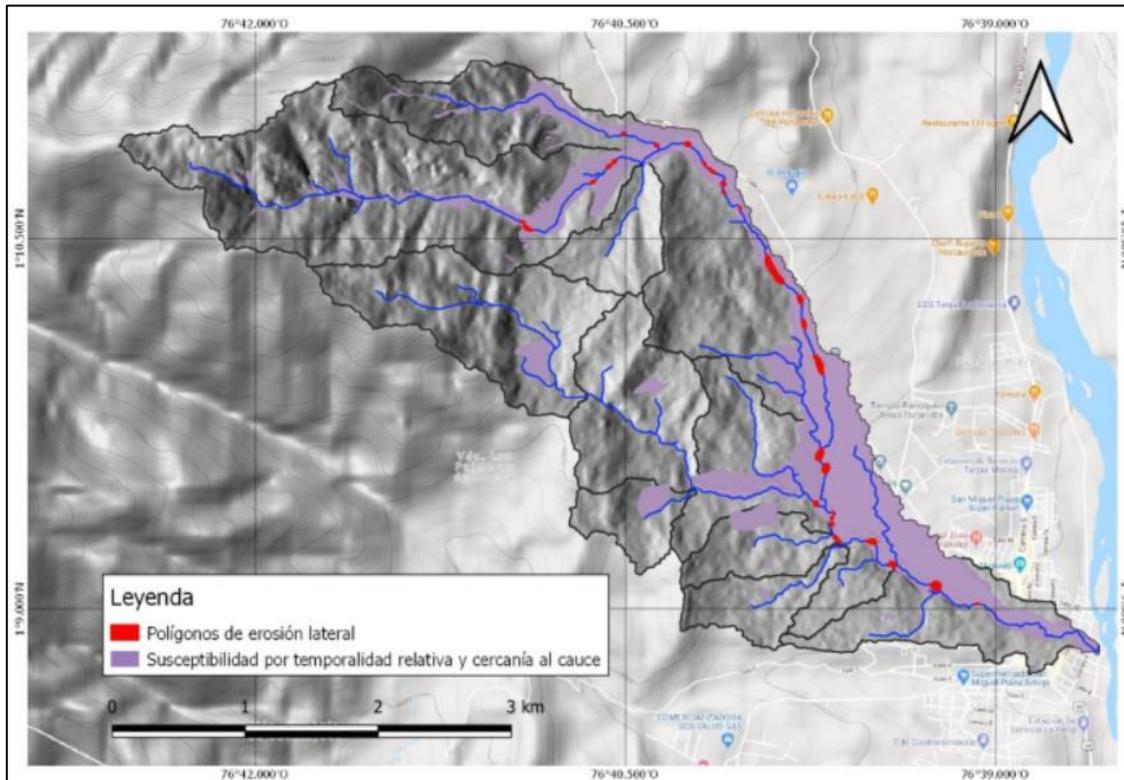


Figura 21. Esquema de polígonos de erosión fluvial a lo largo del cauce principal
Fuente: SGC y PUJ (2021)

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 (θ) (Figura 22).

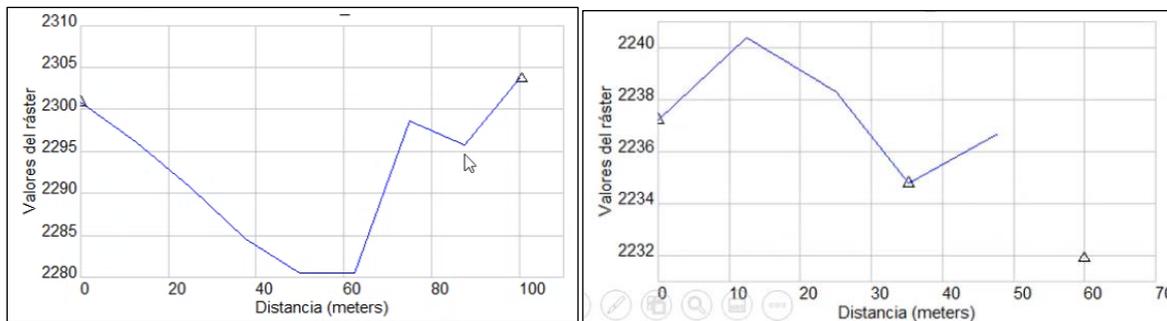


Figura 22. a) Lateral Izquierda; b) Lateral Derecha.

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 (8) (7) de cálculo del esfuerzo crítico y del esfuerzo aplicado por el flujo.

- Se calcula es esfuerzo de corte critico (τ_c) el cual está en función de las propiedades de suelo y de la geometría de la banca.
- Se iguala con la definición de (τ_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 (8) y (7)

$$\tau_b = \frac{1}{2} \rho C_f (\sqrt{u^2 + v^2})^2 \text{ (Ecuación 8)}$$

$$C_f = \frac{2 * g * \eta^2}{h^{1/3}} \text{ (Ecuación 7)}$$

Fuente: SGC y PUJ (2021)

Donde:

τ_b es el esfuerzo cortante aplicado (Pa),
 ρ es la densidad del flujo (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 (m/s^2), n es el coeficiente de Manning, h es la profundidad de la lámina de agua, como se indica en las ecuaciones (9) y (10).

$$\frac{\tau_c}{r_w(G_s-1)D_{50}} = 0.048 * \tan(\varphi) \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \theta}{\sin^2 \varphi}} \text{ si } (\varphi > \theta) \text{ (Ecuación 9)}$$

$$\tau_c = 0,1 + 0,1779(FF) + 0,0028(FF^2) - 232\varepsilon - 5(FF^2) \text{ si } (\varphi \leq \theta) \text{ (Ecuación 10)}$$

Fuente: SGC y PUJ (2021)

Donde:

τ_c es el esfuerzo de corte crítico (Pa),
 r_w es el peso unitario del agua (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,
 φ es el ángulo de fricción del material,
 θ 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 (11):

$$\varepsilon = K_d(\tau_b - \tau_c) \text{ (Ecuación 11)}$$

Donde:

ε : 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 (12):

$$K_d = \frac{2 \times 10^{-7}}{\sqrt{\tau_c}} \text{ (Ecuación 12)}$$

Fuente: SGC y PUJ (2021)

Finalmente, se calcula la longitud de erosión fluvial ($LE > 0$ presenta socavación lateral) (Figura 23) 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 (13):

$$LE = \varepsilon \Delta t \text{ (Ecuación 13)}$$

Donde:

LE: Longitud de erosión de la banca (m)

Δt : Intervalo de tiempo en el que se presenta el promedio de la magnitud de velocidad superior a la velocidad crítica

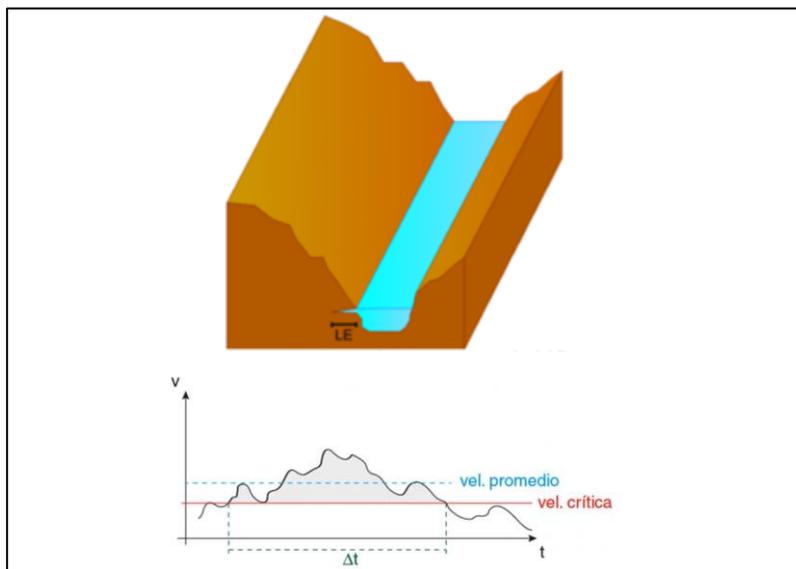


Figura 23. Longitud de Erosión de la banca por acción del flujo

Fuente: SGC y PUJ, (2021).

5.6. Falla de talud o geotécnica

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 24), 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 limite. 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 (14)

$$FS = \frac{L \cdot c}{\gamma \cdot A} \text{ (Ecuación 14)}$$

Fuente: SGC y PUJ (2021)

Donde:

L: Longitud vertical del bloque colgante

c: Cohesión

γ : Peso unitario

A: Área de la sección transversal

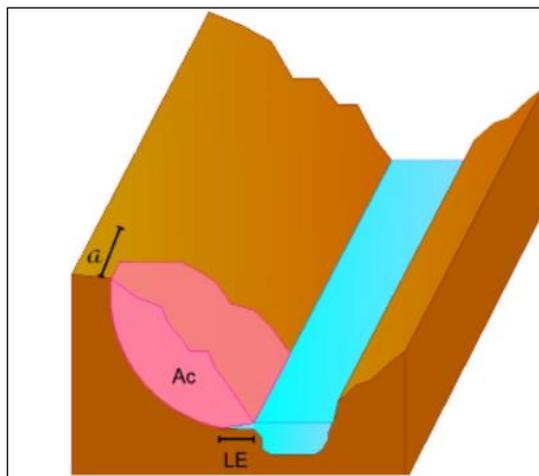


Figura 24. Análisis de estabilidad de laderas

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 36) y multitemporal (Figura 27)
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 26) y repetir los pasos 2 y 3.
5. Superponer las zonas de socavación por hidráulica fluvial (Figura 50) y repetir los pasos 2 y 3.
6. Superponer las zonas de colapso por falla geotécnica (Figura 71) 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
Falla de talud o 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 66 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 cinco (5) días repartidos en una (1) campaña de campo (Figura 25).

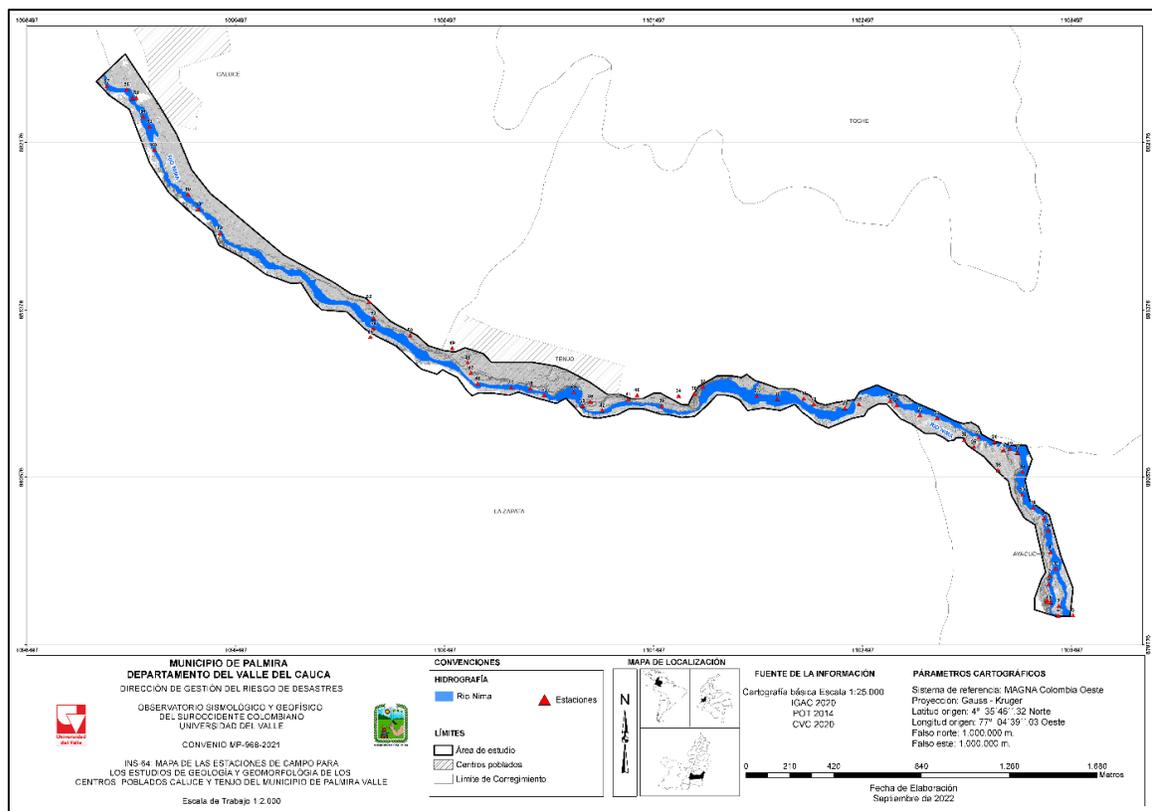


Figura 25. (INS-64) Estaciones de campo geología y geomorfología en el corredor Calucé - Tenjo
Fuente: Elaboración propia

Después de realizar los análisis de la fotointerpretación y los trabajos de campo, el corredor Calucé – Tenjo se presenta un (1) evento de socavación lateral por historicidad. A continuación (Figura 26) se presenta el mapa histórico.

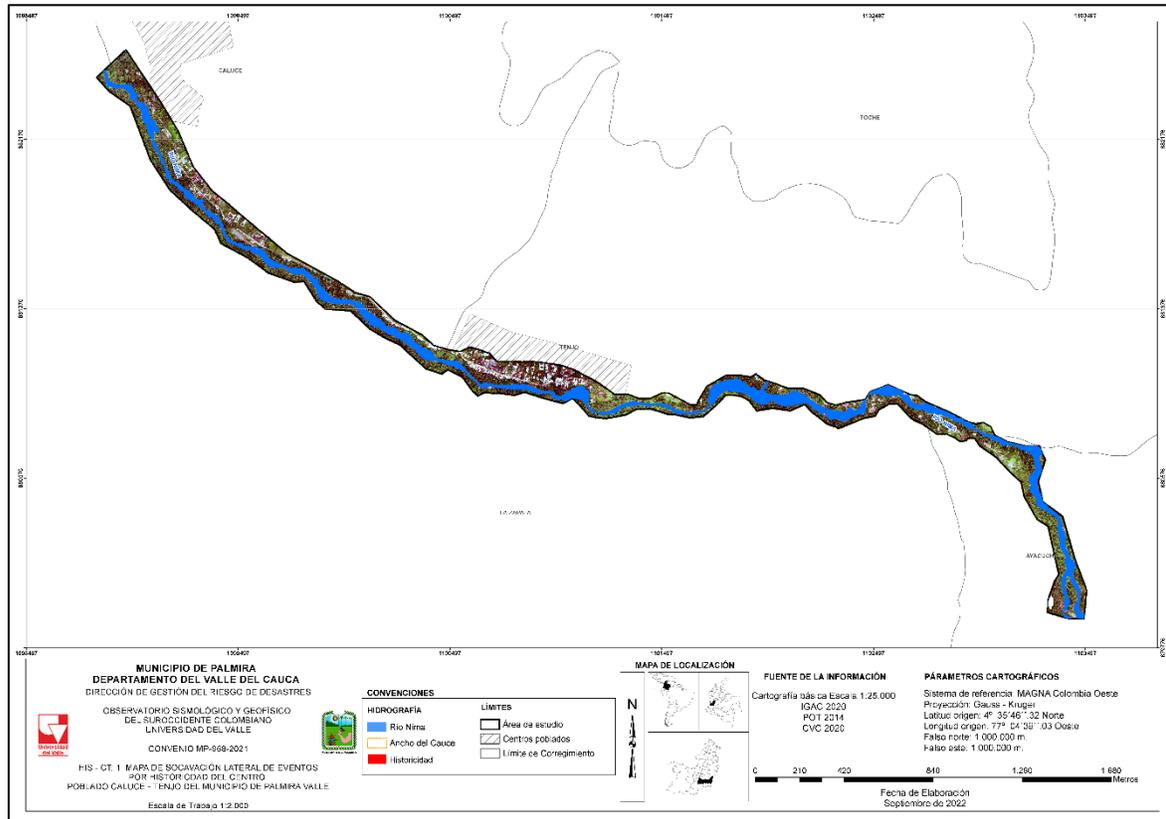


Figura 26. (HIS-CT_1) Socavación lateral de eventos por historicidad

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo a lo presentado en la anterior figura, en la zona de Tenjo hay evidencia de socavación lateral por historicidad.

