ESTUDIO GEOTECNICO PARA CONSTRUCCIÓN DEL PUENTE VEHICULAR LA CANDELARIA, MUNICIPIO DE PIEDECUESTA

ELABORADO POR:

ORIGINAL FIRMADO

_____

EDWIN FERNANDO VALENCIA PINZÓN
Ingeniero Civil – MSC. GEOTECNIA
M.P 68.202-246901 STD

JULIO DE 2026

VERSIONES DEL DOCUMENTO

Versión	Descripción	Fecha

CONTENIDO

5. GEOLOGÍA LOCAL 10
5.1 UNIDADES GEOLÓGICAS SUPERFICIALES 10
5.1.1 Unidades de geología para ingeniería en la zona de estudio 12
5.2 UNIDADES GEOMORFOLÓGICAS 21
5.2.1 Morfología y morfometría 22
5.2.2 Unidades geomorfológicas en la zona de estudio 23
5.2.3 Morfodinámica 29
5.3 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL LOCAL 34
5.3.1 Generalidades 35
6. ANÁLISIS DE LA SOCAVACIÓN DEL ESTRIBO 37
6.1 Evaluación del macizo rocoso aflorante en la zona de estudio 37
6.1.1 Descripción geológica del macizo rocoso 37
6.1.2 Descripción del macizo rocoso 38
6.1.3 Clasificación del macizo rocoso 39
6.1.4 Evaluación global del macizo 41
6.1.5 Clasificación final del macizo rocoso 43
6.1.6 Conclusiones del análisis de socavación 44
7. MODELO GEOTÉCNICO 47
7.1 Recomendaciones para el diseño de la cimentación del puente 57
7.2 Cálculo de la capacidad de soporte según CCP-14 59
7.3 MANEJO DEL NIVEL FREÁTICO 61

1. INTRODUCCIÓN

El presente informe geotécnico tiene como finalidad caracterizar las condiciones geológicas, geomorfológicas y geotécnicas del área de influencia del **Proyecto Puente La Candelaria**, con el propósito de establecer los parámetros necesarios para el análisis, diseño y evaluación de la estabilidad del terreno y de las obras proyectadas. La información aquí consignada se fundamenta en el reconocimiento de campo, la interpretación de unidades geológicas superficiales, el análisis geomorfológico y la revisión detallada de los resultados de exploración geotécnica.

Durante el reconocimiento se identificaron **unidades de geología superficial (UGS), unidades geomorfológicas y procesos erosivos activos**, los cuales condicionan el comportamiento mecánico del terreno. Tal como se describe en el documento base, *"la información que se plasma en este informe se deriva de la experiencia del profesional, lo observado en campo, los resultados de la exploración geotécnica y la bibliografía disponible consultada"* .

El análisis geológico permitió diferenciar materiales residuales y transportados, asociados principalmente a las formaciones **Gneis de Bucaramanga**, **Formación Silgará**, depósitos aluviales recientes y terrazas fluviales. Estas unidades presentan variaciones significativas en textura, grado de meteorización, estructura heredada y comportamiento geotécnico. De acuerdo con el documento, las UGS *"incluyen suelos transportados, suelos residuales, depósitos antrópicos y formaciones rocosas con distintos grados de meteorización"* , lo cual evidencia la complejidad del medio geológico local.

Complementariamente, el estudio geomorfológico permitió identificar ocho (8) unidades principales de origen fluvial, estructural y antrópico, cuya distribución espacial condiciona la estabilidad del terreno. La morfometría del área revela pendientes que varían desde zonas planas en el fondo del valle hasta laderas abruptas superiores al 55°, donde se desarrollan procesos denudacionales intensos y susceptibilidad a movimientos en masa. El documento señala que las pendientes fuertes presentan *"procesos denudacionales intensos de diferentes tipos... alta propensión al desarrollo de procesos erosivos"* .

La integración de estos componentes —geología, geomorfología y morfometría— constituye la base para la evaluación del comportamiento del terreno frente a cargas estructurales, variaciones de humedad, socavación fluvial y procesos de remoción en masa. Este informe consolida dicha información con el fin de proporcionar criterios técnicos confiables para el diseño del puente y sus obras complementarias, garantizando la seguridad, funcionalidad y durabilidad de la infraestructura proyectada.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo General

Establecer las condiciones geológicas, geomorfológicas y geotécnicas del área de influencia del Proyecto Puente La Candelaria, mediante la identificación, clasificación y análisis de las Unidades Geológicas Superficiales (UGS), unidades geomorfológicas y características morfométricas del terreno, con el fin de suministrar los parámetros técnicos necesarios para el diseño y la evaluación de estabilidad de las obras proyectadas.

2.2 Objetivos Específicos

1. Caracterizar las Unidades Geológicas Superficiales (UGS) presentes en el área de estudio, considerando su origen, génesis y propiedades geotécnicas, conforme a lo descrito en el documento base, donde se establece que *"las UGS incluyen suelos transportados, suelos residuales, depósitos antrópicos y formaciones rocosas con distintos grados de meteorización"*.

2. Identificar y describir las unidades de geología para ingeniería, incluyendo suelos residuales (Srlagb, Srlafs) y suelos transportados (Stgadr, Stalta), evaluando su comportamiento mecánico, grado de meteorización y variabilidad lateral.

3. Analizar la geomorfología del área, clasificando las geoformas fluviales, estructurales y antrópicas, con base en la metodología del SGC, para comprender la dinámica del relieve y su influencia en la estabilidad del terreno.

4. Evaluar la morfometría del terreno, mediante el análisis de pendientes, identificando zonas críticas susceptibles a erosión, inestabilidad o movimientos en masa. El documento señala que las pendientes fuertes presentan *"procesos denudacionales intensos... alta propensión al desarrollo de procesos erosivos"*.

5. Integrar la información geológica, geomorfológica y morfométrica para establecer criterios de diseño geotécnico, incluyendo consideraciones sobre capacidad portante, compresibilidad, drenaje, susceptibilidad a socavación y estabilidad de taludes.

6. Delimitar zonas con condiciones geotécnicas homogéneas, optimizando la representatividad de los muestreos y ensayos, tal como se indica en el documento: *"La clasificación de las UGS permitió delimitar zonas con propiedades relativamente homogéneas, lo que optimizó la representatividad de los muestreos y ensayos"*.

7. Proveer lineamientos técnicos para la toma de decisiones en las etapas de diseño, construcción y operación del puente, considerando los riesgos geológicos y geomorfológicos identificados.

3. ALCANCE

El presente estudio comprende el análisis integral de las condiciones geológicas, geomorfológicas y geotécnicas del área de influencia del **Proyecto Puente La Candelaria**, con el fin de suministrar la información necesaria para el diseño y evaluación de las obras proyectadas. El alcance se estructura a partir de la caracterización de las Unidades Geológicas Superficiales (UGS), la identificación de unidades de geología para ingeniería, el análisis geomorfológico y la evaluación morfométrica del terreno.

El estudio incluye las siguientes actividades:

3.1 Revisión y análisis de información secundaria

- Consulta de bibliografía especializada y documentos técnicos relacionados con la geología regional y local.
- Revisión de metodologías del Servicio Geológico Colombiano (SGC) aplicadas a la clasificación de UGS, geomorfología y pendientes.
- Integración de antecedentes geotécnicos disponibles para el sector.

3.2 Reconocimiento geológico y geomorfológico del área

- Identificación de unidades litológicas, depósitos cuaternarios y suelos residuales.
- Delimitación de las UGS, siguiendo la definición del documento base, donde se establece que *"las UGS comprenden tanto depósitos no consolidados como unidades litológicas, y están directamente relacionadas con los procesos morfodinámicos que modelan la superficie terrestre"*.
- Identificación de geoformas fluviales, estructurales y antrópicas presentes en el área de estudio.

3.3 Clasificación y descripción de unidades de geología para ingeniería

- Caracterización de suelos residuales derivados del Gneis de Bucaramanga (Srlagb) y de la Formación Silgará (Srlafs).
- Caracterización de suelos transportados, incluyendo depósitos aluviales recientes y terrazas fluviales (Stgadr, Stalta).
- Evaluación de su origen, textura, grado de meteorización y comportamiento geotécnico.

3.4 Análisis geomorfológico

- Clasificación de unidades geomorfológicas según metodología SGC (2013).

- Evaluación de procesos activos: erosión, transporte, sedimentación y remoción en masa.
- Interpretación de la dinámica del relieve y su influencia en la estabilidad del terreno.

3.5 Análisis morfométrico

- Elaboración e interpretación del mapa de pendientes.
- Identificación de zonas críticas con inclinaciones superiores a 35°, donde el documento señala la presencia de *"procesos denudacionales intensos... y alta propensión al desarrollo de procesos erosivos"*.
- Evaluación de susceptibilidad a movimientos en masa y erosión.

3.6 Integración geotécnica para el diseño

- Delimitación de zonas con condiciones homogéneas para diseño y construcción.
- Identificación de restricciones geotécnicas asociadas a saturación, socavación, anisotropía de suelos residuales y variabilidad lateral de depósitos fluviales.
- Generación de criterios técnicos para cimentación, estabilidad de taludes y manejo de aguas.

3.7 Entregables

- Documento técnico con la caracterización geológica, geomorfológica y geotécnica del área.
- Mapas temáticos: UGS, unidades geomorfológicas, pendientes y zonas críticas.
- Conclusiones y recomendaciones para el diseño del puente y obras complementarias.