6.2. Análisis dinámico fluvial

Para el análisis de orillas del río Nima en su recorrido por el sector de Calucé - Tenjo, en el municipio de Palmira, no se logró identificar una mayor movilidad o divagación del cauce durante el periodo de análisis (Figura 27).

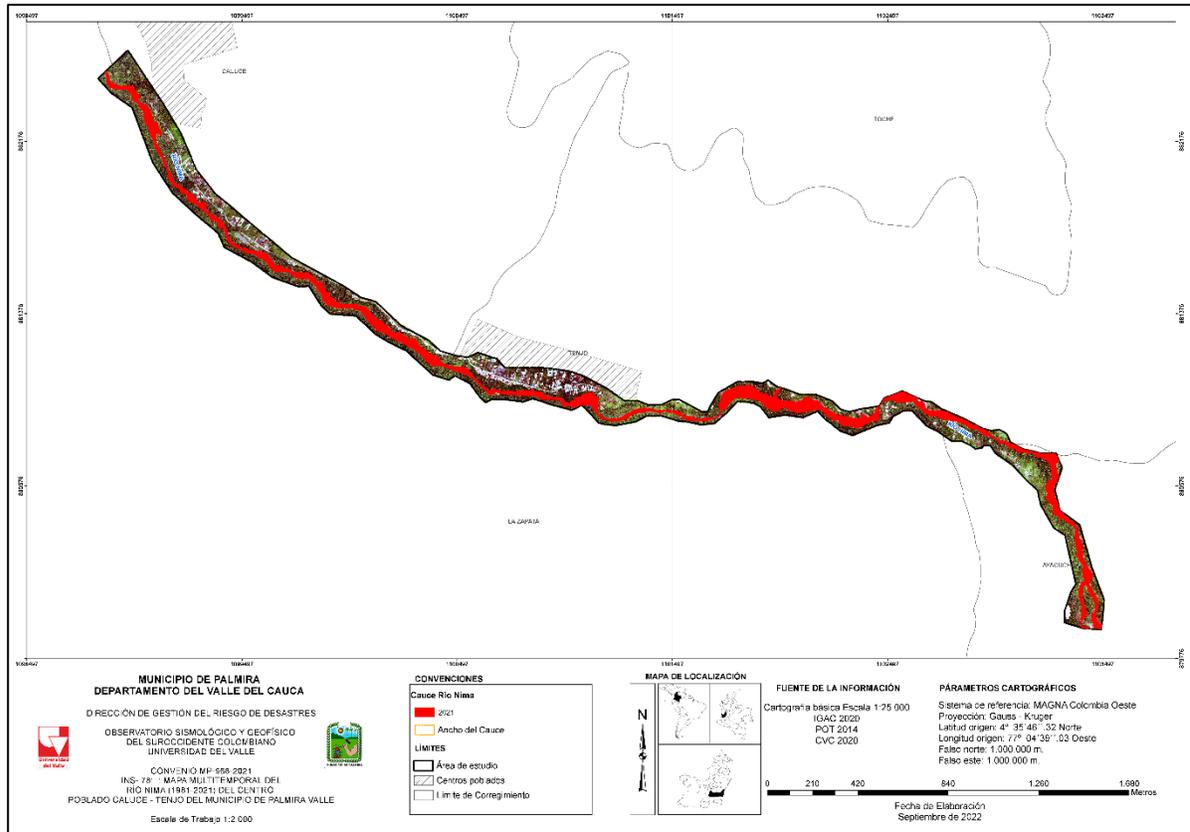


Figura 27. (INS-78) Multitemporal del río Nima (1981-2021)

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 28).

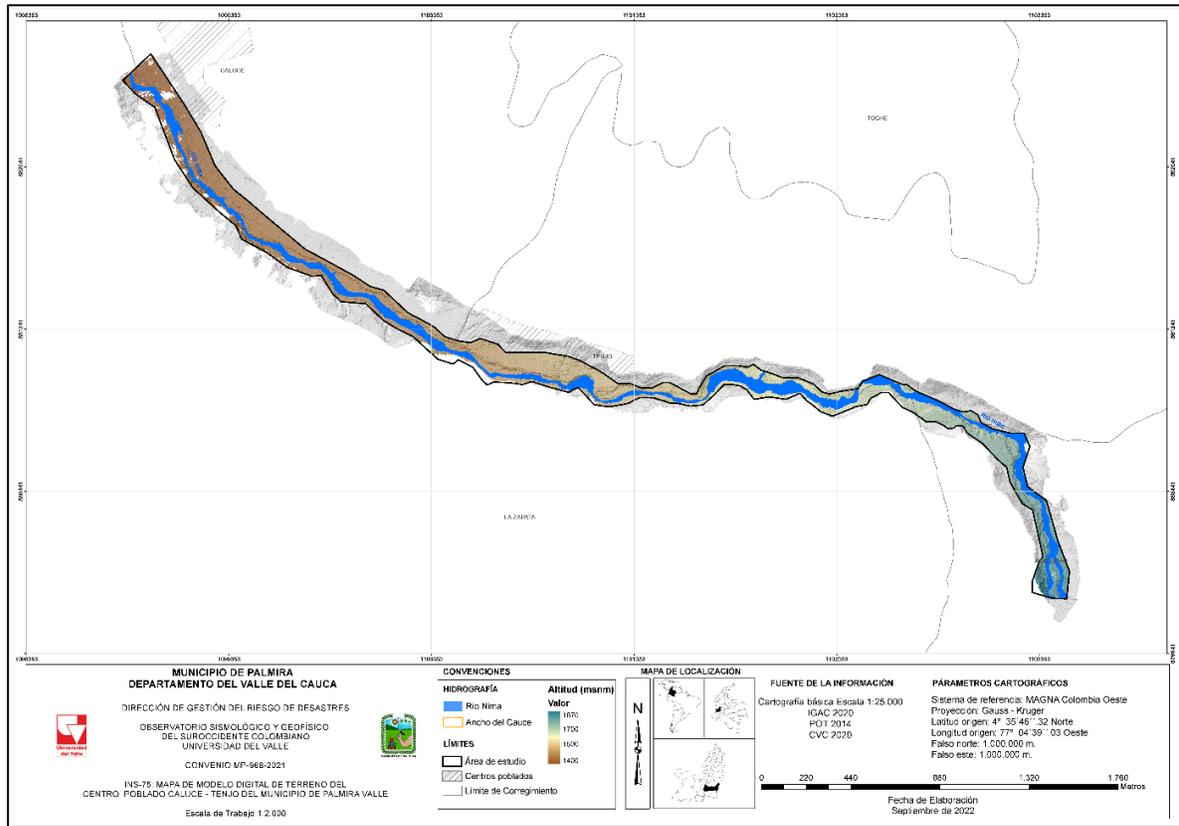


Figura 28. (INS-75) Modelo Digital del Terreno
Fuente: Elaboración propia

▪ 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 $0^\circ \geq 78^\circ$, el rango más representativo está entre los 9° y 35° , tal como puede observarse en el mapa de pendientes (Figura 29), también se denota que existen áreas planas, con ello se puede intuir que la mayor del río 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.

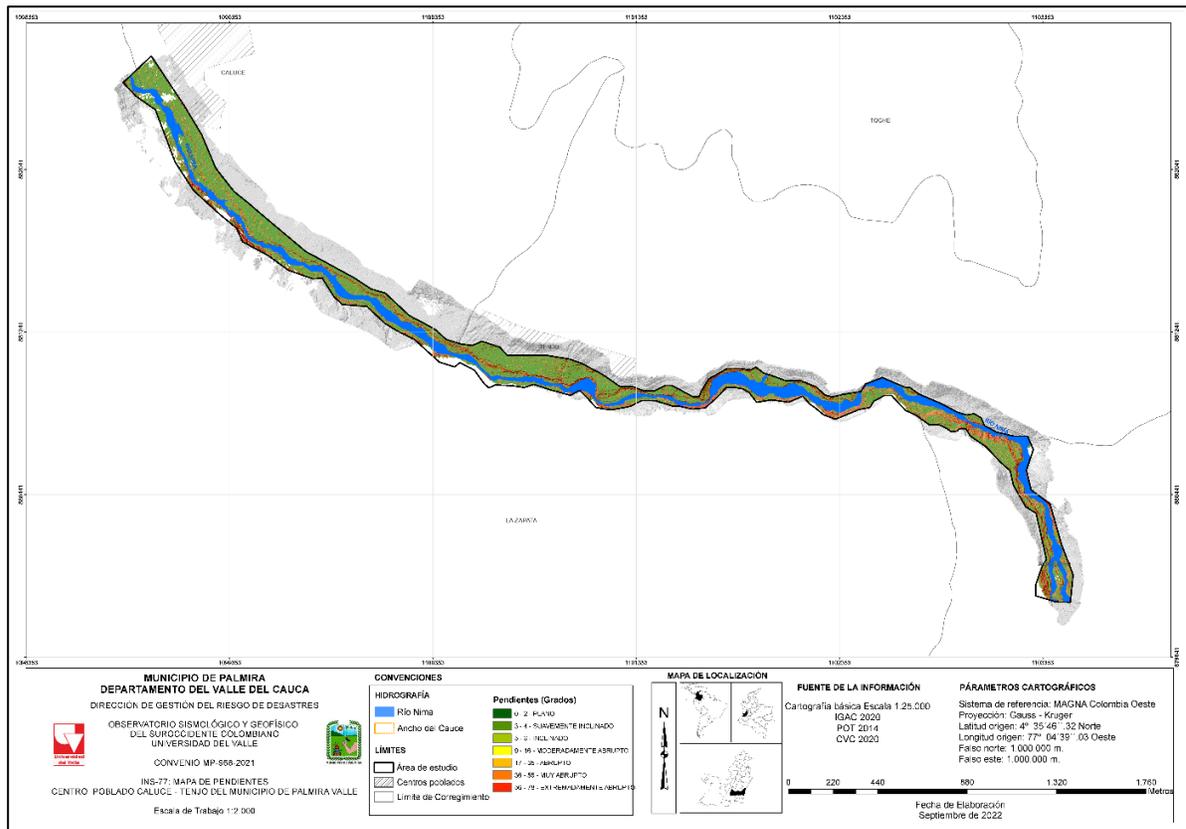


Figura 29. (INS-77) Pendientes
 Fuente: Elaboración propia

▪ **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 30), 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.

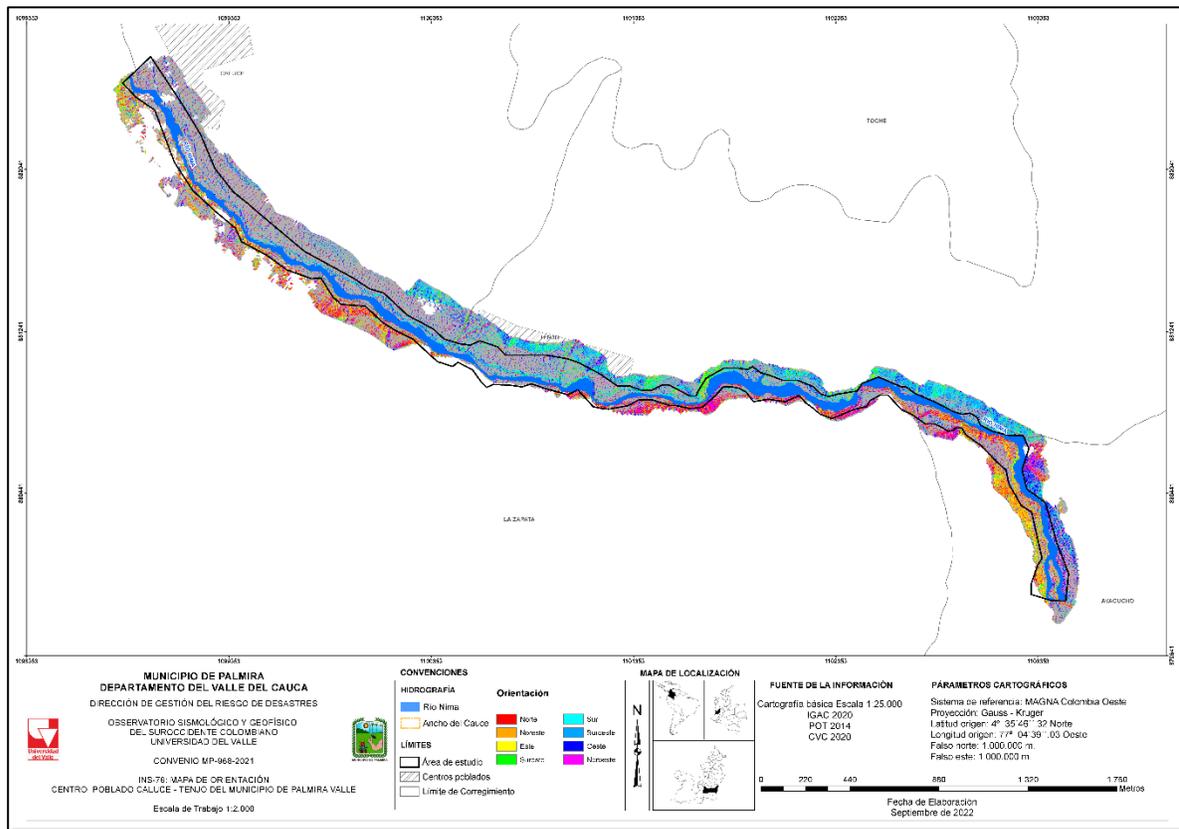


Figura 30. (INS-76) Orientación

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: Son materiales que han sufrido algún tipo de transporte, ya sea por medios naturales de tipo fluvial o aluvial, eólico, glaciar, gravedad o por medios relacionados con las actividades del hombre (antrópicos). Están conformados por materiales heterogéneos, cuya composición depende de la fuente de origen, no están consolidados, son susceptibles a generar movimientos en masa y se distribuyen desde las zonas semiplanas hasta las zonas de alta pendiente. Dentro de las unidades de suelo transportado se tienen: Suelo transportado de ceniza, Suelo transportado aluvial, Suelo antrópico, Suelo antrópico de relleno de escombros. Adicional a los suelos transportados, en el municipio se identificaron áreas con afloramientos rocosos (Roca buena, muy buena y regular calidad).

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

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

Fuente: Elaboración propia

El mapa realizado en este estudio (Figura 31), presenta diferentes unidades geológicas donde se identifican suelos transportados, suelos antrópicos y rocas. En el mapa se visualiza que el área de estudio predomina los suelos transportados.

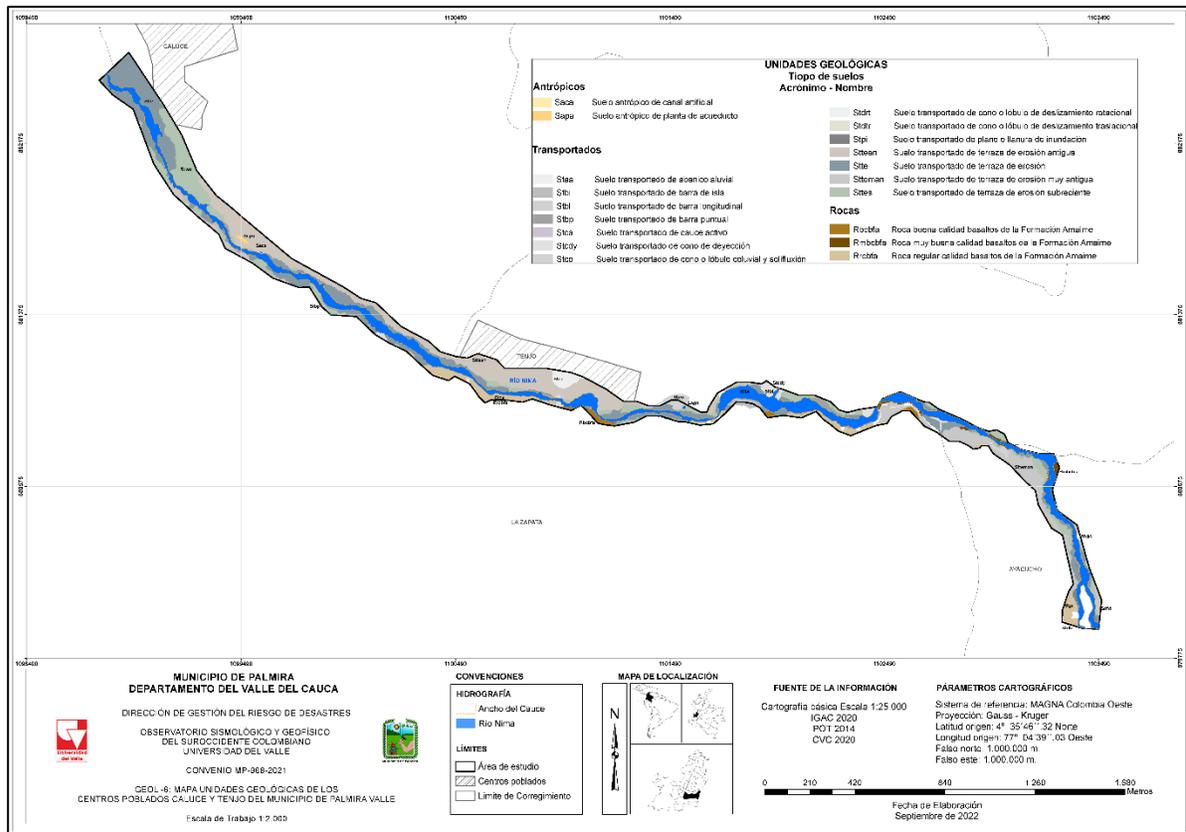


Figura 31. (GEOL-6) Unidades geológicas superficiales
Fuente: Elaboración propia

▪ **Subunidades Geomorfológicas**

Para la clasificación geomorfológica se tuvo en cuenta las características genéticas, el tipo de paisaje y relieve, la expresión morfológica, la posición topográfica, el grado de disección, el patrón de drenaje, el patrón textural y la densidad de fracturamiento. Para la descripción y clasificación de las unidades geomorfológicas en el municipio de Palmira, se utilizó la categorización geomorfo-genética del Servicio Geológico Colombiano (Carvajal, 2012). También se tuvo en cuenta las unidades geológicas cartografiadas a la escala del proyecto, 1:2.000.

En el análisis geomorfológico se usaron los datos de teledetección y la cartografía regional o local. La caracterización geomorfológica comprendió el levantamiento de datos estratigráficos y datos que inciden en el comportamiento mecánico de los materiales, caracterización sobre litología y rasgos estructurales relacionados con diaclasas, fallas y otros atributos semejantes, así como la descripción de secuencias estratigráficas en afloramientos y definición de puntos de muestreo.

Los ambientes morfogenéticos hacen alusión a las condiciones físicas, químicas, bióticas y climáticas bajo las cuales se generaron las geofomas. Su determinación se realiza con base

en la expresión e interpretación de los procesos morfológicos asentados en el terreno, los cuales impulsaron la formación, evolución y modificación de las geoformas. En la Tabla 9 se presentan cuatro (4) categorías de ambientes morfogenéticos.

Tabla 9. Siglas de las unidades geológicas superficiales en el área de estudio

Ambiente	Descripción
Denudacional (D)	Determinado por la actividad de los procesos erosivos hídricos y pluviales y principalmente producto de los procesos de meteorización, erosión y remoción en masa, sobre geoformas pre-existentes.
Fluvial (F)	Corresponde a las geoformas generadas por procesos de erosión y acumulación donde el agente principal son las corrientes de agua tales como ríos, quebradas, arroyos, lagos y lagunas.
Estructural (S)	Corresponde a las geoformas generadas por la dinámica interna de la tierra; asociada a la plegamientos y fallamientos.
Antrópico (A)	Corresponde a todas aquellas geoformas producto de la actividad del hombre y que modifican la superficie del terreno.

Fuente: Tomado y modificado (Carvajal, 2012)

Teniendo en cuenta los criterios descritos y los ambientes morfogenéticos de la Tabla 9 como resultado de la fase de fotointerpretación y el trabajo en la fase de campo para el municipio de Palmira se determinó la existencia de cuatro (4) ambientes morfogenéticos; denudacional (D), fluvial (F), estructural (E) y antrópico (A); lográndose determinar 8 para el denudacional (D), 17 para el fluvial (F), 1 para el estructural (E) y 4 para el ambiente antrópico; los cuales se encuentran distribuidos espacialmente como se ilustra en la Figura 32.

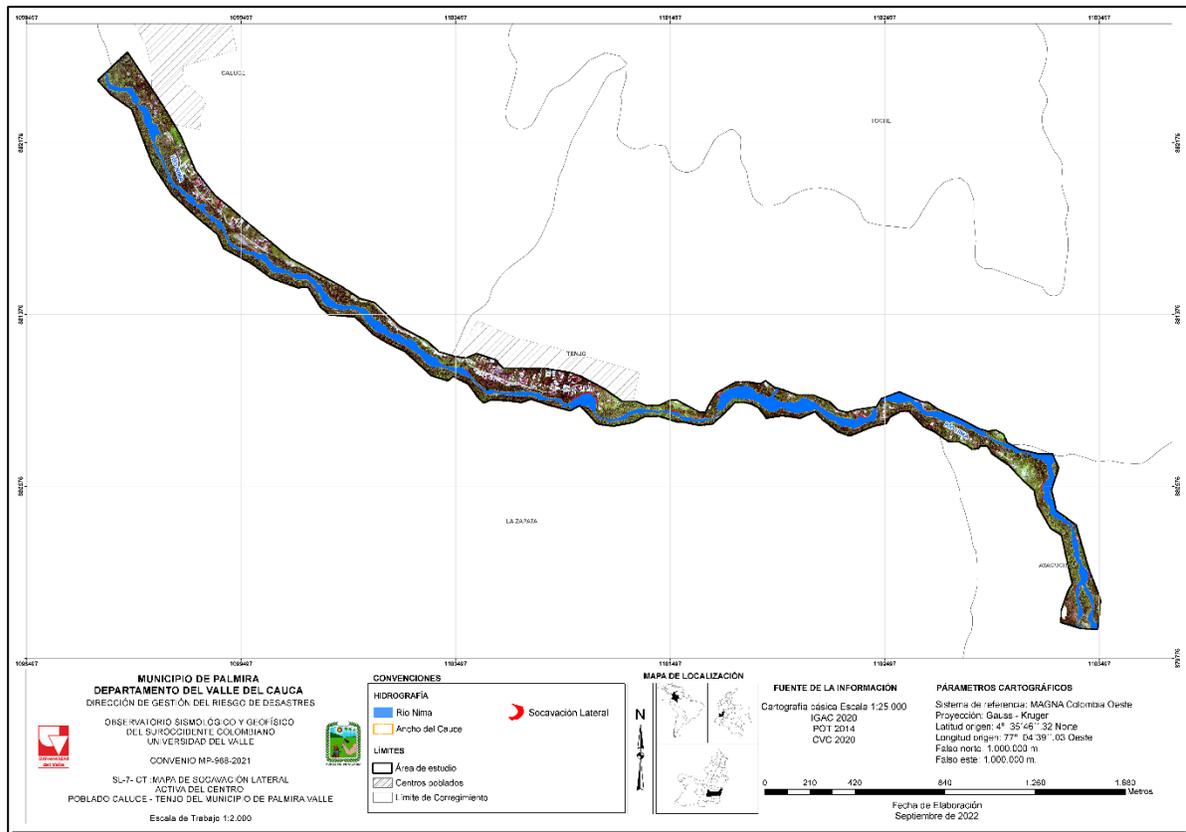


Figura 33. (SL-7-CT) Socavación lateral activa
Fuente: Elaboración propia.

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	204	14.01	4186	0.06	204	125 2	3982	65290 70	5.4375 2	- 0.1503 4	5.5878 6
Inclinado	30	2.06	2990	0.05	30	142 6	2960	65302 66	3.8172 2	- 0.0203 7	3.8375 8
Moderadamente Abrupto	700	48.08	15481 36	23.6 9	700	756	15474 36	49851 20	0.7078 3	- 0.3850 7	1.0929 0
Abrupto	235	16.14	34155 0	5.23	235	122 1	34131 5	61917 06	1.1279 6	- 0.1223 6	1.2503 2
Muy Abrupto	85	5.84	3838	0.06	85	137 1	3753	65294 18	4.6213 0	- 0.0595 8	4.6808 7
Extremadamente Abrupto	2	0.14	39815 56	60.9 3	2	145 4	39815 54	25517 00	- 6.0950 7	0.9387 7	- 7.0338 4
Suavemente Inclinado	200	13.74	65245 6	9.98	200	125 6	65225 6	58808 00	0.3190 6	- 0.0425 8	0.3616 4

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 la 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

Variabes	Rango en pesos
Modelo digital de elevación (DEM)	-0.992 a 0.604
Pendiente	-7.033 a 5.587
Orientación de las laderas	-0.662 a 1.297
Unidades geológicas superficiales	-3.089 a 2.983
Geomorfología	-0.992 a 0.604

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 34 se muestra el ejemplo del mapa w_f de la variable pendiente. En el Anexo 1 se puede ver las otras variables reclasificadas.

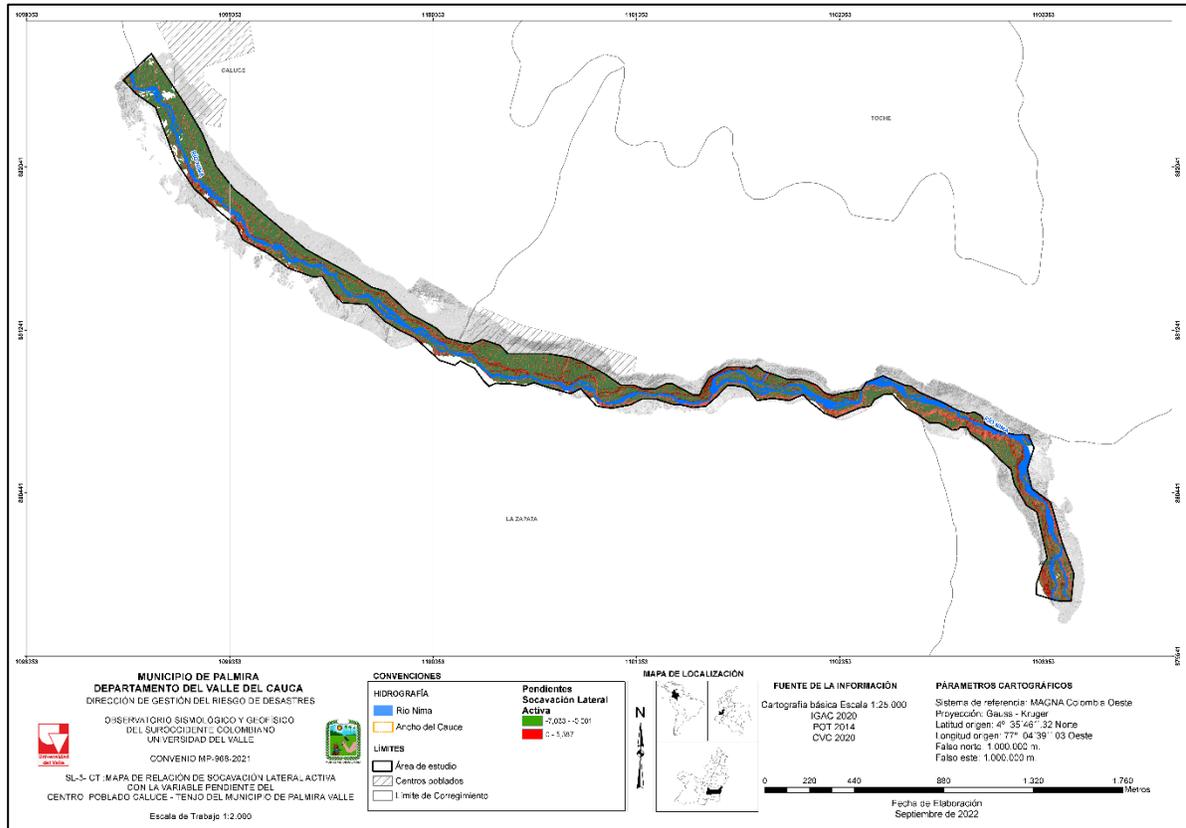


Figura 34. (SL-5-CT) Relación de la socavación lateral activa con la variable pendiente
Fuente: Elaboración propia.

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 71.1 (Figura 35), con la cual, se valida el modelo de susceptibilidad por socavación lateral (Figura 36), dado que es mayor al 70%.

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
12.75_7.56	Muy Alta	506	34.75	7000	3.08	34.75	35%	3.08	3%	0.54
7.56_4.33	Alta	400	27.47	40326	17.74	62.23	62%	20.82	21%	8.6
4.33_2.48	Media	100	6.87	60000	26.39	69.09	69%	47.21	47%	17.33
2.48_16.67	Baja	450	30.91	120000	52.79	100	100%	100	100%	44.63
TOTAL		1456		227326		Y		X		71.1

Tabla 12. Rangos y porcentaje del área bajo la curva

Fuente: Elaboración propia

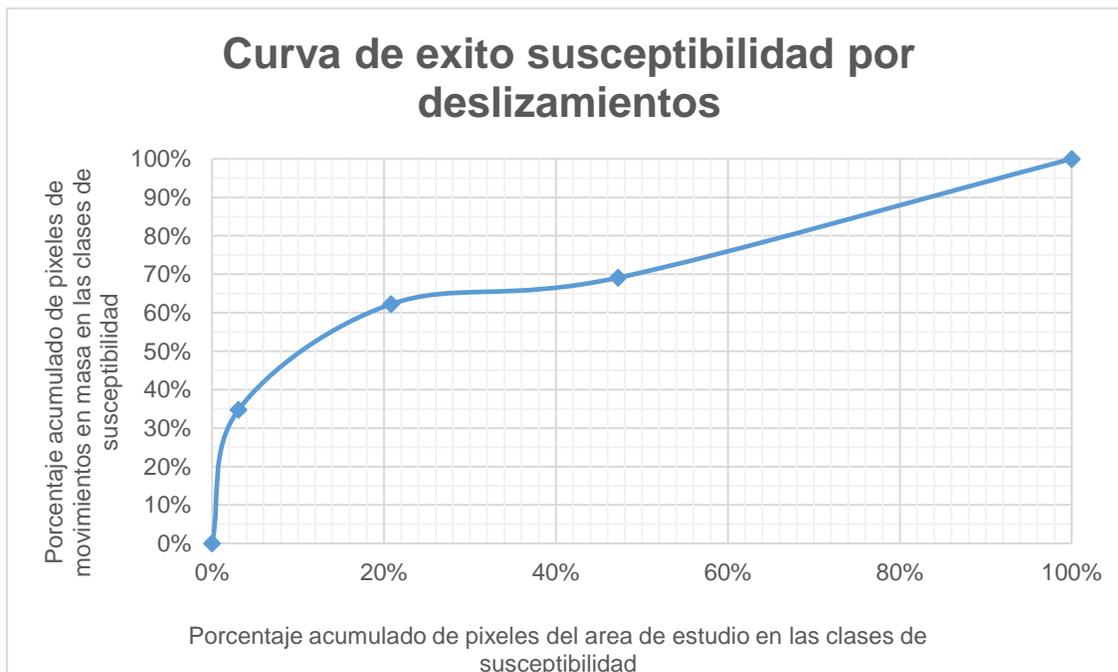


Figura 35. Curva de éxito susceptibilidad por socavación lateral

Fuente: Elaboración propia

A continuación, se presenta la susceptibilidad por socavación lateral.