4. METODOLOGÍA DEL ESTUDIO

La metodología aplicada en el presente estudio integra actividades de gabinete, campo y análisis técnico, orientadas a caracterizar las condiciones geológicas, geomorfológicas y geotécnicas del área de influencia del **Proyecto Puente La Candelaria**. El proceso se desarrolló siguiendo lineamientos del Servicio Geológico Colombiano (SGC), criterios de geología para ingeniería y estándares de cartografía geomorfológica.

4.1 Revisión de información secundaria

Se recopiló y analizó información geológica, geomorfológica y geotécnica existente, incluyendo:

- Cartografía oficial del SGC.
- Bibliografía especializada sobre UGS, procesos morfodinámicos y suelos residuales.
- Antecedentes técnicos del área de estudio.

El documento base señala que *"la información que se plasma en este informe se deriva de la experiencia del profesional, lo observado en campo, los resultados de la exploración geotécnica y la bibliografía disponible consultada"*, lo cual fundamenta esta etapa.

4.2 Reconocimiento geológico y geomorfológico de campo

Se realizó un levantamiento detallado del terreno para identificar:

- Unidades litológicas y depósitos cuaternarios.
- Suelos residuales derivados del Gneis de Bucaramanga (Srlagb) y de la Formación Silgará (Srlafs).
- Depósitos transportados asociados a terrazas, planicies de inundación y cauces activos.
- Geoformas fluviales, estructurales y antrópicas.
- Evidencias de erosión, inestabilidad y dinámica fluvial.

Esta etapa permitió verificar in situ las características descritas en el documento, como la presencia de *"suelos transportados, suelos residuales... y formaciones rocosas con distintos grados de meteorización"*.

4.3 Clasificación de Unidades Geológicas Superficiales (UGS)

Se aplicó la metodología del SGC (2017) para clasificar las UGS según su origen, génesis y grado de meteorización. El proceso incluyó:

- Delimitación de suelos residuales (Srlagb, Srlafs).
- Identificación de suelos transportados (Stgadr, Stalta).
- Evaluación de textura, coloración, estructura heredada y grado de alteración.
- Análisis preliminar del comportamiento geotécnico.

El documento destaca que *"la clasificación de las UGS permitió delimitar zonas con propiedades relativamente homogéneas, lo que optimizó la representatividad de los muestreos y ensayos"*.

4.4 Análisis geomorfológico

Se emplearon metodologías del SGC (2013) y del ITC de Holanda para identificar y cartografiar las geoformas presentes en el área. Las actividades incluyeron:

- Interpretación de imágenes satelitales y modelos digitales de elevación.
- Identificación de geoformas fluviales (F1, F3, F6), estructurales (E1, E2, E7) y antrópicas (A7, A9).
- Evaluación de procesos activos: erosión, socavación, reptación, deslizamientos y acumulación fluvial.

4.5 Análisis morfométrico

Se elaboró el mapa de pendientes siguiendo la clasificación del SGC (2017), lo que permitió identificar zonas críticas con inclinaciones superiores a 35°, donde el documento describe *"procesos denudacionales intensos... y alta propensión al desarrollo de procesos erosivos"*.

Este análisis permitió:

- Determinar la distribución espacial de pendientes.
- Identificar áreas susceptibles a movimientos en masa.
- Evaluar la relación entre morfología y estabilidad del terreno.

4.6 Integración geológica, geomorfológica y geotécnica

Los resultados de todas las etapas fueron integrados para:

- Definir unidades geotécnicas representativas.
- Establecer criterios de diseño para cimentación, estabilidad de taludes y manejo de aguas.

- Identificar restricciones geotécnicas asociadas a saturación, anisotropía, socavación y variabilidad lateral de depósitos fluviales.
- Proveer lineamientos técnicos para el diseño del puente y sus obras complementarias.

5. GEOLOGÍA LOCAL

Durante el reconocimiento de campo se pudieron establecer unidades de geología superficial (UGS), unidades geomorfológicas y los correspondientes procesos erosivos que se presentan en el área de estudio. La información que se plasma en este informe se deriva de la experiencia del profesional, lo observado en campo, los resultados de la exploración geotécnica y la bibliografía disponible consultada.

5.1 UNIDADES GEOLÓGICAS SUPERFICIALES

De acuerdo con Hermelín (1985) y Salazar (1995), las Unidades Geológicas Superficiales (UGS) se definen como el conjunto de materiales que conforman la franja más externa de la corteza terrestre, alcanzando profundidades de varias decenas de metros. Estas unidades incluyen suelos transportados, suelos residuales, depósitos antrópicos y formaciones rocosas con distintos grados de meteorización. La correcta clasificación de estos materiales, en función de su origen y génesis, constituye un requisito esencial para la caracterización geotécnica de un sitio.

Unidades Geológicas Superficiales (UGS) según su origen.

TIPO DE MATERIAL	ORIGEN DE LA UGS		TIPO DE UGS
Roca	Roca inalterada		• Roca dura (Calidad de macizo buena y muy buena) • Roca intermedia (Calidad de macizo regular) • Roca blanda (Calidad de macizo mala y muy mala)
Suelo	Derivadas de roca In situ		• Suelo residual: Horizontes IV (saprolito grueso), V (saprolito fino) y VI.
	Suelo transportado	Depósitos volcaniclásticos primarios	• Flujos piroclásticos (Ignimbrita), oleada piroclástica, caídas piroclásticas (bombas, bloques y ceniza).
		Depósitos volcaniclásticos secundarios	• Lahar, avalancha de escombros
		Depósitos aluviales	• Aluviones recientes y de cauce activo • Llanura aluvial • Abanicos o conos aluviales • Terrazas aluviales • Depósitos fluviotorrenciales
		Depósitos lacustres y paludales	• Suelos fluviolacustre • Suelos paludales
		Depósitos costeros	• Deltas, Barras, Playas, etc.
		Depósitos eólicos	• Dunas y Médanos • Loess
		Depósitos glaciares	• Morrenas y Tillitas • Suelos Fluvioglaciares
		Depósitos de gravedad y ladera	• Coluvial • Talus, derrubios de pendiente • Flujos (de lodo, tierra y de escombros)
		Depósitos antrópicos	• Llenos de basuras • Llenos de escombros • Llenos mixtos

Fuente: Tomado de la Guía metodológica para la zonificación de amenaza por movimientos en masa, escala 1:25.000, SGC (2017).

La clasificación de las UGS permitió delimitar zonas con propiedades relativamente homogéneas, lo que optimizó la representatividad de los muestreos y ensayos, y favoreció el desarrollo de análisis geotécnico. Esta información es fundamental para la toma de decisiones técnicas en todas las etapas de un proyecto de ingeniería.

Las UGS comprenden tanto depósitos no consolidados como unidades litológicas, y están directamente relacionadas con los procesos morfodinámicos que modelan de forma continua la superficie terrestre, bajo la acción combinada de agentes exógenos (erosión, sedimentación, meteorización) y endógenos (tectónica, sismicidad). Como se puede observar en la figura anterior.

En el contexto de la geología aplicada a la ingeniería, las UGS constituyen unidades cartografiables que sirven como insumo básico para la compilación, interpretación y representación de información geotemática. Su utilización resulta crítica en todas las fases de un proyecto: estudios de prefactibilidad, factibilidad, diseño, construcción, operación y mantenimiento de las obras civiles o de infraestructura.

Así mismo, su análisis es indispensable para la planificación y ordenamiento del territorio, la gestión del uso del suelo, el diseño de estrategias de mitigación y control de riesgos geológicos, y la evaluación de impactos ambientales. En este sentido, las UGS representan una herramienta de soporte técnico de gran valor para el desarrollo urbano, la planificación de infraestructura y la actividad minera de manera sostenible.

5.1.1 UNIDADES DE GEOLOGÍA PARA INGENIERÍA EN LA ZONA DE ESTUDIO

En el área de estudio, se identificaron cuatro (4) unidades de geología para ingeniería con afloramientos predominantes de 2 de tipo suelo transportado (t) y 2 de suelo residual.

Específicamente, las unidades observadas son:

- Suelo residual limo arcilloso de la Formación Silgará (Srlafs)
- Suelo residual limo arcilloso del Gneis de Bucaramanga (Srlagb)
- Suelo transportado areno gravoso de aluvial reciente (Stgadr)
- Suelo transportado areno limoso de terraza aluvial (Stalta)

Estas unidades se resumen en la tabla adjunta, se observan espacialmente en la siguiente figura y se detallan en las siguientes secciones.

Tabla 1. Clasificación de las unidades de geología para ingeniería en la zona de estudio.

ORIGEN	TIPO	UNIDAD	NOMENCLATURA
Suelo	Residual	Suelo residual limo arcilloso del Gneis de Bucaramanga	Srlagb
		Suelo residual limo arcilloso de la Formación Silgará	Srlafs
	Transportado	Suelo transportado areno gravoso de aluvial reciente	Stgadr
		Suelo transportado areno limoso de terraza aluvial	Stalta

Fuente: AUTOR

5.1.1.1 Unidad de suelos (s)

En el campo de la cartografía geológica para ingeniería, los suelos se definen como materiales granulares cementados o no cementados (arena, limo, grava y bloques) y arcillas plásticas cohesivas y la combinación de estos dos tipos.