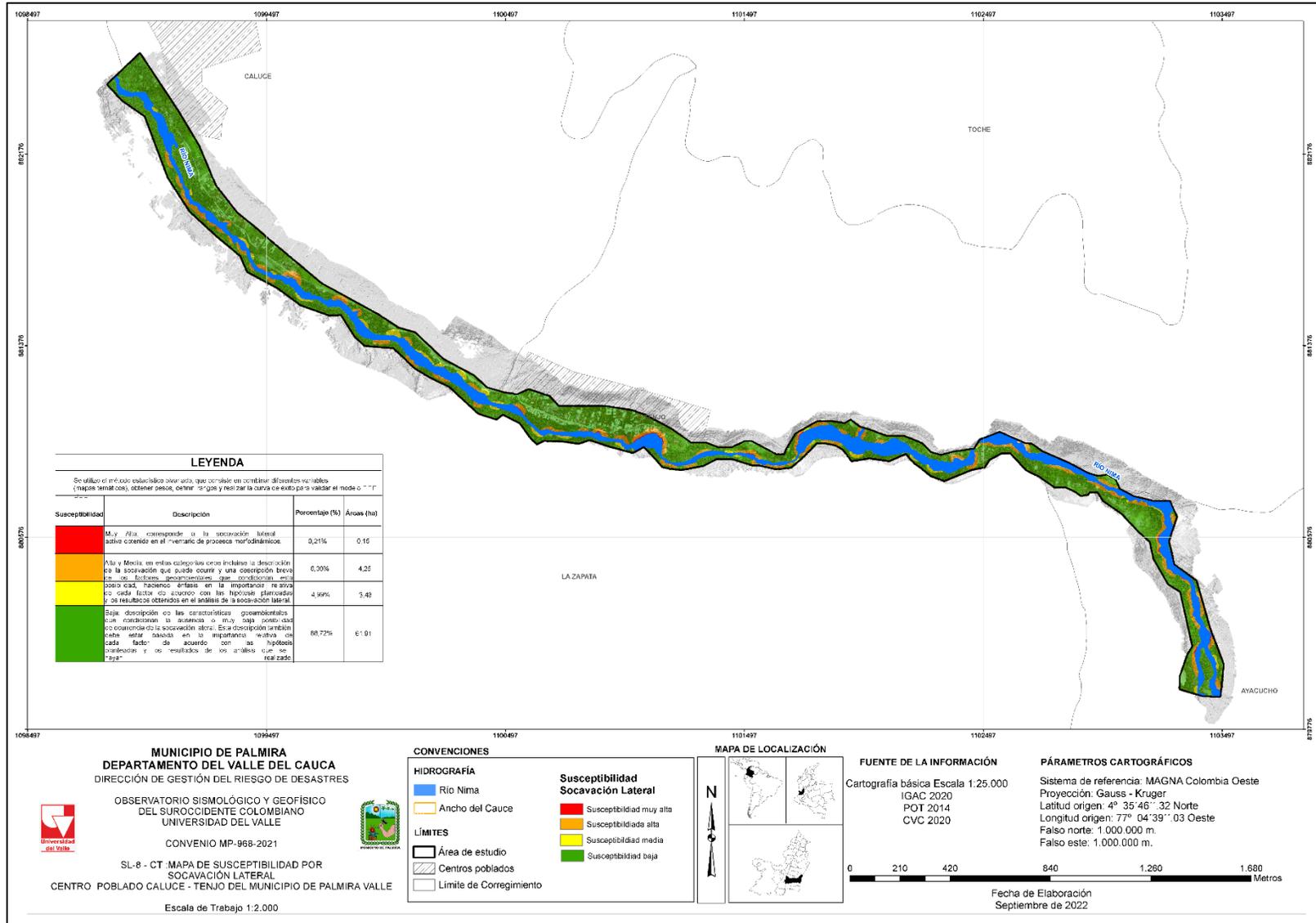


Figura 36. (SL-8-CT) Susceptibilidad por socavación lateral

Fuente: Elaboración propia.

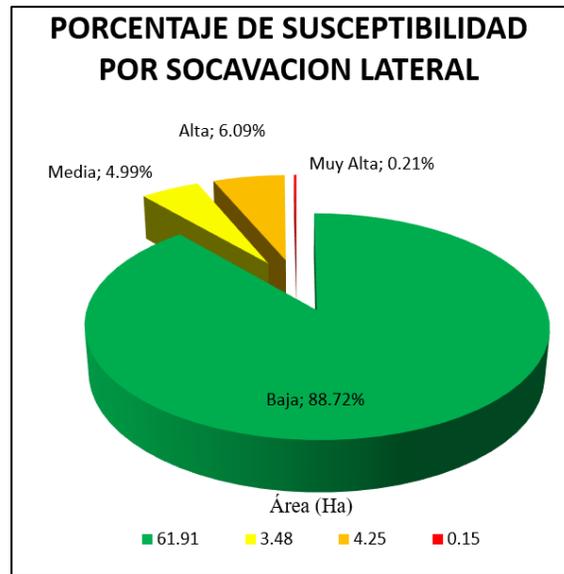


Figura 37. Porcentaje de susceptibilidad por socavación lateral
Fuente: Elaboración propia.

En el mapa de susceptibilidad, se presentan las zonas propensas a socavación lateral en las categorías muy alta, alta, media y baja para el corredor Calucé - Tenjo, en el municipio de Palmira (Figura 36), 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 la parte alta de la zona de estudio en el río Nima con un porcentaje de 0.21 %.

- **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 del río. Nótese que la susceptibilidad alta abarca una proporción de 6.09 % dentro de la zona de estudio.

- **Susceptibilidad media:**

En conclusión, esta categoría de susceptibilidad comprende aproximadamente el 4.99 % 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 37, la susceptibilidad baja por socavación lateral se presenta en el 88.72 % 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 de talud o geotécnica) y la socavación lateral por hidráulica fluvial del río Nima, la consistió en la ejecución de una (1) perforaciones SPT a una profundidad de 1,50m, un (1) 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 05 de marzo del 2022, la investigación del subsuelo que consistió en un (1) sondeo (Tabla 13 y Figura 38) a uno punto cinco (1,50) metros.

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

Sondeo	Coordenadas Gps	
	Latitud	Longitud
1	3°31'12.5"N	76°10'11.7"W

Fuente: Elaboración propia

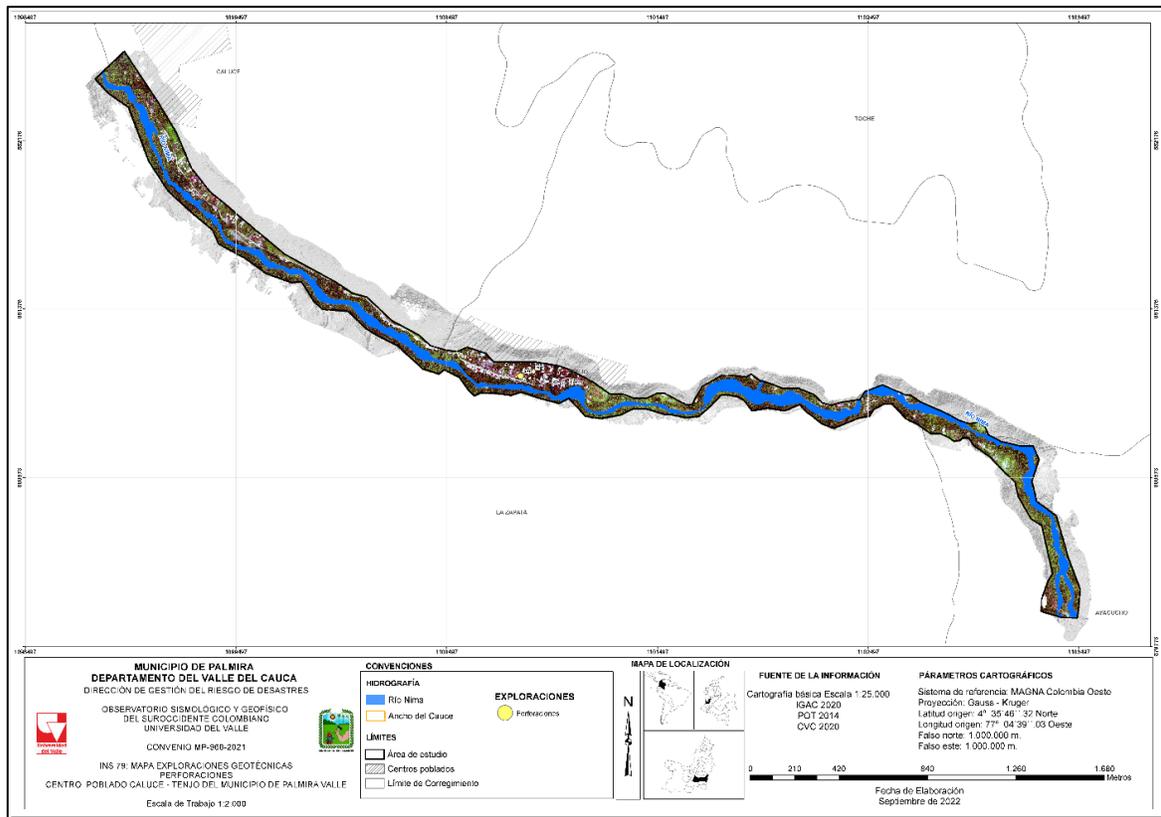


Figura 38. (INS-79) Exploraciones geotécnicas – Perforación SPT
Fuente: Elaboración propia



Sondeo 1

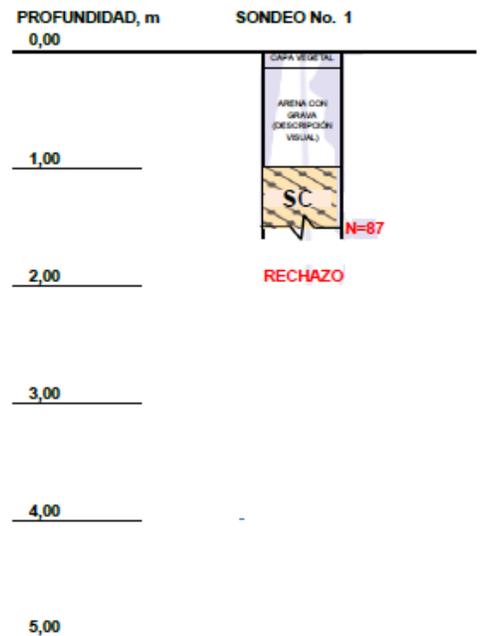


Figura 39 Perfil estratigráfico del sondeo
 Fuente: Elaboración propia

En el Sondeo No. 1, hasta una profundidad de 1,50 metros, se encuentra capa vegetal (descripción visual), de 0,15 a 1,00 metros, se encuentra arena con grava (descripción visual), de 1,00 a 1,50 metros, se encuentra arena arcillosa (SC), rechazo, Fin del Sondeo. No se encontró nivel freático (Figura 39).

Ensayos de laboratorio SPT

En la siguiente tabla se reportan los resultados obtenidos de los ensayos de laboratorio realizados.

Tabla 14 Relación de resultados de ensayos de laboratorio realizados a las muestras recuperadas en las labores de exploración

SONDEO N°:	Muestra No.	Profundidad m	ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO (%PASA)											Límites de Atterberg			Clasificación Límite	Humedad Natural (%)	Clasificación SUCS	MASA UNITARIA			N _{spt}	G _s FINOS g/cm ³	CORTE						
			GRAVA							ARENA				Limo y arcilla	qu (kg/cm ²)	ω (°)				c (kPa)											
			4"	3"	2"	1½"	1"	¾"	½"	¼"	N°4	N°10	N°40	N°200							LL	LP			IP						
1	*	0,00-0,15	CAPA VEGETAL (DESCRIPCIÓN VISUAL)											*	*	*	*	*	*												
	*	0,15-1,00	ARENA CON GRAVA (DESCRIPCIÓN VISUAL)											*	*	*	*	*	*												
	1	1,00-1,50								100,0	87,3	73,8	53,1	35,2	26,2	18,7	7,5	CL	12,3	SC				87							

Fuente: Elaboración propia

6.4.2. Apique

Se llevó a cabo el día 05 de marzo del 2022, la investigación del subsuelo que consistió en un (1) apique (Tabla 15 y Figura 40) a dos (2,00) metros de profundidad.

Tabla 15 Relación de los apiques realizados, coordenadas (geográficas)

Apique	Coordenadas Gps	
	Latitud	Longitud
1	3°31'16.8"N	76°10'20.3"W

Fuente: Elaboración propia

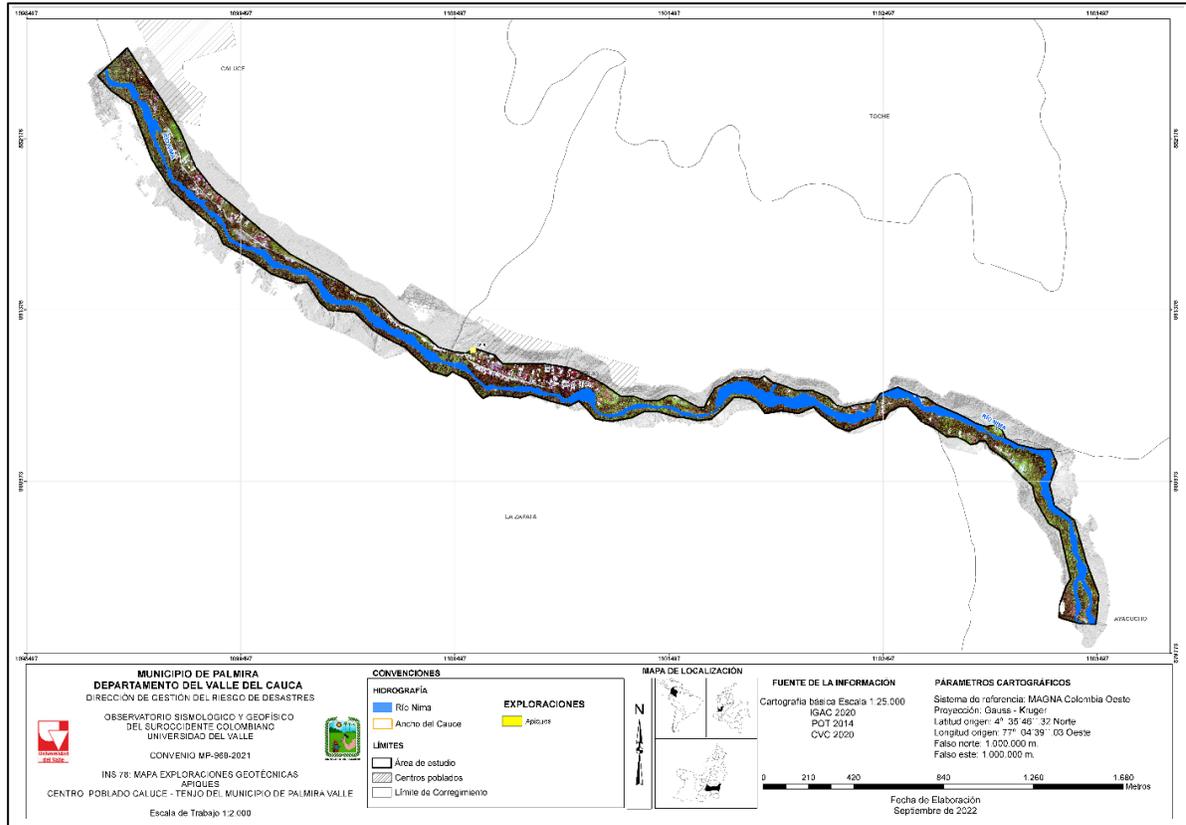


Figura 40. (INS-78) Exploraciones geotécnicas – Apique

Fuente: Elaboración propia



Apique 1

Tabla 17 Relación de las líneas sísmicas realizadas, coordenadas (geográficas)

Línea Sísmica		Coordenadas Geográficas		Longitud (m)	Profundidad (m)
		Oeste	Norte		
1	Inicio	76° 9'58.50"O	3°31'10.80"N	115	44
	Fin	76°10'2.10"O	3°31'12.04"N		
2	Inicio	76°10'14.69"O	3°31'12.41"N	116	45
	Fin	76°10'18.44"O	3°31'13.50"N		
3	Inicio	76°10'8.98"O	3°31'11.27"N	117	52
	Fin	76°10'12.53"O	3°31'12.12"N		

Fuente: Elaboración propia

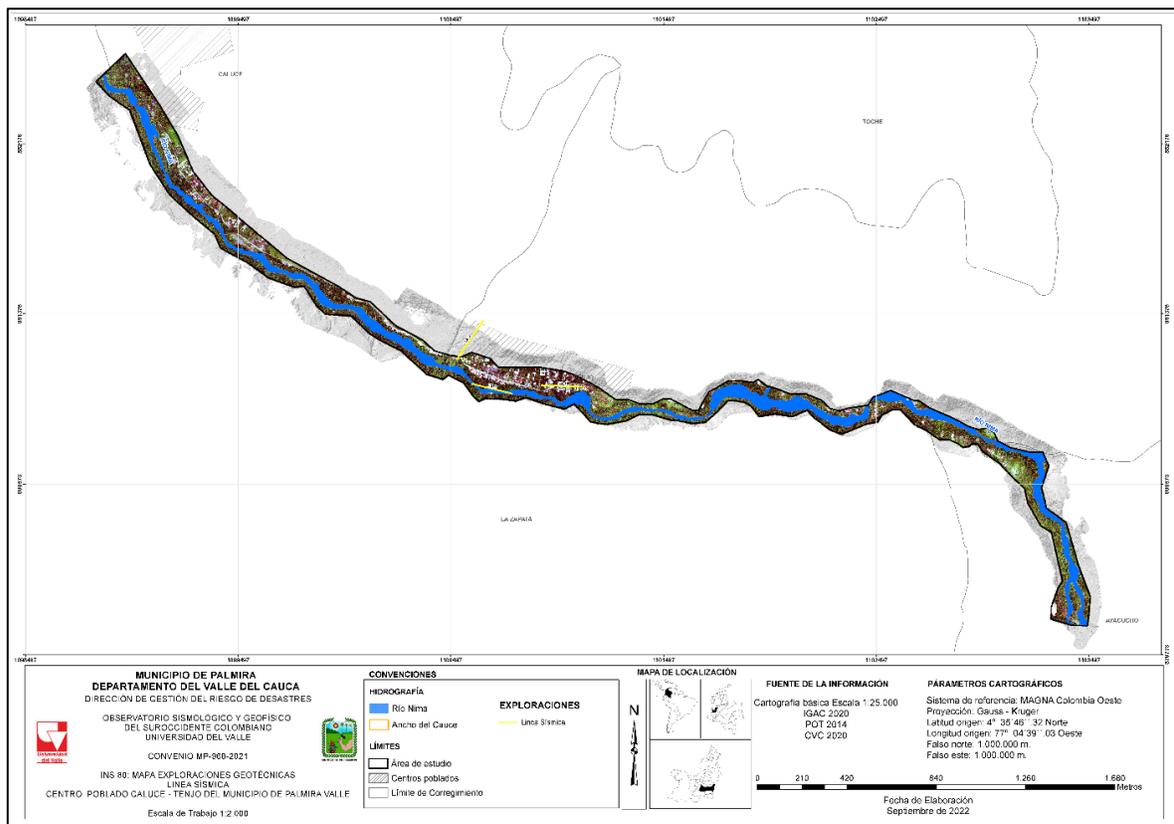


Figura 42. (INS-80) Exploraciones geotécnicas – Líneas sísmicas

Fuente: Elaboración propia



Línea Sísmica 1



Línea Sísmica 2



Línea Sísmica 3

La línea sísmica LS-3 se realizó en la corona del barranco en donde se presenta la mayor socavación lateral activa en el corregimiento de Tenjo. En la figura 43 se ilustra los resultados sísmicos de dicha línea.

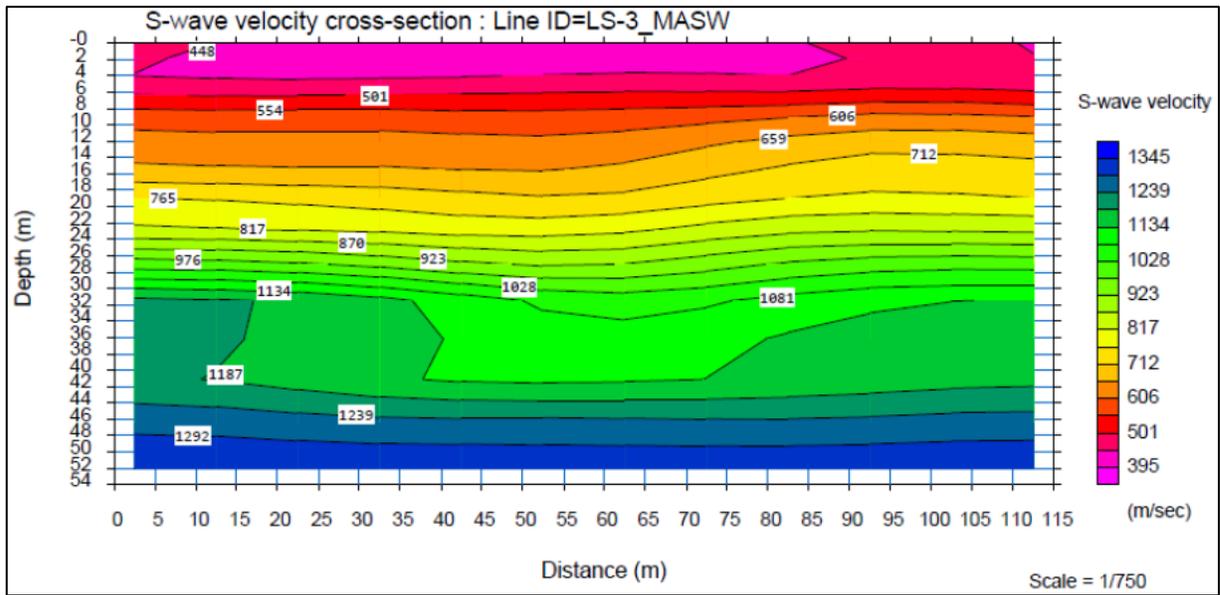


Figura 43. Modelo 2D (MASW) de velocidad de onda S, – Líneas sísmicas LS-3
Fuente: Elaboración propia

Teniendo en cuenta los resultados de las velocidades de onda S presentados en el modelo 2D de MASW, es posible clasificar los perfiles del suelo (ver Figura 44) según la Norma Sismo Resistente 2010 NSR-10 (Tomado de la Tabla A.2.4-1 de la Norma Sismo Resistente 2010 NSR-10). La Tabla 18 muestra la clasificación de los perfiles de suelo en términos de los valores máximos y mínimos de V_s , según la NSR-10.

Tipo de perfil	Descripción	Definición
A	Perfil de roca competente	$\bar{v}_s \geq 1500$ m/s
B	Perfil de roca de rigidez media	$1500 \text{ m/s} > \bar{v}_s \geq 760$ m/s
C	Perfiles de suelos muy densos o roca blanda, que cumplan con el criterio de velocidad de la onda de cortante, o	$760 \text{ m/s} > \bar{v}_s \geq 360$ m/s
	perfiles de suelos muy densos o roca blanda, que cumplan con cualquiera de los dos criterios	$\bar{N} \geq 50$, o $\bar{s}_u \geq 100$ kPa (≈ 1 kgf/cm ²)
D	Perfiles de suelos rígidos que cumplan con el criterio de velocidad de la onda de cortante, o	$360 \text{ m/s} > \bar{v}_s \geq 180$ m/s
	perfiles de suelos rígidos que cumplan cualquiera de las dos condiciones	$50 > \bar{N} \geq 15$, o $100 \text{ kPa} (\approx 1 \text{ kgf/cm}^2) > \bar{s}_u \geq 50 \text{ kPa} (\approx 0.5 \text{ kgf/cm}^2)$
E	Perfil que cumpla el criterio de velocidad de la onda de cortante, o	$180 \text{ m/s} > \bar{v}_s$
	perfil que contiene un espesor total H mayor de 3 m de arcillas blandas	$IP > 20$ $w \geq 40\%$ $50 \text{ kPa} (\approx 0.50 \text{ kgf/cm}^2) > \bar{s}_u$
F	<p>Los perfiles de suelo tipo F requieren una evaluación realizada explícitamente en el sitio por un ingeniero geotecnista de acuerdo con el procedimiento de A.2.10. Se contemplan las siguientes subclases:</p> <p>F₁ — Suelos susceptibles a la falla o colapso causado por la excitación sísmica, tales como: suelos licuables, arcillas sensitivas, suelos dispersivos o débilmente cementados, etc.</p> <p>F₂ — Turba y arcillas orgánicas y muy orgánicas ($H > 3$ m para turba o arcillas orgánicas y muy orgánicas).</p> <p>F₃ — Arcillas de muy alta plasticidad ($H > 7.5$ m con Índice de Plasticidad $IP > 75$)</p> <p>F₄ — Perfiles de gran espesor de arcillas de rigidez mediana a blanda ($H > 36$ m)</p>	

Figura 44. Clasificación de los perfiles de suelo

Fuente: Norma NSR-10

Tabla 18 Contenido del subsuelo y clasificación de acuerdo a la NSR-10

Profundidad (m)	Descripción	Velocidad de Onda Vs (m/s)	Tipo de perfil
0-4m	Suelos muy densos o rocas blandas, se encuentran fragmentos de gravas, arenas, limos, contienen matriz de arcilla.	445-453	C
4-9m	Depósitos aluviales, con presencia de suelos densos, con contenido de cantos, guijarros y gravas con cantidades menores de arenas limos y arcillas.	453-567	C
9-16m	Suelos muy densos o roca media a dura, por la geología local, se trata de fragmentos de roca que puede contener pórfido dacítico- andesítico, diorita, esquistos, lutitas, shale y cherts.	656-715	C

16-19m	Suelos muy densos o roca media fracturada, por geología local se trata de fragmentos de roca sedimentaria, metamórfica e ígnea, de origen aluvial.	715-743	C
19-27m	Suelos muy densos o roca dura y fracturada. Intercalación de rocas muy duras y duras, por geología local, puede presentar rocas macizas ígneas, sedimentarias y metamórficas.	788-931	B
27-36m	Perfil de roca de rigidez media, roca dura y fracturada, con intercalaciones de rocas muy duras y duras, se puede encontrar roca ígnea.	1080-1182	B
36-46m	Perfil de roca de rigidez media, roca dura y fracturada, con intercalaciones de rocas muy duras y duras, se puede encontrar roca ígnea.	1151-1193	B
46-52m	Perfil de roca de rigidez media, roca dura y fracturada, con intercalaciones de rocas muy duras y duras, se puede encontrar roca ígnea.	1193-1337	B

A continuación, desde el punto de vista geológico y geomorfológico, se presentan las columnas estratigráficas obtenidas en las estaciones JAE-CT-43 (figura 45) y JAE-CT-45 (figura 46), las cuales se encuentran localizadas sobre el escarpe de terraza en la margen derecha del río Nima sector del centro poblado de Tenjo. La estación JAE-CT-45 corresponde al escarpe de la terraza aluvial entre la vía que de Tenjo conduce a la vereda La María (al oriente- aguas arriba) y la estación JAE-CT-43 se encuentra 200 m aguas arriba sobre la misa margen derecha.

Las columnas estratigráficas permiten identificar un depósito aluvial con un espesor variable entre 22m y 26 m, caracterizado por la presencia de una estructura clasto soportada; con una matriz principalmente de arena fina a media y unos clastos que varían desde gravas a bloques. Se logró identificar de acuerdo a las características de los horizontes de sedimentación, hasta por lo menos cuatro (4) eventos de depositación.

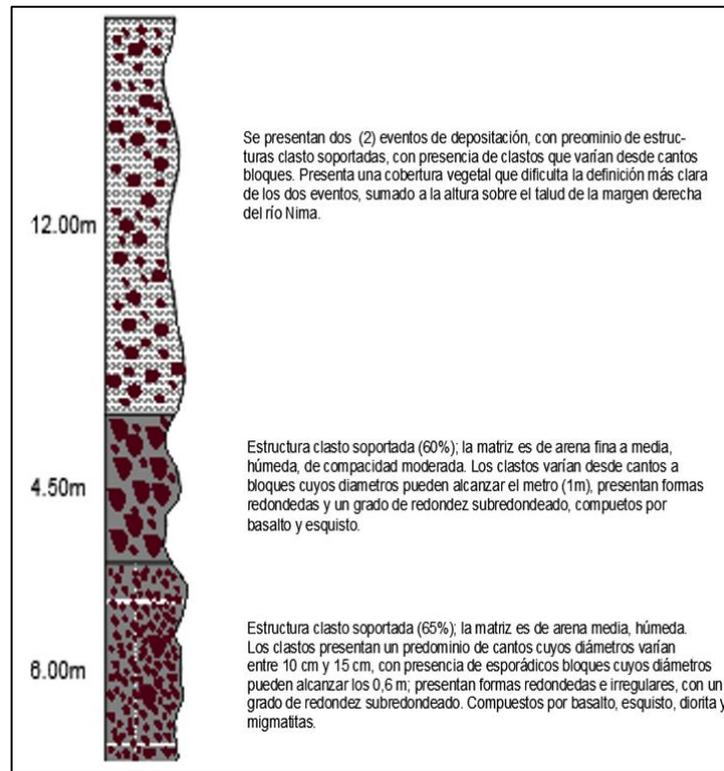


Figura 45. Estación JAE-CT-43

Fuente: Elaboración propia

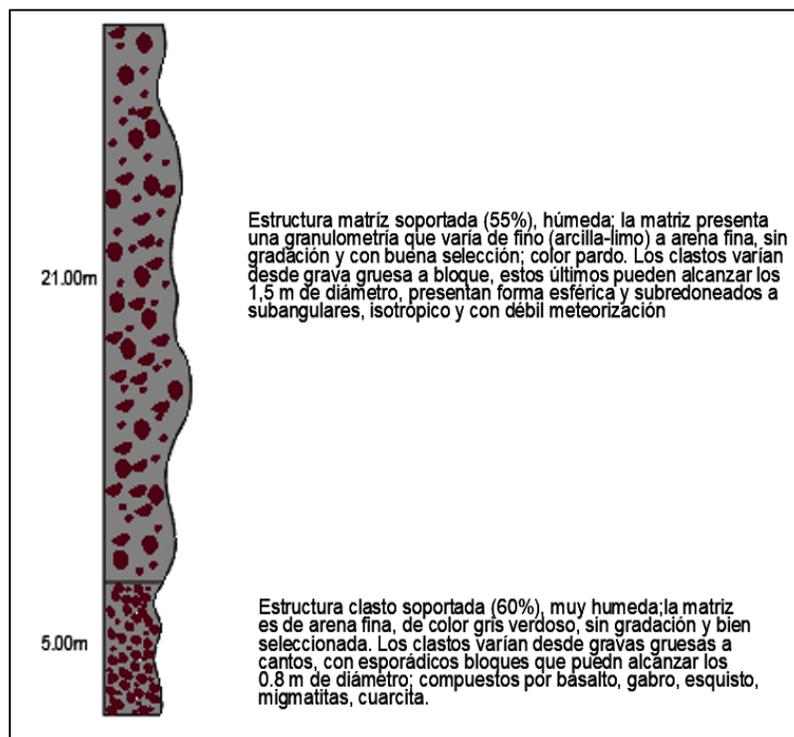


Figura 46. Estación JAE-CT-45

Fuente: Elaboración propia

En el documento técnico soporte (DTS) del componente de geología y geomorfología, se describe las UGS como suelos transportados de terraza de erosión antigua (Sttean) y por lo tanto su componente geomorfológica corresponde a la terraza de erosión antigua (Ftean).