Para este estudio, los suelos han sido clasificados según su origen:

- **Suelos Residuales:** Son aquellos formados in situ, por la meteorización física y química de la roca madre subyacente.
- **Suelos Transportados:** Corresponden a depósitos de material que ha sido movilizado y acumulado por agentes externos como el viento, el agua, el hielo, erupciones volcánicas o la gravedad.

5.1.1.1.1 Unidad de suelo residual (Sr)

Son materiales terrosos que se forman directamente en el lugar (in situ) por la meteorización física y química de la roca madre subyacente. A diferencia de los suelos transportados, que han sido movidos por agentes como el agua o el viento, los suelos residuales permanecen en la misma posición de la roca de la que se originaron.

Sus características son fuertemente influenciadas por el tipo de roca original, el clima, la topografía y el tiempo de exposición a los procesos de meteorización. Esto los hace a menudo muy heterogéneos, con variaciones significativas en profundidad, y pueden conservar algunas de las estructuras heredadas de la roca madre, como planos de debilidad o fábricas. Son comunes en zonas tropicales y subtropicales con alta precipitación, donde los procesos de meteorización química son más intensos, generando perfiles de suelo

profundos que pueden variar desde arcillas muy plásticas hasta arenas con restos de minerales de la roca original.

Tabla 2. Unidades de suelo residual (Sr)

UNIDADES GEOLOGICAS SUPERFICIALES			
UNIDAD	**CLASE DE UNIDAD**	**FORMACIÓN**	**NOMENCLATURA**
Unidad de Suelo	Unidades de Suelo Residual	Gneis de Bucaramanga	Srlagb
		Formación Silgará	Srlafs

Fuente: AUTOR

5.1.1.1.1.1 Suelo residual limo arcilloso del Gneis de Bucaramanga (Srlagb)

El suelo residual derivado del Gneis de Bucaramanga es el resultado de una intensa meteorización físico-química en un ambiente tropical, lo que produce un perfil de alteración profundo, característico del Macizo de Santander. Su color es predominantemente pardo claro a anaranjado, una evidencia directa de la concentración de óxidos e hidróxidos de hierro (hematita y goetita) debido a la lixiviación de sílice y cationes por la alta pluviosidad y temperatura. Respecto a su textura, el material final suele ser limoso o arcilloso-limoso, lo cual se explica por la composición mineralógica del gneis; el cuarzo persiste como arena y limo, mientras que los feldespatos y micas sufren hidrólisis y se transforman en minerales de arcilla, mayormente caolinita, que domina la fracción fina.

Finalmente, el perfil de meteorización es marcadamente zonificado y profundo, desde la roca fresca (Intervalo I) hasta el Suelo Residual (Intervalo VI), pasando por la Saprolito o roca completamente meteorizada (Intervalo V), donde la estructura original del gneis es aún visible (estructura fantasma); este espesor se debe al fracturamiento de la roca madre, que facilita la penetración del agua, acelerando la alteración química de los silicatos y conformando un material de baja resistencia y alta compresibilidad que representa un desafío geotécnico en la región.

Tabla 3. Perfil de meteorización típico de un suelo residual derivado del Gneis de Bucaramanga

Intervalo	Descripción	Implicaciones Geotécnicas
I. Roca Fresca	Basamento inalterado (Gneis de Bucaramanga). Mantiene la estructura y mineralogía original	Máxima resistencia, baja porosidad y permeabilidad (matriz rocosa).
II. Roca Ligeramente Meteorizada	Comienzo de la alteración de minerales primarios, desarrollo de microfracturas	Alto potencial hidrogeológico, las microfracturas facilitan el flujo de agua.

Intervalo	Descripción	Implicaciones Geotécnicas
	paralelas y decoloración. La resistencia es ligeramente menor a la roca fresca.	
III. Roca Moderadamente Meteorizada	Mayor oxidación (cambio de color), los feldespatos inician la transformación a arcilla. Aún conserva gran parte de la estructura masiva original.	Disminución de la resistencia, aumento de la porosidad y permeabilidad.
IV. Roca Altamente Meteorizada	Se reconoce la roca madre, pero más del 50% de la masa rocosa está alterada. Presencia clara de caolinita. La roca se puede desmoronar al golpe.	Pérdida significativa de cohesión; gran aumento de la porosidad.
V. Roca Completamente Meteorizada (Saprolito)	La roca se ha transformado en un suelo, pero la estructura original del gneis (vetas, bandeamiento, foliación) aún es visible (*estructura fantasma*). Dominio de caolinita.	Baja resistencia, alta compresibilidad y plasticidad variable. Alto riesgo de deslizamiento si se satura.
VI. Suelo Residual	Pérdida total de la estructura de la roca madre. Material homogéneo de color pardo rojizo a amarillento. Constituido por la mezcla final de arcillas, limos y arenas residuales.	La máxima alteración. Comportamiento puramente de suelo, con baja permeabilidad y alta compresibilidad en ambientes saturados.

Fuente: AUTOR

Figura 1. Suelo residual limo arcilloso del Gneis de Bucaramanga (Srlagb)



Fuente: AUTOR

5.1.1.1.1.2 Suelo residual limo arcilloso de la Formación Silgará (Srlafs)

Se conforma por la meteorización de un material de origen metamórfico que exhibe características muy particulares en comparación con otros suelos del Macizo de Santander. Su coloración es distintiva, presentando un tono gris oscuro a negruzco en los niveles más profundos (saprolito) debido a la herencia del grafito de la roca madre, el cual se transforma en un pardo amarillento o rojizo hacia la superficie por la oxidación del hierro bajo el clima tropical. Esta transformación superficial indica un cambio en el proceso dominante de preservación a oxidación y lixiviación.

En cuanto a la textura, este suelo es marcadamente limoso o arcilloso de alta plasticidad, una consecuencia directa de la composición mineralógica de la roca; los minerales laminares como la sericita y la clorita se alteran químicamente para formar arcillas finas (caolinita e illita), que dominan la matriz del suelo, mientras que el cuarzo persiste en menor medida. La composición final del suelo residual, por lo tanto, incluye estas arcillas, cuarzo fino, óxidos de hierro, y crucialmente, restos de grafito y micas no alteradas. Estos componentes, especialmente el grafito, reducen la fricción interna y confieren una marcada anisotropía al comportamiento mecánico del suelo.

Esta anisotropía se hace evidente en el perfil de meteorización, el cual, aunque puede ser menos profundo que el del gneis, se caracteriza por la preservación de la foliación original de los esquistos hasta niveles avanzados de alteración (Intervalo V o Saprolito). En esta capa, la estructura fantasma (la laminación) es claramente visible, lo que significa que la entrada de agua se da preferencialmente a lo largo de estos planos heredados. Este mecanismo de meteorización diferencial resulta en un suelo con propiedades mecánicas mucho más débiles en la dirección paralela a la foliación, haciendo que los suelos de la Formación Silgará sean altamente propensos a fallas y deslizamientos que siguen estos planos estructurales.

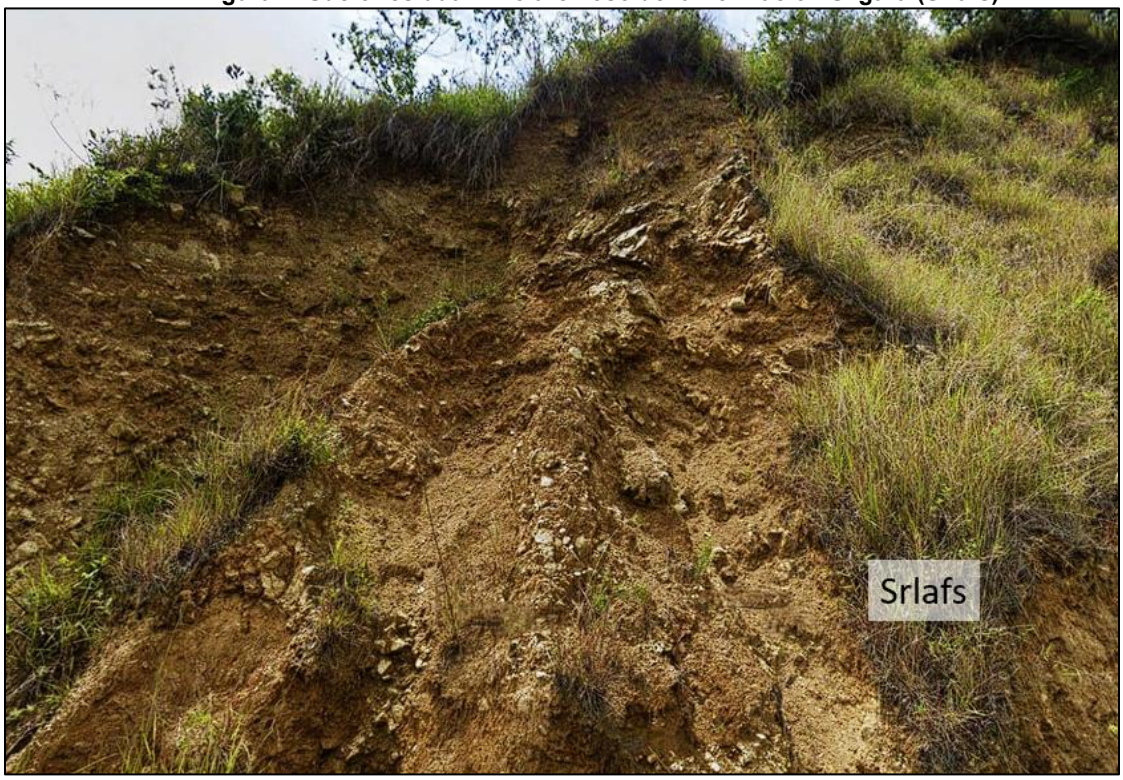
Tabla 4. Perfil de meteorización típico de un suelo residual derivado del Formación Silgará

Intervalo	Descripción Argumentativa	Implicaciones Geotécnicas
I. Roca Fresca	Esquisto con fuerte foliación, alta dureza y color gris oscuro a negro (grafitoso).	Resistencia máxima, la estabilidad depende de la orientación de las discontinuidades laminares.
V. Roca Completamente Meteorizada (Saprolito)	Capa de suelo donde la foliación original de la roca (las láminas) es perfectamente visible (*estructura fantasma*). El material es blando y fácil de cortar. El color es gris oscuro.	Se comporta como un suelo anisotrópico (propiedades que varían según la dirección). La resistencia al corte es mucho menor en el plano de la foliación.
VI. Suelo Residual	Pérdida de la estructura fantasma en la parte superior. Material fino, pardo	Es un suelo cohesivo (Arcilla/Limo), muy sensible a la humedad y con

	amarillento o rojizo, homogéneo en masa, pero con tendencia a la fisuración.	riesgo de expansión por la posible presencia de illitas.