Esta terraza de erosión antigua (Ftean) tiene su origen como consecuencia del proceso de incisión del río Nima sobre antiguos depósitos aluviales; que tuvieron su origen como consecuencia probablemente en los procesos de desglaciación y transporte de materiales meteorizados hasta los sitios que geográficamente hoy ocupan; pero que están siendo retrabajados por los procesos de meteorización y erosión que actualmente moldean el relieve.

6.5. Socavación lateral de cauce por hidráulica fluvial

De acuerdo con la metodología por socavación lateral inicia con la definición de los polígonos de erosión fluvial a lo largo del cauce y se definen secciones transversales para poder determinar la longitud de erosión y calcular la socavación lateral.

En la Figura 47 se presentan los puntos de interés, en los cuales se determinará la SL.

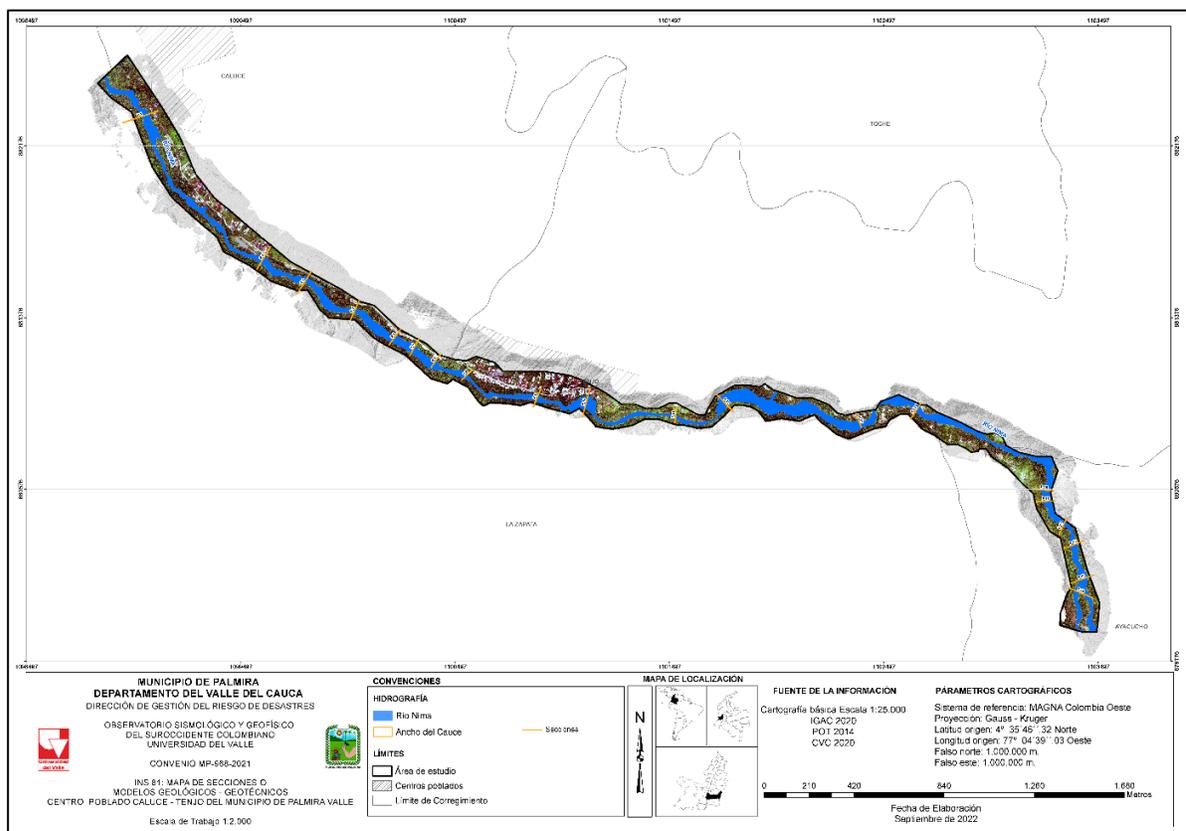


Figura 47. (INS-81) Secciones o modelos geológicos – geotécnicos
Fuente: Elaboración propia.

Los perfiles obtenidos en los análisis se muestran en la Figura 48 y la Figura 49.

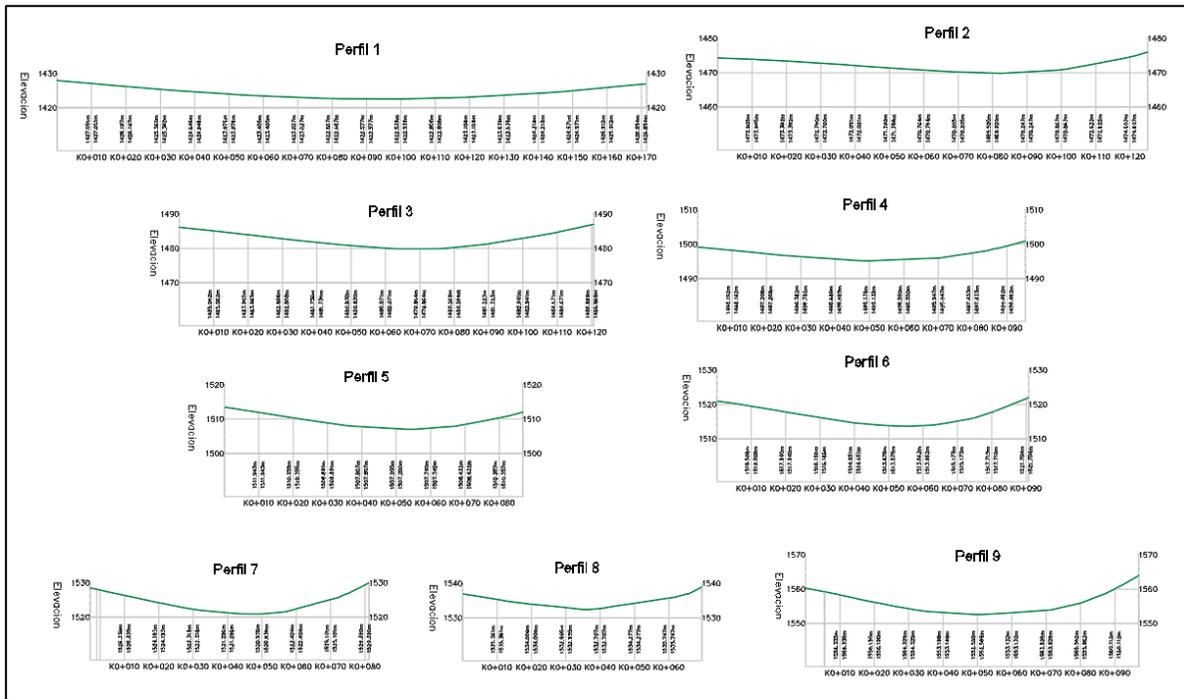


Figura 48. Perfiles transversales del río Nima (1) utilizados en la modelación

Fuente: Elaboración propia.

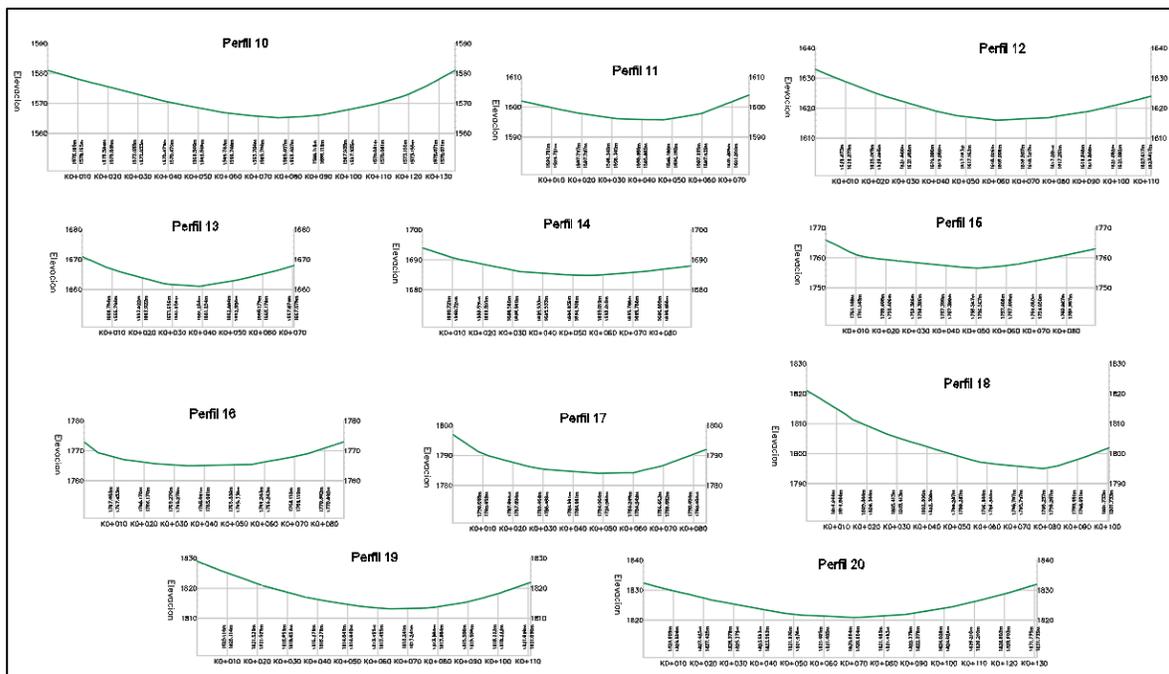


Figura 49. Perfiles transversales del río Nima (2) utilizados en la modelación

Fuente: Elaboración propia.

La altura del nivel del agua y las velocidades en las dos direcciones se obtuvieron del DTS avenida torrencial en el corredor Caluce Tenjo.

A continuación, se presentan las propiedades geotécnicas y los cálculos para un periodo de retorno de 1 en 100 años.

Tabla 19. Características geotécnicas de los materiales en el rio Nima

Periodo de retorno 100 años										
Punto	Coordenadas		SUC S	Propiedades Geotécnicas						
				w (%)	Y (kN/m ³)	Y _{sat} (kN/m ³)	C (kN/m ²)	F _i	D ₅₀ (m)	G _s
1	1099109.69	882337.37	SC	12.3	17.7	20.6	1	25	0.0007	2.521
2	1099636.36	881706.90	SC	12.4	17.2	20.8	10	27	0.0007	2.521
3	1099824.71	881589.66	SC	12.5	17.2	20.8	9	25	0.0007	2.521
4	1100047.24	881451.76	SC	12.6	17.2	20.0	5	25	0.0007	2.521
5	1100241.30	881320.26	SC	12.7	17.2	20.0	5	35	0.0007	2.521
6	1100328.34	881277.94	GM	16.6	17.0	19.8	5	35	0.0850	2.650
7	1100430.83	881209.79	GM	16.7	16.3	19.2	5	35	0.0850	2.650
8	1100578.27	881132.45	GM	16.8	16.3	19.2	5	35	0.0850	2.650
9	1100898.53	881048.48	GM	16.9	16.4	19.2	2	35	0.0850	2.650
10	1101124.97	881045.38	GM	17.0	16.5	19.2	9	35	0.0850	2.650
11	1101530.07	880959.98	SC	12.3	17.7	20.6	10	35	0.0007	2.521
12	1101715.69	881018.71	SC	12.4	17.2	20.8	5	29	0.0007	2.521
13	1102366.46	880929.23	SC	12.5	17.2	20.8	5	34	0.0007	2.521
14	1102670.48	880977.69	SC	12.6	17.2	20.0	5	34	0.0007	2.521
15	1103287.38	880567.56	SC	12.7	17.2	20.0	5	34	0.0007	2.521
16	1103294.31	880521.57	GM	16.6	17.0	19.8	5	34	0.0850	2.650
17	1103348.51	880441.44	GM	16.7	16.3	19.2	7	13	0.0850	2.650
18	1103429.45	880337.04	GM	16.8	16.3	19.2	7	13	0.0850	2.650
19	1103473.80	880176.02	GM	16.9	16.4	19.2	7	13	0.0850	2.650
20	1103472.42	880069.88	GM	17.0	16.5	19.2	7	16	0.0850	2.650

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 20. Esfuerzo critico de los materiales en la banca del cauce en el rio Nima

Punto	Ángulo de inclinación promedio de la banca del cauce	Esfuerzo crítico T_c (Pa)
1	5	0.24
2	4	0.26
3	7	0.23
4	6	0.23
5	9	0.35
6	10	44.93
7	12	43.93
8	9	45.35
9	11	44.45
10	16	41.34
11	13	0.33
12	23	0.17
13	24	0.24
14	18	0.29
15	25	0.23
16	15	40.25
17	12	5.93
18	11	8.23
19	10	9.88
20	14	9.25

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 21. 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_f	Velocidad crítica (m/s)	Velocidad promedio superior a la crítica (m/s)	Esfuerzo crítico T_b (Pa)
1	2.391		0.0180	0.12	0.22	0.56
2	3.260	0.04	0.0162	0.14	0.24	0.63
3	3.230		0.0163	0.13	0.23	0.56
4	4.056		0.0151	0.13	0.24	0.57
5	5.689		0.0135	0.17	0.31	0.84
6	3.260		0.0162	1.79	3.22	109.92
7	3.230		0.0163	1.80	3.25	112.11
8	4.056		0.0151	1.90	3.43	115.73
9	5.689		0.0135	1.99	3.58	112.74
10	3.380		0.0160	1.75	3.15	104.21
11	2.521		0.0177	0.15	0.27	0.84
12	1.357		0.0217	0.09	0.17	0.41
13	1.357		0.0217	0.11	0.20	0.59

Punto	ALTURA MAXIMA DE LAMINA DE AGUA (Hmax) [m] TR 100	n	C _f	Velocidad crítica (m/s)	Velocidad promedio superior a la crítica (m/s)	Esfuerzo crítico T _b (Pa)
14	3.201		0.0163	0.15	0.26	0.74
15	2.378		0.0180	0.12	0.22	0.58
16	1.877		0.0195	1.54	2.78	98.48
17	2.172		0.0186	0.62	1.12	15.14
18	1.805		0.0197	0.71	1.28	21.01
19	3.617		0.0157	0.87	1.56	25.06
20	2.381		0.0180	0.78	1.41	23.32

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 22. Tasa de erosión en las bancas del cauce del río Nima

Río Nima							
Punto	K _d	T _b - T _c (Pa)	ε (m/s)	Punto	K _d	T _b - T _c (Pa)	ε (m/s)
1	4.11E-07	3.19E-01	1.31E-07	11	3.46E-07	0.51	1.77E-07
2	3.91E-07	3.70E-01	1.45E-07	12	4.85E-07	0.24	1.17E-07
3	4.16E-07	3.28E-01	1.36E-07	13	4.08E-07	0.35	1.42E-07
4	4.13E-07	3.32E-01	1.37E-07	14	3.70E-07	0.45	1.68E-07
5	3.38E-07	4.95E-01	1.68E-07	15	4.18E-07	0.36	1.49E-07
6	2.98E-08	6.50E+01	1.94E-06	16	3.15E-08	58.23	1.84E-06
7	3.02E-08	6.82E+01	2.06E-06	17	8.21E-08	9.21	7.56E-07
8	2.97E-08	7.04E+01	2.09E-06	18	6.97E-08	12.77	8.90E-07
9	3.00E-08	6.83E+01	2.05E-06	19	6.36E-08	15.18	9.66E-07
10	3.11E-08	6.29E+01	1.96E-06	20	6.58E-08	14.07	9.25E-07

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 23. Longitud de erosión lateral del cauce del río Nima

Río Nima					
Punto	Δt (s)	LE (m)	Punto	Δt (s)	LE (m)
1	60715	0.0080	11	45158	0.008
2	57348	0.0083	12	35698	0.004
3	57816	0.0079	13	47952	0.007
4	59652	0.0082	14	12076	0.002
5	63072	0.0106	15	46970	0.007
6	70992	0.1377	16	57816	0.106
7	60192	0.1238	17	59652	0.045
8	67572	0.1412	18	39812	0.035
9	68940	0.1412	19	39784	0.038
10	72791	1.42E-01	20	38217	0.035

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 50 se presenta la socavación lateral por hidráulica fluvial en el corredor Calucé - Tenjo.

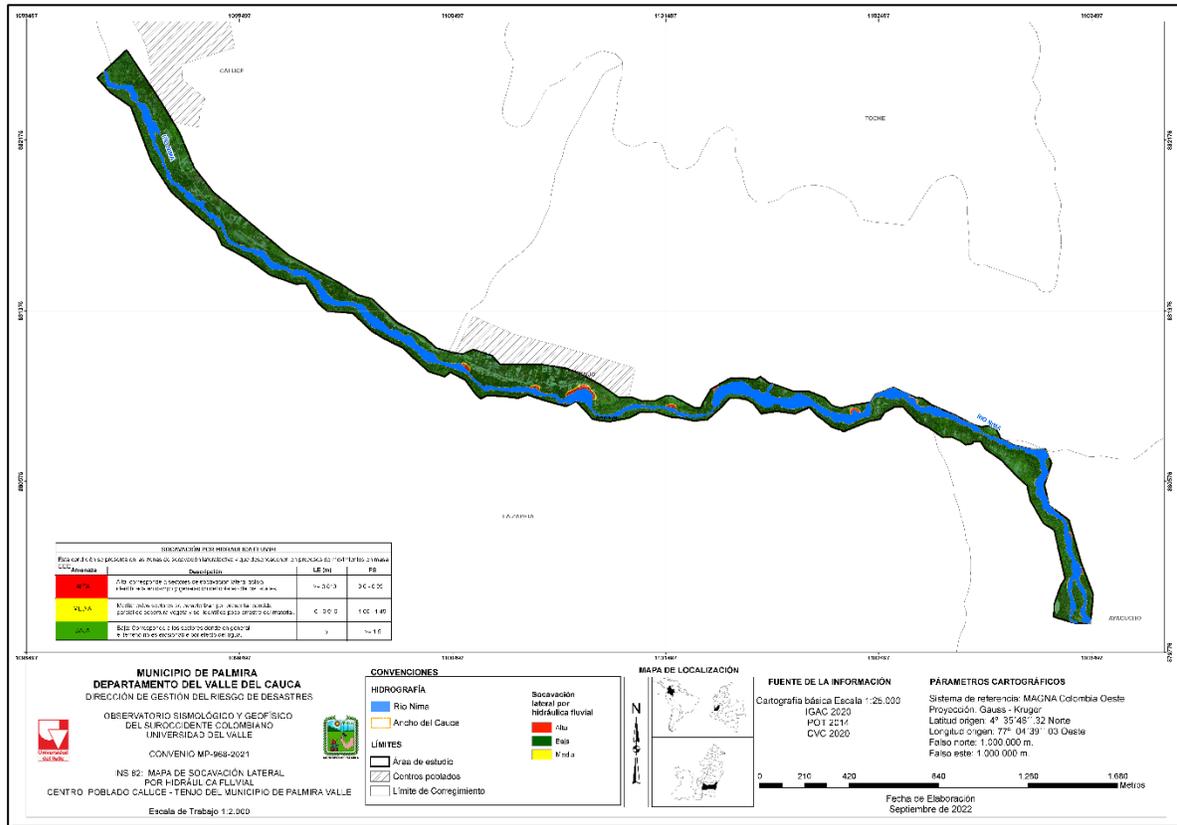


Figura 50. (INS-82) Socavación lateral por hidráulica fluvial
 Fuente: Elaboración propia

6.6. Falla de talud o geotécnica

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 la banca izquierda aguas arriba del cauce del río Nima usando la herramienta computacional SLIDE.

En la Figura 51 a la Figura 70 se muestran respectivamente los resultados del factor de seguridad por equilibrio límite obtenidos en las bancas del cauce del río Nima.

Perfiles modelación río Nima

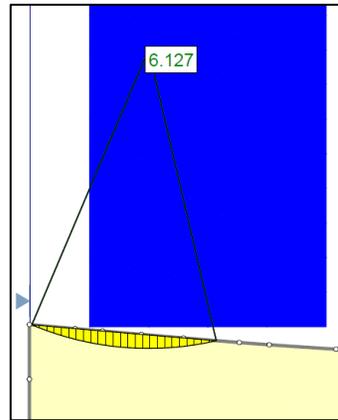


Figura 51. Perfil 1 de modelación para el río Nima. Factor de seguridad por equilibrio límite: banca izquierda
Fuente: Elaboración propia

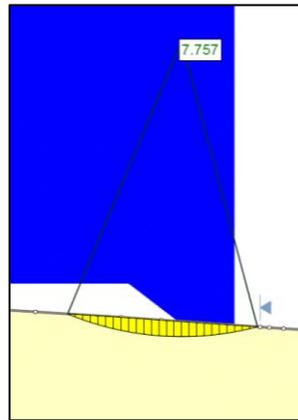


Figura 52. Perfil 2 de modelación para el río Nima. Factor de seguridad por equilibrio límite: banca izquierda
Fuente: Elaboración propia

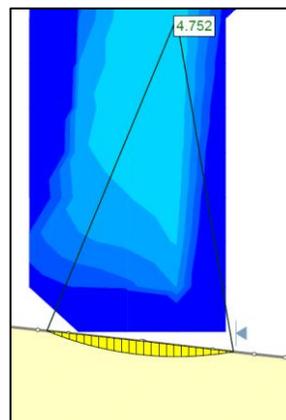


Figura 53. Perfil 3 de modelación para el río Nima. Factor de seguridad por equilibrio límite: banca izquierda
Fuente: Elaboración propia

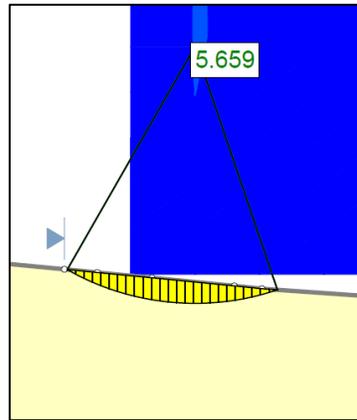


Figura 54. Perfil 4 de modelación para el río Nima. Factor de seguridad por equilibrio límite: banca izquierda
Fuente: Elaboración propia

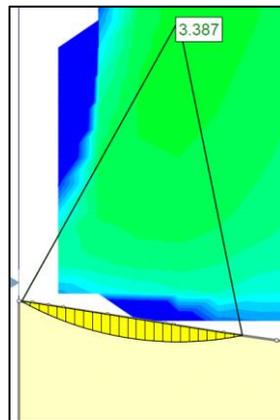


Figura 55. Perfil 5 de modelación para el río Nima. Factor de seguridad por equilibrio límite: banca izquierda
Fuente: Elaboración propia

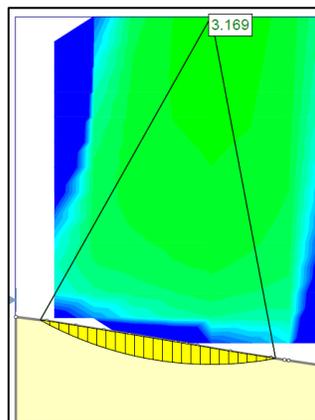


Figura 56. Perfil 6 de modelación para el río Nima. Factor de seguridad por equilibrio límite: banca izquierda
Fuente: Elaboración propia

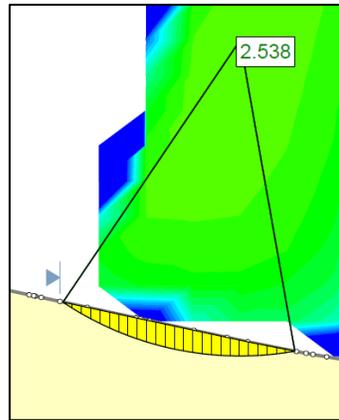


Figura 57. Perfil 7 de modelación para el río Nima. Factor de seguridad por equilibrio límite: banca izquierda
Fuente: Elaboración propia

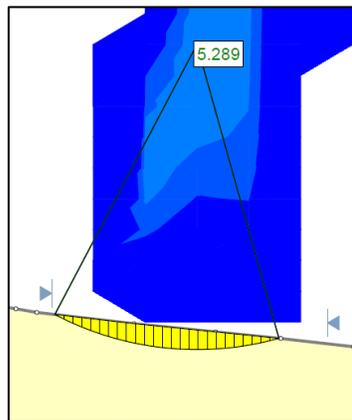


Figura 58. Perfil 8 de modelación para el río Nima. Factor de seguridad por equilibrio límite: banca izquierda
Fuente: Elaboración propia

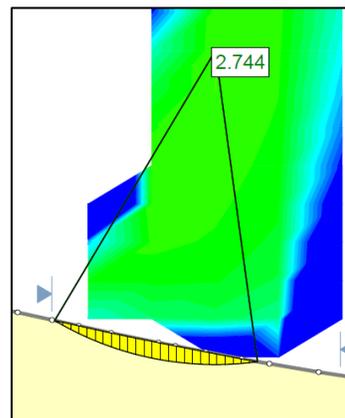


Figura 59. Perfil 9 de modelación para el río Nima. Factor de seguridad por equilibrio límite: banca izquierda
Fuente: Elaboración propia

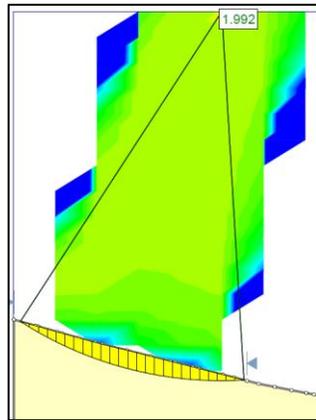


Figura 60. Perfil 10 de modelación para el río Nima. Factor de seguridad por equilibrio límite: banca izquierda
Fuente: Elaboración propia

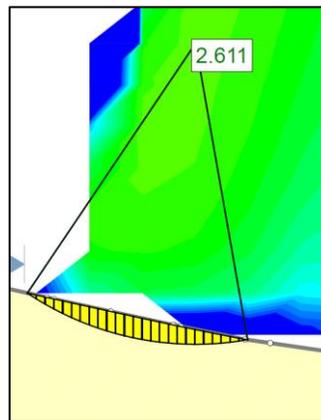


Figura 61. Perfil 11 de modelación para el río Nima. Factor de seguridad por equilibrio límite: banca izquierda
Fuente: Elaboración propia

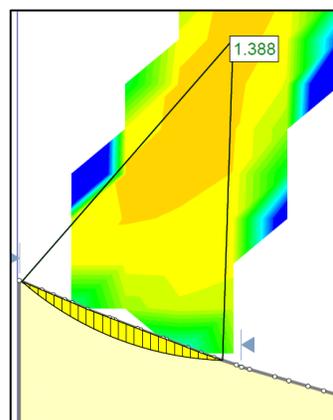


Figura 62. Perfil 12 de modelación para el río Nima. Factor de seguridad por equilibrio límite: banca izquierda
Fuente: Elaboración propia

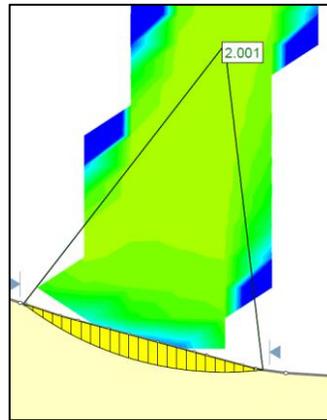


Figura 63. Perfil 13 de modelación para el río Nima. Factor de seguridad por equilibrio límite: banca izquierda
Fuente: Elaboración propia

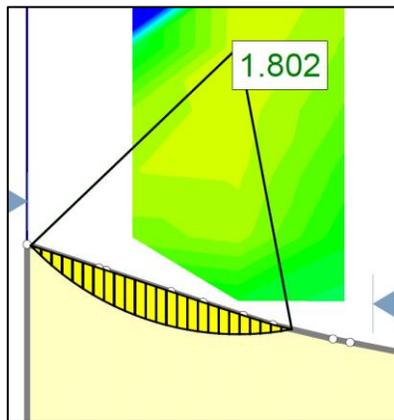


Figura 64. Perfil 14 de modelación para el río Nima. Factor de seguridad por equilibrio límite: banca izquierda
Fuente: Elaboración propia

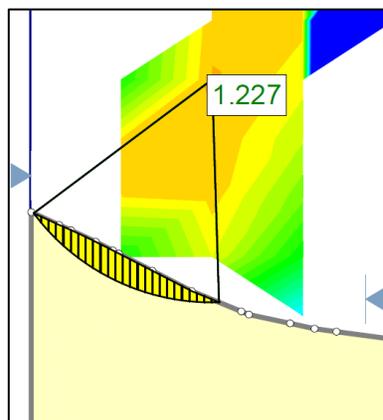


Figura 65. Perfil 15 de modelación para el río Nima. Factor de seguridad por equilibrio límite: banca izquierda
Fuente: Elaboración propia