Fuente: AUTOR

Figura 2. Suelo residual limo arcilloso de la Formación Silgará (Srlafs)



Fuente: AUTOR

5.1.1.1.2 Unidad de suelos transportados

Estas unidades de suelo se caracterizan por sufrir un transporte después de su formación. Estos suelos pueden ser transportados por agentes climáticos como vientos y corrientes de agua o por gravedad, produciendo flujos de detritos o masas incoherentes que serán depositados pendiente abajo del lugar donde se genere el flujo.

Tabla 5. Unidades de suelo transportados (St)

UNIDADES GEOLOGICAS SUPERFICIALES			
UNIDAD	**CLASE DE UNIDAD**	**FORMACIÓN**	**NOMENCLATURA**
Unidad de Suelo	Suelo transportado limo arenoso de planicie de inundación	Depósitos cuaternarios	Stlapi
	Suelo transportado areno gravoso de terraza y cono de deyección		Stagtc
	Suelo transportado gravo arenoso de depósitos recientes		Stgadr

Fuente: AUTOR

5.1.1.1.2.1 Suelo transportado limo arenoso de planicie de inundación (Stlapi)

Este suelo se desarrolla sobre la planicie de inundación asociada al cauce actual del Río de Oro, en zonas caracterizadas por pendientes muy suaves y frecuentes eventos de anegamiento. Su génesis está vinculada a procesos de sedimentación fluvial de baja energía, donde las aguas de crecida depositan limos y arenas finas al perder velocidad sobre la planicie. Litológicamente está constituido por materiales limo-arenosos de textura suelta a medianamente compacta, con ocasionales intercalaciones delgadas de arenas medias o limos más plásticos, en algunos casos con restos orgánicos finos. Presenta colores grisáceos a amarillentos, que tienden a oscurecerse con el contenido de humedad o materia orgánica superficial. El espesor aparente de estos depósitos varía entre 1 y 5 m, sobre una base de sedimentos más antiguos o arcillas compactas. Debido a su origen y granulometría fina, este suelo presenta alta capacidad de retención de agua y moderada plasticidad, condiciones que lo hacen susceptible a asentamientos diferenciales, pérdida de capacidad portante y saturación temporal durante periodos de lluvia intensa. Morfológicamente constituye la unidad más reciente y activa de la llanura aluvial, representando ambientes de acumulación periódica dominados por procesos fluviales actuales.

Figura 3. Suelo transportado limo arenoso de planicie de inundación (Stlapi)



Fuente: AUTOR

5.1.1.1.2.2 Suelo transportado areno gravoso de terraza y cono de deyección (Stagtc)

Este tipo de suelo se asocia a las terrazas aluviales bajas y a los conos de deyección que bordean la planicie del Río de Oro, en zonas donde la pendiente aumenta ligeramente y la energía del flujo fluvial favorece la sedimentación de materiales más gruesos. Su génesis responde a procesos de transporte y deposición de moderada a alta energía, en los que las corrientes fluviales o torrenciales pierden gradualmente capacidad de carga, acumulando arenas medias a gruesas y gravas mal seleccionadas. Litológicamente, el material está compuesto por gravas subredondeadas a redondeadas, arenas cuarzosas y fragmentos líticos de diferente tamaño, con matriz arenosa o limo-arenosa. Presenta colores beige, pardo o gris claro, dependiendo del grado de oxidación y del tipo de roca fuente. El espesor aparente suele variar entre 3 y 10 m, con una disposición interna estratificada o masiva según el ambiente de deposición. Geotécnicamente, este suelo ofrece buen drenaje y adecuada capacidad portante, aunque su heterogeneidad interna puede generar zonas localizadas de asentamiento diferencial o vacíos. Representa una unidad de transición entre el relieve plano aluvial y las zonas de ladera baja, actuando como testigo de antiguos niveles fluviales y episodios de agradación seguidos por incisión. Su estabilidad general es buena, pero su comportamiento depende del grado de compactación natural y del control de aguas superficiales.

Figura 4. Suelo transportado areno gravoso de terraza y cono de deyección (Stagtc)



Fuente: AUTOR

5.1.1.1.2.3 Suelo transportado gravo arenoso de depósitos recientes (Stgadr)

Corresponde a los depósitos más jóvenes del sistema fluvial, ubicados en el cauce activo y en sus márgenes inmediatas, donde el Río de Oro transporta y deposita sedimentos gruesos de forma continua. Estos materiales se originan en eventos de flujo torrencial y crecidas periódicas, que movilizan gravas y arenas desde zonas más altas y las acumulan en barras y márgenes del canal principal. Litológicamente, el suelo está compuesto por una mezcla heterométrica de gravas y arenas de granulometría media a gruesa, bien rodadas y poco compactas, con escasa matriz limosa y buena permeabilidad. Los colores dominantes son gris claro, beige y pardo amarillento, variando con el contenido de humedad y el tipo de clasto. El espesor es variable entre 1 y 5 m, dependiendo del grado de incisión y del nivel de base local. Morfológicamente, se dispone sobre superficies bajas y ligeramente inclinadas, sujetas a procesos activos de erosión y sedimentación. Geotécnicamente, constituye un material drenante y competente, pero de alta variabilidad lateral y riesgo de socavación o remoción en zonas cercanas al cauce activo. Su presencia refleja la dinámica actual del sistema fluvial cuaternario, siendo un indicador de los procesos de rejuvenecimiento y migración del canal del Río de Oro.

Figura 5. Suelo transportado gravo arenoso de depósitos recientes (Stgadr)



Fuente: AUTOR

5.2 UNIDADES GEOMORFOLÓGICAS

La geomorfología, disciplina fundamental en las ciencias de la Tierra, se enfoca en el estudio de la interrelación entre las formas del relieve, la disposición estructural de los materiales geológicos y los procesos que los originan (Carvajal, 2004). En este contexto, el elemento geomorfológico representa el nivel de detalle más alto dentro de una unidad, definido por las características del relieve, la morfometría del terreno y los microrrelieves asociados a propiedades litológicas específicas, lo cual se logra mediante análisis exhaustivos (Carvajal, 2012). Para la caracterización de estos elementos, se adoptaron las directrices establecidas en la estandarización de la cartografía geomorfológica en Colombia (INGEOMINAS, 2011) y las unidades geomorfológicas del Servicio Geológico Colombiano (SGC, 2013). Esta metodología es crucial para la interpretación y el diagnóstico del comportamiento del terreno frente a los diversos procesos que modelan el relieve y configuran el paisaje.

El conocimiento geomorfológico, que abarca la descripción, origen y evolución de las formas del relieve, es de vital importancia en la planificación del uso del suelo y la ocupación del territorio. Constituye una herramienta esencial para identificar las limitaciones y potencialidades en los ámbitos social, económico y ambiental. Para una adecuada delimitación de las unidades geomorfológicas en el área de estudio, es imperativo analizar el origen de cada unidad de paisaje, evaluar las formas e inclinaciones de las laderas, y

comprender la interacción entre los procesos exógenos (denudativos) y endógenos (estructurales). Este análisis holístico permite la identificación y cartografía precisa de las geoformas.

Las geoformas y la dinámica inherente al modelado de la superficie terrestre son determinantes en la distribución de los asentamientos humanos y las actividades económicas. Influyen significativamente en la localización de la infraestructura y las interacciones entre los centros poblados, además de condicionar las posibilidades constructivas en función de fenómenos como la erosión y los movimientos en masa.

La clasificación de unidades geomorfológicas empleada en este proyecto se basa en la metodología desarrollada por el ITC de Holanda. Para la nomenclatura, se utilizó la establecida en el Documento Metodológico de la Zonificación de Susceptibilidad y Amenaza por Movimientos en Masa Escala 1:100.000 (SGC, 2013), con algunas modificaciones puntuales para adaptarla a las características específicas del estudio.

5.2.1 MORFOLOGÍA Y MORFOMETRÍA

La clasificación morfométrica del terreno se obtuvo a partir del análisis de pendientes, elaborado conforme a la metodología establecida por el Servicio Geológico Colombiano (SGC). Los resultados de esta clasificación se presentan en la figura siguiente, donde se representa los rangos de pendiente.