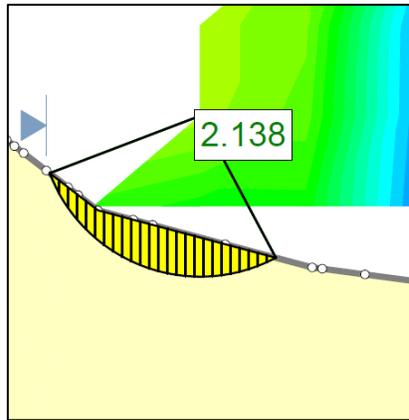


Figura 66. Perfil 16 de modelación para el río Nima. Factor de seguridad por equilibrio límite: banca izquierda
Fuente: Elaboración propia

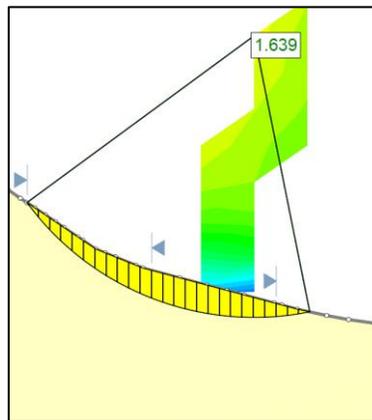


Figura 67. Perfil 17 de modelación para el río Nima. Factor de seguridad por equilibrio límite: banca izquierda
Fuente: Elaboración propia

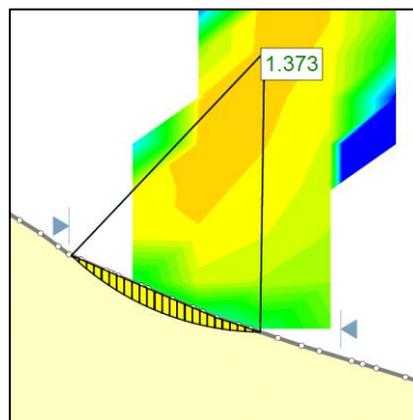


Figura 68. Perfil 18 de modelación para el río Nima. Factor de seguridad por equilibrio límite: banca izquierda
Fuente: Elaboración propia

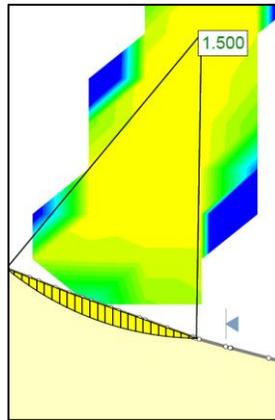


Figura 69. Perfil 19 de modelación para el río Nima. Factor de seguridad por equilibrio límite: banca izquierda
Fuente: Elaboración propia

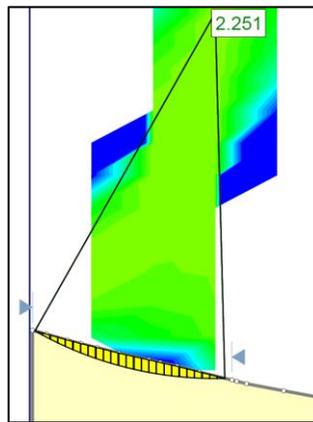


Figura 70. Perfil 20 de modelación para el río Nima. Factor de seguridad por equilibrio límite: banca izquierda
Fuente: Elaboración propia

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 la Tabla 24.

Tabla 24. FS por equilibrio límite y FS por cantiléver en el río Nima

Punto	FS Equilibrio Límite	Área de deslizamiento (m ² □ m)	FS Cantiléver
1	6,127 I-D	53.93	0.004
2	7,757 I-D	45.73	0.034
3	4,752 I-D	46.43	0.038
4	5,659 I-D	31.67	0.023
5	3,387 I-D	48.76	0.026
6	3,169 I-D	55.47	0.028
7	2,538 I-D	41.09	0.034
8	5,289 I-D	30.59	0.024
9	2,744 I-D	31.68	0.014

Punto	FS Equilibrio Límite	Área de deslizamiento (m ² □ m)	FS Cantiléver
10	1,992 I-D	74.63	0.070
11	2,611 I-D	32.24	0.062
12	1,388 I-D	43.62	0.053
13	2,001 I-D	37.12	0.039
14	1,802 I-D	23.09	0.047
15	1,227 I-D	19.68	0.065
16	2,138 I-D	20.29	0.062
17	1,639 I-D	48.00	0.081
18	1,373 I-D	30.34	0.081
19	1,500 I-D	39.20	0.076
20	2,251 I-D	41.16	0.051

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. A continuación, en la Figura 71 se presenta la falla de talud o geotécnica en el corredor Calucé - Tenjo.

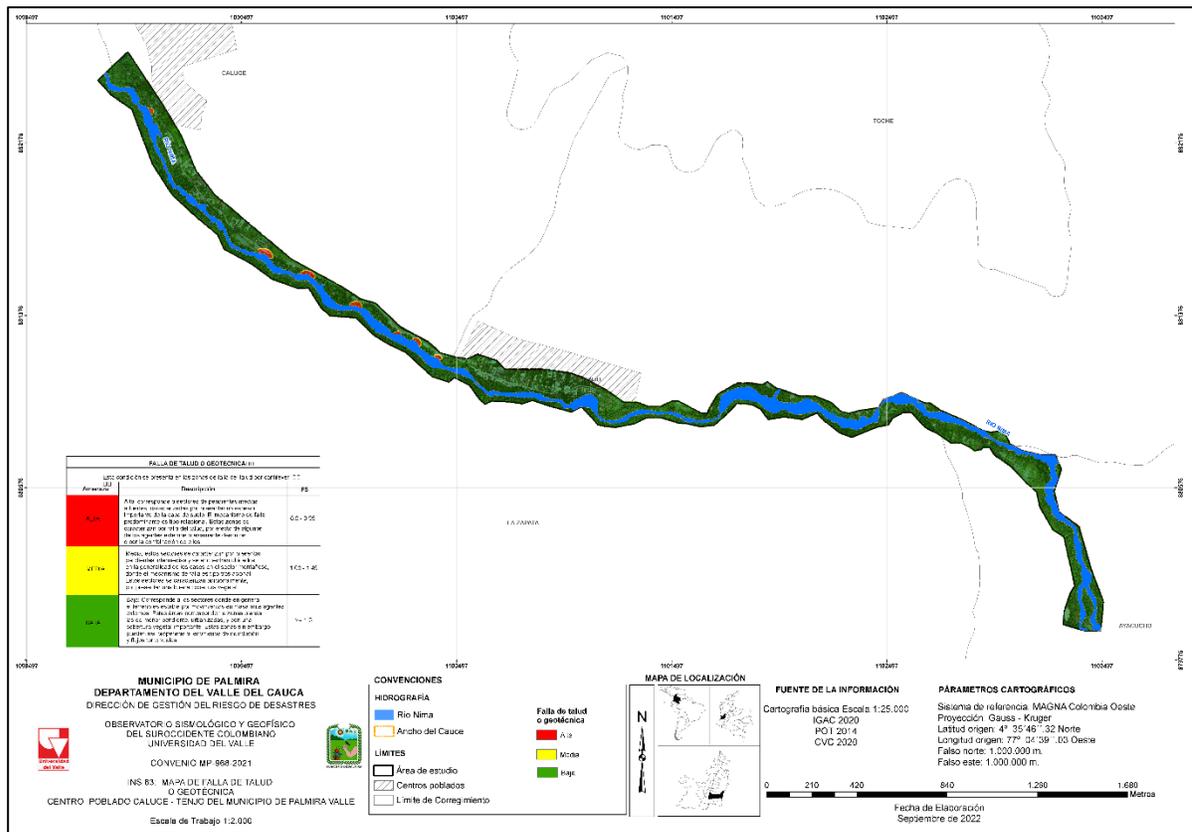


Figura 71. (INS-83) Falla de talud o geotécnica

Fuente: Elaboración propia

Para identificar las zonas de posible retroceso de la banca, en la Tabla 25 se presenta la distancia entre la corona de la banca hasta el punto de inicio de la falla de los perfiles en el río Nima.

Tabla 25. Distancia entre el inicio de la falla y la corona de la banca

Río Nima			
Punto	Distancia (m)	Punto	Distancia (m)
1	20.47	11	20.47
2	28.35	12	12.62
3	21.45	13	16.29
4	27.23	14	11.58
5	18.58	15	4.56
6	24.38	16	3.12
7	20.21	17	2.13
8	20.31	18	8.68
9	16.75	19	7.12
10	22.97	20	7.03

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 72.

Después de realizar los cruces de los píxeles de cada temática presentada en este informe, en la Figura 72 se presenta el mapa consolidado de amenaza por socavación lateral.

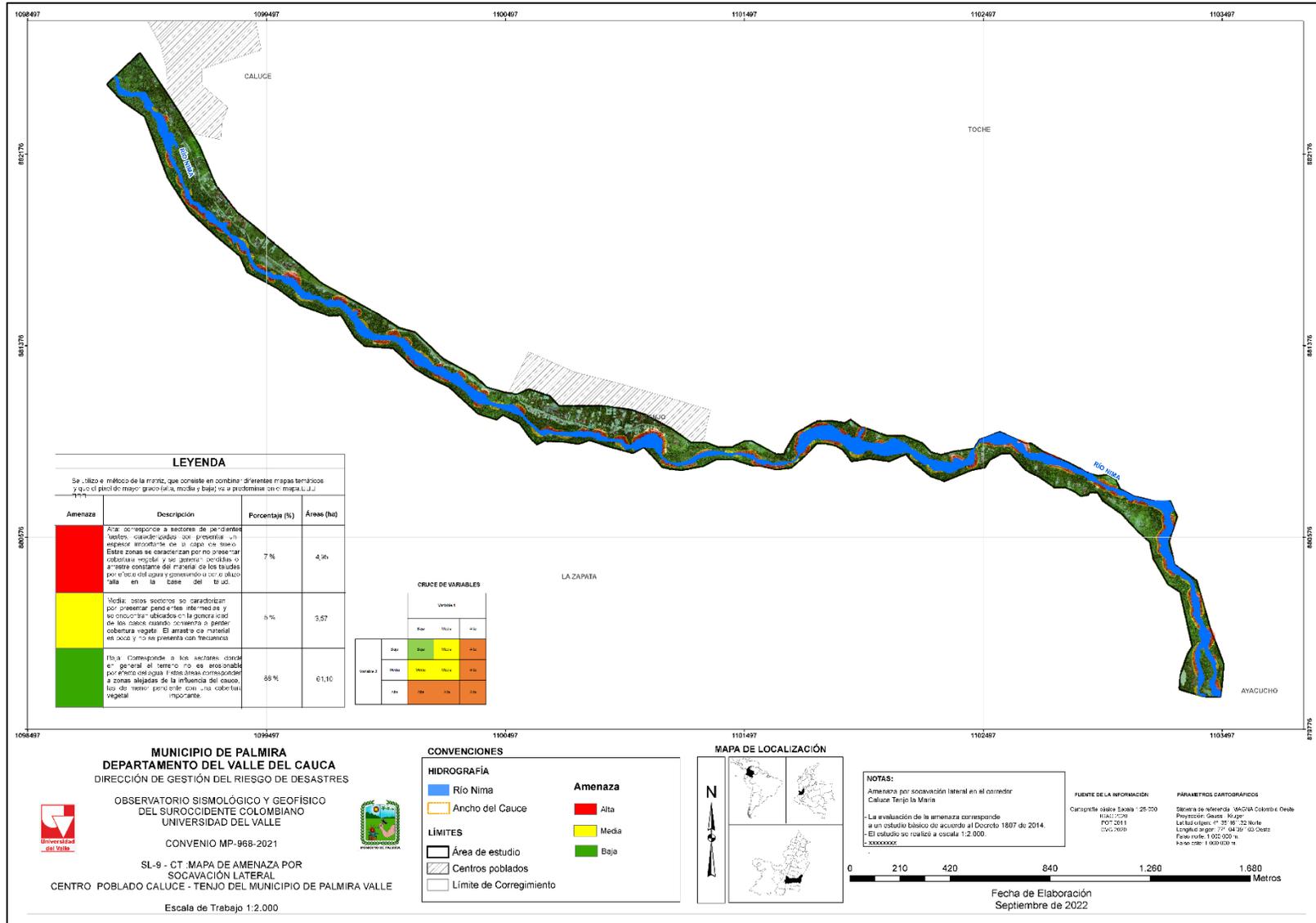


Figura 72. (SL-9-CT) Amenaza por socavación lateral
 Fuente: Elaboración propia

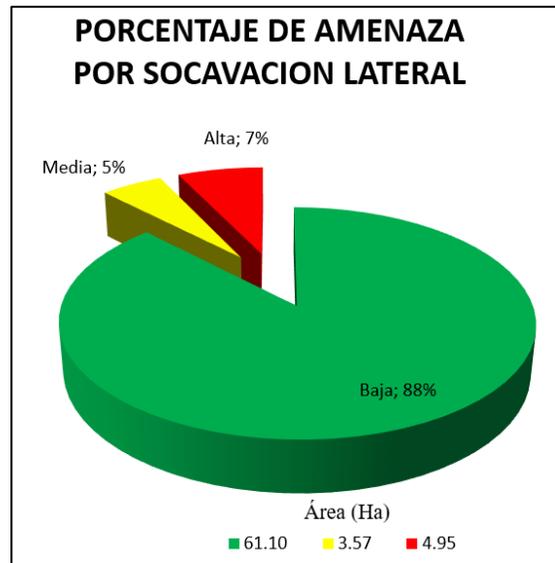


Figura 73. Porcentaje de amenaza por socavación lateral
Fuente: Elaboración propia.

- **Amenaza alta:**

Esta categoría ocupa el 7 % del área de estudio, cubriendo un área de 4.95 ha. En esta zona se pueden presentar pérdida de la banca y generar afectaciones a la población cercana.

- **Amenaza media:**

En esta categoría se presenta con un área 3.57 ha. En conclusión, esta categoría de amenaza comprende aproximadamente el 5 % 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 88 % con un área de 61.10 ha, localizadas en gran parte de la zona de estudio.

7. CONCLUSIONES

El área de estudio correspondiente al sector de Calucé - Tenjo del municipio de Palmira, posee un ambiente morfo-genético diverso, en donde las principales formaciones que coadyuvan a la generación de ambientes condicionantes ante la socavación lateral, se encuentran principalmente en la zona 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 (geomorfología) se realizó el inventario y descripción de doce (12) socavaciones activas respectivamente, distribuidos en toda la zona de estudio.

En los sondeos realizados para el presente estudio, no se encontraron niveles freáticos.

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 inconfiada 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 veinte (20) 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.

Es importante identificar que primero se da la socavación lateral (pérdida progresiva de la base del talud) y como consecuencia se produce la falla de talud o geotécnica.

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, ocupando el 7 % del área de estudio, cubriendo un área de 4.95 ha. En esta zona se pueden presentar pérdida de la banca y generar afectaciones a la población cercana.

En esta categoría (amenaza media) se presenta con un área 3.57 ha. En conclusión, esta categoría de amenaza comprende aproximadamente el 5 % 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 88 % con un área de 61.10 ha, localizadas en gran parte de la zona de estudio.

Se recomienda en la zona de Tenjo plantear obras de mitigación debido a que se presenta una socavación lateral activa que está generando pérdida de la banca y mostrando inestabilidad del talud.

Se recomienda en la zona de Tenjo (Socavación lateral activa) limitar el paso de vehículos por la vía, debido a que se le agrega peso a la corona del talud y ocasiona que se generen desprendimiento del material del talud.

Se recomienda implementar un sistema de alerta temprana (Inclinómetros, monitoreo GPS, etc), debido a que cuando el talud falle, posiblemente afectara a las viviendas que se encuentran al frente de esta socavación.

Se recomienda verificar periódicamente la aparición o no de grietas en la vía, lo cual nos indicaría que posiblemente se está moviendo el talud.

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.
- 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
- 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 Geografico 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
- 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 sísmológica. 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