Figura 6. Clasificación de pendientes según su grado de inclinación

INCLINACIÓN (°)	PROCESOS CARACTERÍSTICOS Y CONDICIONES DEL TERRENO
0-2	**Plano a casi plano.** No hay denudación apreciable.
2-4	**Suavemente inclinado.** Movimientos en masa de baja velocidad y procesos erosivos de diferentes tipos, especialmente bajo condiciones periglaciares (solifluxión) y fluviales (erosión laminar y en surcos). Susceptible a desarrollar procesos erosivos.
4-8	**Inclinado.** Condiciones similares a las anteriores. Alta susceptibilidad a desarrollar procesos erosivos.
8-16	**Moderadamente abrupto.** Movimientos en masa de todos los tipos, especialmente solifluxión periglaciar, reptación y ocasionalmente deslizamientos, también erosión de tipo laminar y en surcos. Susceptible a erosión y deslizamientos.
16-35	**Abrupto.** Procesos denudacionales intensos de diferentes tipos (erosión bajo cubierta forestal, reptación, deslizamientos). Alta propensión al desarrollo de procesos erosivos.
35-55	**Muy abrupto.** Afloramientos rocosos, procesos denudacionales intensos, depósitos granulares caóticos de poco espesor.
> 55	**Extremadamente abrupto.** Afloramientos rocosos. Procesos denudacionales muy fuertes, especialmente "denudación de escarpe"; susceptible a rodamiento de rocas.

Fuente: SGC, 2017.

El mapa de pendientes evidencia una marcada heterogeneidad morfológica en la zona de estudio, cuya configuración está fuertemente condicionada por un drenaje central que genera una asimetría topográfica significativa. La distribución de pendientes revela que las superficies planas o suavemente inclinadas (0° a 8°) se localizan principalmente en el fondo del valle y sobre algunas terrazas naturales o artificiales. Estas áreas, por su relativa estabilidad geomorfológica, han favorecido la ocupación humana y el desarrollo de infraestructura. No obstante, su proximidad directa al cauce las expone a procesos de inundación, acumulación de sedimentos y anegamientos temporales durante eventos de precipitación intensa.

En contraste, la mayor parte del territorio está dominada por pendientes entre moderadas y fuertes (8° a 35°), representadas por los tonos amarillo oscuro y naranja en los flancos del valle. Estas laderas, que descienden abruptamente hacia el drenaje, evidencian una morfología inestable en la que el ángulo de inclinación constituye un factor detonante frente a procesos de remoción en masa. La concentración densa y estrecha de curvas de nivel en estas zonas refuerza la presencia de pendientes pronunciadas y sugiere una dinámica erosiva activa.

Los sectores más críticos corresponden a las pendientes muy empinadas (>35° a >55° y >55°), identificadas en tonos rojos en crestas y cortes de ladera. Estas áreas corresponden a escarpes y taludes casi verticales donde la combinación de inclinación extrema, meteorización de materiales y ausencia de cobertura vegetal suficiente aumenta drásticamente la probabilidad de deslizamientos repentinos, caída de bloques y erosión acelerada. Aunque su extensión es limitada, concentran el mayor nivel de amenaza geotécnica.

En síntesis, el paisaje corresponde a un valle encajado con notoria variación de pendientes, lo que condiciona fuertemente el uso del suelo. El crecimiento urbano ha avanzado sobre laderas con pendientes moderadas, zonas que funcionan como planos potenciales de falla cuando los suelos residuales se saturan.

5.2.2 UNIDADES GEOMORFOLÓGICAS EN LA ZONA DE ESTUDIO

En la zona de estudio, se ha identificado ocho (8) unidades geomorfológicas principales.

Estas se clasifican en dos categorías según su origen:

- Geoformas Fluviales (3 unidad): Estas unidades reflejan la influencia directa de los procesos erosivos y de acumulación de los cuerpos de agua.
- Geoformas estructurales (3): Estas unidades reflejan la influencia de la dinámica regional y hacen parte del paisaje estructural.
- Geoformas Antrópicas (2 unidades): Estas unidades reflejan la influencia directa de la acción o intervención humana sobre las laderas.

La distribución espacial de estas unidades se detalla en la figura adjunta y sus características se resumen en la siguiente tabla.

Tabla 6. Clasificación de las unidades geomorfológicas

ORIGEN	UNIDAD	SÍMBOLO
Fluvial	Cauce o lecho actual del río	F1
	Nivel bajo de terraza	F3
	Escarpe de terraza	F6
Estructural	Lomo o cima estructural	E1
	Nicho estructural	E2
	Ladera estructural	E7
Antrópico	Obras de ingeniería	A7
	Laderas explanadas	A9

Fuente: AUTOR

5.2.2.1 Unidades de origen fluvial

Las unidades geomorfológicas fluviales agrupan las formas del relieve originadas por la acción de los procesos asociados al flujo de agua en ríos, quebradas y drenajes naturales. Estas geoformas resultan de la dinámica combinada de erosión, transporte y deposición de sedimentos, la cual modela el paisaje en función de la energía del flujo, la pendiente, la litología y las condiciones climáticas locales. Entre ellas se incluyen terrazas, planicies de inundación, diques naturales, cauces y albardones. Desde el punto de vista geotécnico, los depósitos fluviales suelen caracterizarse por una alta variabilidad granulométrica, estratificación irregular y presencia de materiales poco consolidados, lo que influye en su capacidad portante, permeabilidad y comportamiento frente a la saturación.

Estas características confieren a las unidades fluviales una elevada sensibilidad a procesos de erosión, socavación y licuación, especialmente durante eventos de crecida o saturación prolongada, por lo cual su adecuada delimitación y análisis son esenciales para la evaluación de la estabilidad y la gestión del riesgo en zonas ribereña.

Tabla 7. Unidades de origen fluvial

ORIGEN	GEOFORMA	NOMENCLATURA
Fluvial	Cauce o lecho actual del río	F1

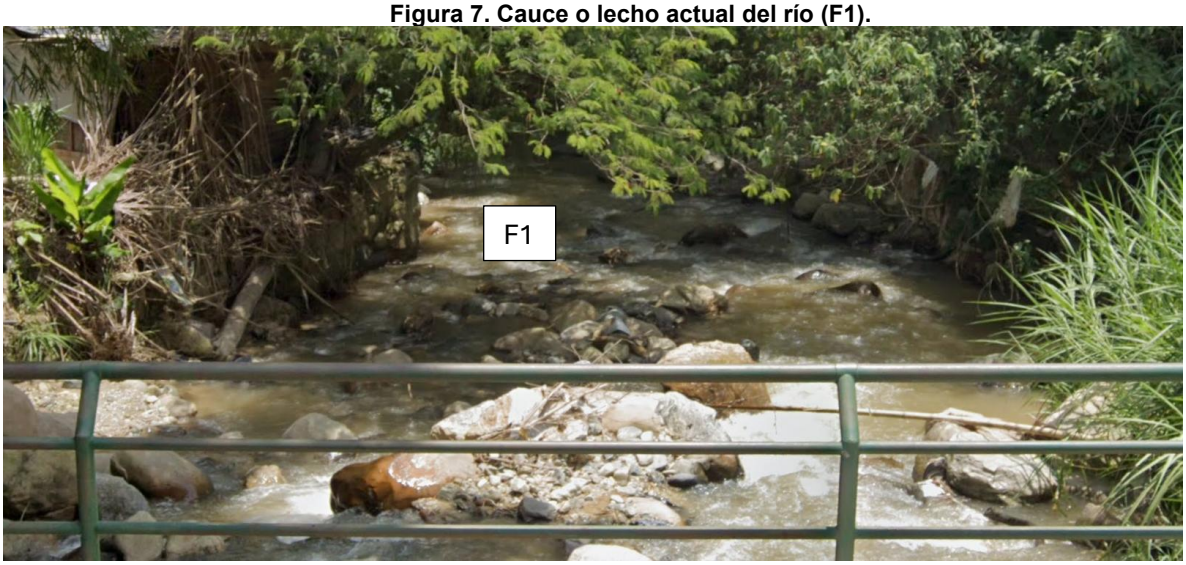
	Nivel bajo de terraza	F3
	Escarpe de terraza	F6

Fuente: AUTOR

5.2.2.1.1 Cauce o lecho actual del río (F1)

Corresponde al dominio ocupado por el cauce activo de las corrientes fluviales, donde se concentra la dinámica hidráulica y sedimentaria del sistema. Incluye las vegas más recientes, barras de arena y gravas, y zonas de deposición temporal de materiales aluviales. Este rasgo refleja la actividad fluvial contemporánea, caracterizada por procesos de erosión, transporte y sedimentación continua, los cuales generan una morfología en constante ajuste ante variaciones de caudal y régimen de escorrentía.

Figura 7. Cauce o lecho actual del río (F1).



Fuente: AUTOR

5.2.2.1.2 Nivel de terraza baja (F3)

Unidad morfológica plana a ligeramente inclinada, ubicada en cotas ligeramente superiores al cauce actual (diferencias altimétricas menores a 2 m). Estas terrazas se originan por la acumulación y posterior abandono de depósitos fluviales o fluvio-torrenciales, conformando niveles escalonados que evidencian antiguas posiciones del cauce. Su génesis está asociada a procesos de agradación seguidos por episodios de incisión fluvial, lo que les otorga una morfología estable, aunque susceptible a erosión marginal y a saturación en condiciones de alta pluviosidad.

Figura 8. Nivel de terraza bajo (F3)



Fuente: AUTOR

5.2.2.1.3 Escarpe de terraza (F6)

Superficie frontal y abrupta asociada al borde de una terraza, que se caracteriza por presentar inclinaciones muy pronunciadas, generalmente mayor de 60°. Esta geoforma se origina como resultado de procesos erosivos activos, principalmente relacionados con la acción de corrientes de agua que socavan la base del talud, provocando el retroceso del escarpe y la definición de un desnivel marcado entre la terraza y el nivel inferior del cauce o planicie adyacente.

Figura 9. Escarpe de terraza (F6)



Fuente: AUTOR

5.2.2.2 Unidades de origen estructural

Son formas del relieve originadas y controladas principalmente por la estructura geológica interna de la corteza terrestre. Su desarrollo responde a la disposición, deformación y comportamiento mecánico de las rocas, así como a la acción de fuerzas tectónicas (compresión, tensión o cizalla) que generan plegamientos, fracturamiento o fallamiento. Estas geoformas reflejan la arquitectura geológica del terreno, pues su orientación, forma y

distribución están estrechamente vinculadas a elementos estructurales como fallas, pliegues, fracturas, diaclasas y contactos litológicos.

En síntesis, las geoformas estructurales expresan en la superficie la configuración interna de las rocas y su historia tectónica, por lo que constituyen indicadores clave para entender la evolución geodinámica y el comportamiento geomecánico del terreno.

Tabla 8. Unidades de origen estructural

ORIGEN	GEOFORMA	NOMENCLATURA
Fluvial	Lomo o cima estructural	E1
	Nicho estructural	E2
	Ladera estructural	E7

Fuente: AUTOR

5.2.2.2.1 Lomo o cima estructural

Elevación topográfica generada por deformaciones tectónicas, principalmente por plegamiento o fallamiento de los estratos rocosos. Se manifiesta como un abombamiento o domo en la superficie del terreno, cuyas dimensiones pueden variar desde decenas de metros hasta escalar a cerros o incluso cordilleras completas, dependiendo de la magnitud del proceso tectónico y de la resistencia diferencial de los materiales involucrados.

5.2.2.2.2 Nicho estructural

Depresión o microcuenca cerrada con forma semicircular u ovalada (observable en planta), cuyo origen está fuertemente condicionado por la actividad tectónica. Su formación se relaciona con sistemas de fracturas o fallas que generan subsidencia o hundimiento local del terreno, predominando el control estructural sobre los procesos erosivos. Estas formas actúan como zonas de acumulación de sedimentos y drenaje interno.

5.2.2.2.3 Ladera estructural

Superficie inclinada del terreno cuyo ángulo y dirección están condicionados por la orientación de planos estructurales como estratificación, diaclasas, foliación o fracturas. Estas laderas se desarrollan cuando las discontinuidades geológicas coinciden con el sentido de la pendiente, facilitando la erosión y, en algunos casos, la movilización de materiales en forma de deslizamientos o caídas de bloques, especialmente cuando las discontinuidades presentan buzamientos similares a la inclinación del relieve.

5.2.2.3 Unidades de origen antrópico

Las unidades geomorfológicas antrópicas comprenden aquellas formas del relieve que han sido modificadas, modeladas o generadas directamente por la acción humana, como resultado de actividades constructivas, extractivas o de adecuación del terreno. Estas geoformas reflejan intervenciones que alteran los procesos morfodinámicos naturales, modificando la pendiente, el drenaje y las condiciones de estabilidad del terreno. Desde el punto de vista geotécnico, tales modificaciones pueden implicar cambios en la compactación, la estructura interna y el comportamiento mecánico de los materiales, incrementando la susceptibilidad a fenómenos como erosión, deslizamientos o asentamientos diferenciales.

Su identificación y caracterización son fundamentales para la planificación del uso del suelo, la gestión del riesgo y el diseño de obras de infraestructura, dado que su estabilidad depende en gran medida de la calidad de las intervenciones y del manejo adecuado de las condiciones hidráulicas y estructurales del terreno intervenido.

Tabla 9. Unidades antrópico

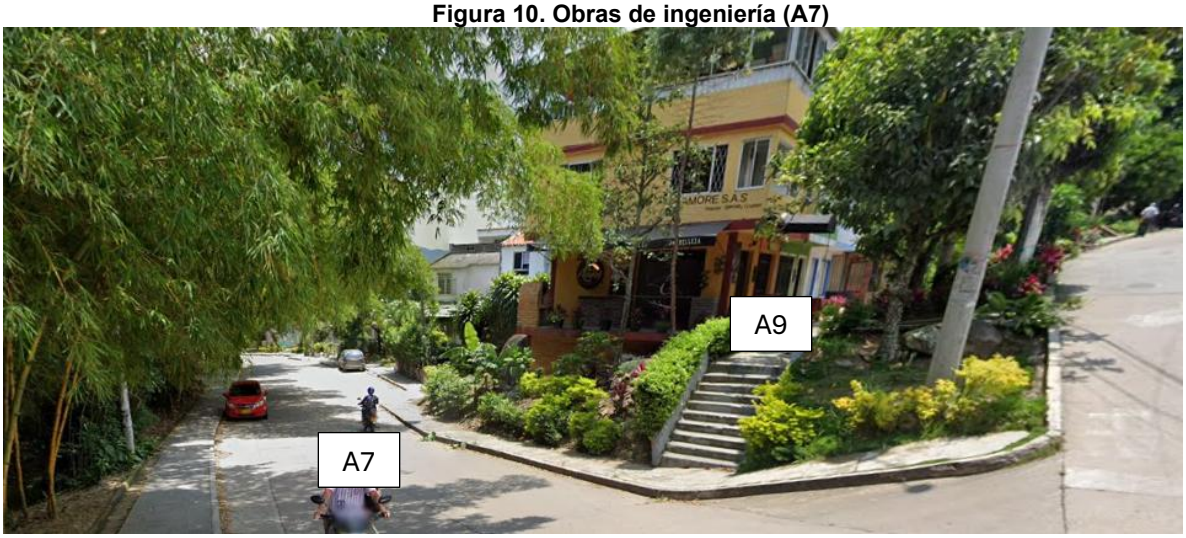
ORIGEN	GEOFORMA	NOMENCLATURA
Antrópico	Obras de ingeniería	A7
	Laderas explanadas	A9

Fuente: AUTOR

5.2.2.3.1 Obras de ingeniería (A7)

Corresponden a estructuras e intervenciones antrópicas desarrolladas con el fin de mitigar o prevenir procesos de inestabilidad como movimientos en masa, erosión fluvial o socavación lateral. Incluyen obras de contención, drenaje, encauzamiento y protección de taludes, las cuales modifican localmente la morfología natural, introduciendo superficies artificiales con pendientes controladas y materiales compactados. Estas formas de origen antrópico constituyen un componente relevante en la configuración geomorfológica actual del área, al influir directamente en la dinámica de escorrentía y estabilidad superficial.

Figura 10. Obras de ingeniería (A7)



Fuente: AUTOR

5.2.2.3.2 Laderas explanadas (A9)

Corresponden a sectores de ladera donde se han realizado cortes o modificaciones artificiales del terreno con el propósito de reducir la pendiente natural y generar superficies relativamente planas que permitan la construcción de viviendas, vías u otras obras de infraestructura. Estas intervenciones alteran la morfología original y modifican las condiciones de estabilidad del talud, generando cambios en el equilibrio tensional del suelo o del macizo rocoso.

5.2.3 MORFODINÁMICA

La topografía y los procesos morfodinámicos constituyen factores determinantes en la estabilidad del terreno, ya que condicionan tanto el comportamiento del drenaje superficial como la respuesta del suelo frente a esfuerzos naturales y antrópicos. En la zona de estudio se realizó un análisis integral de los elementos que pueden generar inestabilidad y de los principales procesos erosivos presentes, lo que permitió identificar sus áreas de influencia, localización y características.

Aunque el sector se encuentra próximo a trazos de fallas geológicas importantes, la relativa uniformidad del relieve y la cobertura vegetal en parte producto de la intervención antrópica han favorecido que no se evidencien movimientos en masa activos de magnitud relevante.

Tampoco se observaron rasgos que indiquen condiciones propicias para deslizamientos o caídas de material en el estado actual. Esta aparente estabilidad se relaciona con la conformación del depósito de suelos predominantes y con el hecho de que gran parte del área corresponde a superficies semiplanas. Sin embargo, la morfodinámica regional está fuertemente condicionada por la interacción entre el control estructural, la litología de los

suelos residuales y la actividad humana. El proceso dominante es la inestabilidad de ladera asociada a la Falla Bucaramanga, la cual atraviesa el sector y actúa como plano de debilidad en el macizo rocoso. Su presencia favorece la meteorización diferencial y la concentración de esfuerzos. En las laderas conformadas por suelos residuales limo - arcillosos de la Formación Silgará y por suelos derivados del Gneis de Bucaramanga, son susceptibles procesos de deslizamiento y flujo superficial. En particular, los suelos residuales de la Formación Silgará presentan mayor susceptibilidad a fallas planas debido a la orientación heredada de la foliación de la roca madre, que funciona como plano de debilidad cuando el suelo se encuentra saturado.

La dinámica fluvial también desempeña un papel relevante en el modelado del relieve. En el cauce y terrazas bajas se observa socavación lateral que erosiona las márgenes y genera inestabilidad local, especialmente durante eventos de alta precipitación, cuando pueden presentarse flujos aluviales y deposición de sedimentos en áreas de terraza. Finalmente, la intervención humana ha introducido un componente adicional de riesgo morfodinámico mediante el desarrollo de laderas explanadas. En estas áreas, la ejecución de cortes y rellenos modifica el equilibrio geotécnico natural y altera el patrón de drenaje, lo que incrementa la susceptibilidad a movimientos en masa, especialmente en las pendientes adyacentes a zonas urbanizadas. En consecuencia, la inestabilidad del terreno en esta región debe considerarse como un proceso dinámico y multifactorial, donde convergen factores tectónicos, geomorfológicos y antrópicos.

5.2.3.1 Procesos erosivos

Los procesos erosivos que actúan sobre la superficie del suelo en la zona de estudio se consideran mecanismos de degradación geológica impulsados principalmente por la acción hídrica y las fracturas derivadas de la geodinámica regional. Esta se manifiesta físicamente en tres fases secuenciales: el desprendimiento de partículas de sedimento, su transporte, y finalmente, su deposición. Este fenómeno de arrastre y movilización de partículas de suelo, producto del escurrimiento superficial, se clasifica como erosión hídrica y, según la taxonomía del IDEAM (1998), se designa específicamente como erosión por escurrimiento.

Para asegurar la coherencia conceptual y la precisión en la clasificación de estos procesos, se realizó un análisis comparativo entre la metodología propuesta por el IDEAM (1998) y la de Van Zuidam (1996), ambas reconocidas en el campo de la geomorfología y la gestión ambiental. Aunque ambas presentan interrelaciones y son pertinentes, para el presente estudio se ha decidido adoptar la metodología del IDEAM (1998), debido a su pertinencia y aplicabilidad en el contexto geográfico y normativo colombiano.

Tabla 10. Cuadro comparativo entre las metodologías propuestas por el IDEAM, 1998 y Van Zuidam, 1996.

PROCESOS EROSIVOS SEGÚN IDEAM, 1998.	PROCESOS EROSIVOS SEGÚN VAM ZUIDAM, 1996.
Escurrimiento superficial difuso leve, o disección incipiente y truncamiento de suelos.	Laminar
Escurrimiento superficial difuso y concentrado o disección moderada.	Surcos
Escurrimiento superficial concentrado o disección profunda.	Cárcavas

Fuente: AUTOR

5.2.3.1.1 Erosión por escurrimiento superficial difuso leve, disección incipiente y truncamiento de suelos (laminar)

Durante la inspección de campo y la interpretación morfológica, se infiere la ocurrencia de erosión laminar leve en sectores de Nivel de Terraza Baja y Laderas Explanadas. Este proceso es particularmente evidente en áreas con el Suelo Transportado Aremo Limoso de Terraza Aluvial y en las laderas desprovistas de cobertura vegetal. La erosión laminar se manifiesta como la remoción superficial y uniforme de finas capas de suelo, indicando una leve pérdida del horizonte orgánico y el arrastre de materiales limosos y arenosos hacia zonas de menor pendiente. Su ocurrencia está asociada a la escorrentía difusa generada durante eventos de lluvia intensa, la cual, al no ser disipada por la vegetación, provoca la degradación progresiva de la capa superficial. Aunque su intensidad es generalmente baja, este proceso indica un incipiente deterioro de la estabilidad superficial, que puede agravarse en las laderas más inclinadas.

Figura 11. Erosión laminar



Fuente: AUTOR

5.2.3.1.2 Escurrimiento superficial difuso y concentrado o disección moderada (surcos)

En sectores puntuales de Laderas Estructurales y en los bordes de las Laderas Explanadas o áreas urbanizadas, se identifican evidencias de erosión en surcos. Estos surcos reflejan la concentración de la escorrentía superficial en pequeños canales o micro - depresiones lineales, desarrollándose preferentemente sobre los Suelos Residuales. Este tipo de erosión constituye un avance del proceso laminar hacia formas incipientes de canalización, producto de la pérdida de estructura del suelo y la insuficiente cobertura vegetal en las áreas de mayor pendiente. Su presencia es un indicador de vulnerabilidad morfodinámica local, ya que la evolución de estos surcos a cárcavas se ve facilitada por la naturaleza limo-arcillosa de los suelos residuales, incrementando la pérdida de suelo y el aporte de sedimentos al cauce central.

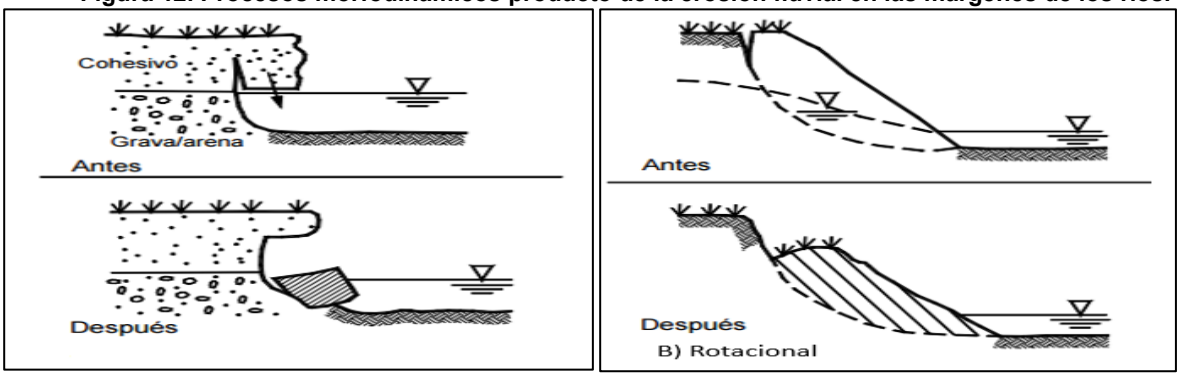
5.2.3.1.3 Erosión fluvial o socavación

a erosión fluvial es un agente morfodinámico de primera magnitud en el eje central de la zona de estudio, afectando directamente la unidad de Cauce Actual o Lecho de y las márgenes de las terrazas.

- Erosión marginal: Es el proceso dominante a lo largo de los tramos curvos del cauce, particularmente en las márgenes cóncavas. Este fenómeno es provocado por la fuerza centrífuga del flujo, que erosiona la parte exterior de la curva y deposita sedimentos en el lado opuesto. En el área de estudio, se observaron procesos de socavación marginal asociados a la acción erosiva del flujo sobre la base de los taludes ribereños, que corresponden a las unidades de Nivel de Terraza Baja y Escarpé de Terraza. Este fenómeno se manifiesta mediante el socavamiento del pie del talud, caída de bloques de suelo y exposición de raíces en la margen externa.

La dinámica fluvial, combinada con la textura suelta de los depósitos aluviales favorece la remoción lateral progresiva del material de ribera y la pérdida de estabilidad de los taludes, representando puntos críticos de inestabilidad.

Figura 12. Procesos morfodinámicos producto de la erosión fluvial en las márgenes de los ríos.



Fuente: Geotecnologia s.a.s

- Erosión de fondo: Se produce por la acción vertical del flujo, contribuyendo a la profundización del cauce y a la formación del valle en "V" observado. Además, se identifican signos de erosión regresiva (similar a la erosión remontante) en la cabecera del cauce o en afluentes, lo cual refleja la movilidad natural del sistema fluvial. Este proceso, al incidir en las rocas y suelos, genera una mayor pendiente aguas arriba, favoreciendo la propagación de la incisión y el mayor aporte de potencial erosivo al cauce principal, lo que potencializa los riesgos de inestabilidad y pérdida de terreno en las partes altas.

Figura 13. Socavación Marginal y de fondo



Fuente: AUTOR

Figura 14. Fisuras, grietas y hundimientos localizados



Fuente: AUTOR

5.3 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL LOCAL

En la zona de estudio no se identificaron afloramientos rocosos significativos que permitieran evaluar de manera directa desplazamientos recientes o deformaciones estructurales en los materiales del subsuelo. Esto se debe a la predominancia de depósitos cuaternarios no consolidados principalmente suelos residuales y aluviales que cubren el sustrato rocoso y limitan la exposición de estructuras tectónicas visibles en superficie. Como consecuencia, no

fue posible registrar fracturas, planos de discontinuidad o estructuras asociadas a deformación reciente, por lo que la interpretación estructural se complementó con el análisis de la cartografía geológica regional y la configuración geomorfológica del relieve.

5.3.1 GENERALIDADES

En el área de estudio no se reconocen rasgos geomorfológicos ni estructurales superficiales que evidencien de manera directa la influencia de fallas regionales sobre la configuración inmediata del relieve o la estabilidad del terreno. No obstante, su localización dentro del ámbito geodinámico controlado por las fallas de Bucaramanga y Suárez le otorga una relevancia estructural notable, al encontrarse inserta en un contexto tectónicamente activo característico del Macizo de Santander.

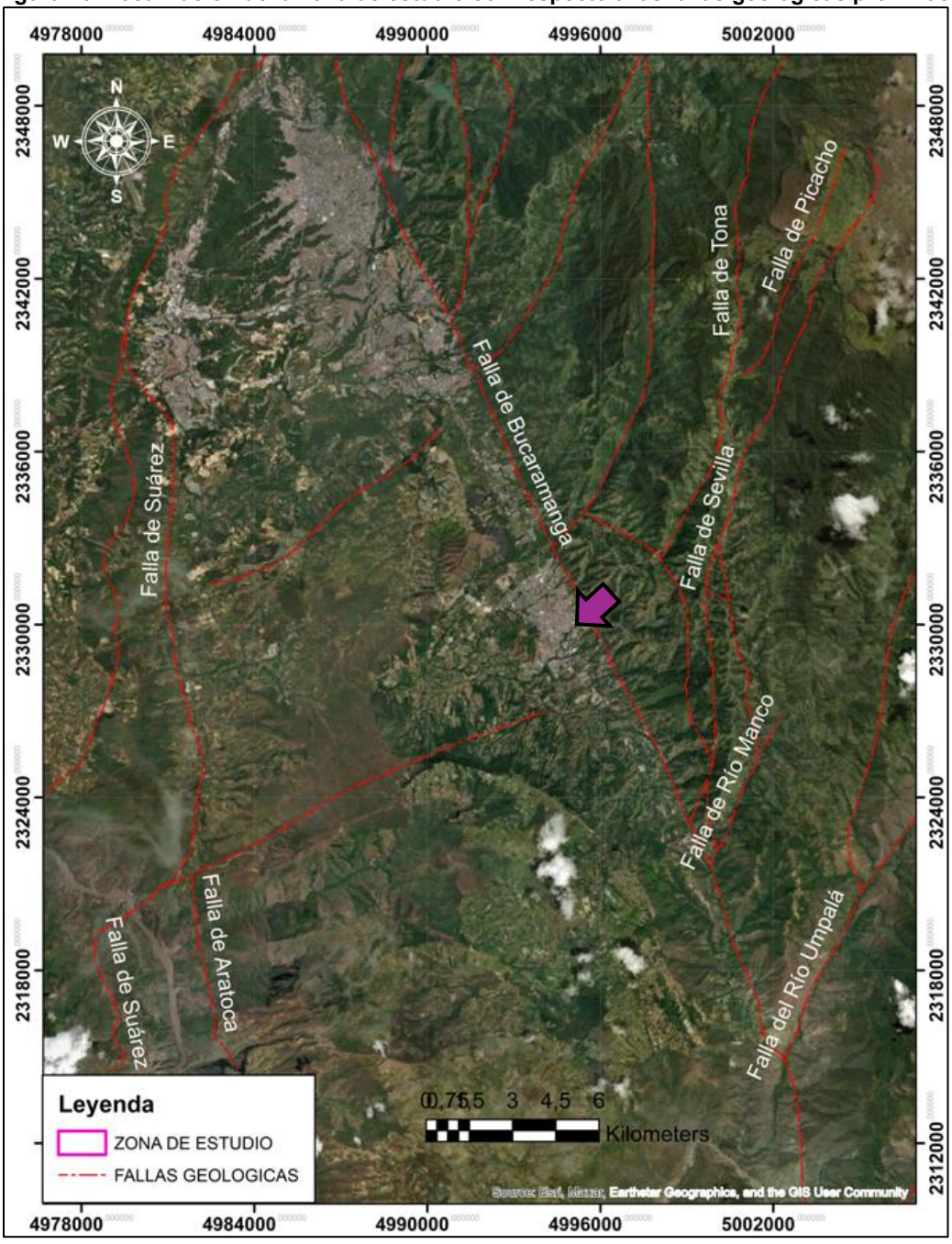
La Falla de Bucaramanga constituye el elemento estructural de mayor influencia, dado que su trazo principal atraviesa la zona de estudio en dirección Sureste - Noroeste (SE–NW), seccionándola parcialmente en su porción central, tal como se observa en la siguiente figura. Esta relación espacial sugiere una interacción directa y crítica con la geología local, ya que las unidades litológicas presentes principalmente el Gneis de Bucaramanga y la Formación Silgará, muestran un alto grado de fracturamiento y deformación tectónica heredada (se inferió de cartografía y análisis morfoestructural, no observada directamente).

Dicho fracturamiento genera zonas de mayor permeabilidad secundaria, facilitando la infiltración y circulación subterránea del agua, lo que a su vez acelera los procesos de meteorización diferencial y condiciona el desarrollo de las Unidades Geológicas Superficiales (UGS) en el entorno inmediato al plano de falla.

A escala regional, el área de estudio se encuentra bajo la influencia del sistema de fallas del sector centro oriental del Macizo de Santander, donde además de la Falla de Bucaramanga intervienen otras estructuras relevantes como la Falla de Suárez, ubicada aproximadamente a 14 km al Occidente. Su efecto se considera indirecto o de campo lejano, actuando dentro del régimen de esfuerzos regionales que controla tanto la morfología como la sismicidad de la región. De manera complementaria, fallas como la de Tona, Picacho, Sevilla, Río Manchic y Río Umpalá refuerzan la configuración de un entorno tectónicamente complejo y activo, responsable del elevado nivel de actividad sísmica característico de la región.

En síntesis, la interacción de estas estructuras define un campo de esfuerzos regional persistente, si bien no se manifiesta mediante rupturas visibles dentro del predio, sí impone condiciones de amenaza sísmica significativa. Por lo tanto, el contexto tectónico del Macizo de Santander impone una amenaza sísmica regional significativa que condiciona la estabilidad del terreno. Este factor es sumamente importante y debe ser incorporado en los estudios de estabilidad, en el diseño estructural de edificaciones y obras civiles que se proyecten en el área.

Figura 15. Localización de la zona de estudio con respecto a las fallas geológicas próximas.



Fuente: Tomado y modificado de Google Earth e IGAC.

6. ANÁLISIS DE LA SOCAVACIÓN DEL ESTRIBO

El mecanismo de socavación en roca difiere significativamente del que ocurre en suelos. En la roca, la erosión se produce principalmente por el desprendimiento de bloques individuales, los cuales están delimitados por planos de discontinuidad tales como diaclasas y fracturas.

La acción de las fuerzas hidráulicas, especialmente en presencia de flujos de alta velocidad o turbulencia, puede superar la resistencia al corte y el peso propio de estos bloques, generando su desplazamiento y eventual remoción. Es fundamental considerar la calidad de la roca, el grado y la orientación de las fracturas, así como el nivel de meteorización, ya que estos factores determinan la erodibilidad y la vulnerabilidad del macizo rocoso frente a procesos de socavación.

La teoría de diseño de socavación se centra en calcular la socavación en materiales granulares (suelos). Al emplazar la cimentación en roca, se está adoptando un criterio conservador superior, ya que se supera la condición de diseño base.

Por eso es necesario evaluar la erodabilidad en roca, que depende directamente del la calidad del macizo rocoso y calidad de la roca: Una roca fracturada, meteorizada o muy diaclasada puede comportarse como un agregado de bloques removibles.

6.1 EVALUACIÓN DEL MACIZO ROCOSO AFLORANTE EN LA ZONA DE ESTUDIO

6.1.1 DESCRIPCIÓN GEOLÓGICA DEL MACIZO ROCOSO

El macizo corresponde a un Gneiss cuarzo-feldespático de coloración grisácea con bandas biotíticas, textura fanerítica y un grado de fracturamiento moderado a intenso.

- **Discontinuidades observadas**

- Espaciamiento típico: Las discontinuidades presentan frecuencias entre 0.20 y 0.50 m, configurando un macizo con fracturamiento moderado. En sectores cercanos al núcleo de la falla, la roca se encuentra más fragmentada.

- Apertura: Los planos muestran aperturas entre 0.5 y 2 mm, generalmente cerradas a ligeramente abiertas, con rellenos de óxidos de hierro y limos.

- Persistencia: Presentan una persistencia media a alta (1.0 a 3.0 m), generando bloques sub-angulares bien definidos.

- Rugosidad: Las superficies de fractura son de rugosidad media a alta (onduladas), lo que contribuye a la resistencia por interbloqueo.

- Relleno: Planos con rellenos delgados (<2 mm) de material limo-arenoso u óxidos, con baja influencia de arcillas expansivas en comparación con rocas sedimentarias.

- Humedad: El macizo se observa generalmente seco y muestra humedad intersticial tras eventos de lluvia. Aunque la parte baja del talud se encuentra constantemente húmedo debido al cuerpo de agua circundante

- Comportamiento mecánico observado: La roca intacta fresca muestra una dureza elevada (prueba de campo), pero el macizo se comporta como un conjunto de bloques entrelazados cuya estabilidad depende del sistema de fracturas.

6.1.2 DESCRIPCIÓN DEL MACIZO ROCOSO

El macizo rocoso observado corresponde a un Gneis cuarzo-feldespático de tonalidades grises a blanquecinas, con bandas biotíticas bien definidas y textura fanerítica metamórfica, con fracturamiento moderado.

Tabla 11. Propiedades del macizo rocoso

PROPIEDAD	VALOR ESTIMADO	REFERENCIA
Resistencia a la compresión simple (intacta)	50 – 100 MPa	Hoek & Brown, 1997
Índice de calidad de la roca (RQD)	60 – 75 %	Bieniawski, 1989
Espaciamiento de discontinuidades	0.2 – 0.5 m	Observación campo
Condición de juntas	3 - 4	Observación campo
Condición de relleno	4	Arcilla delgada
Resistencia del macizo	10 – 20 MPa	Prueba de campo
Condición del agua subterranea	Seco	Observación campo

Fuente: AUTOR

6.1.3 CLASIFICACIÓN DEL MACIZO ROCOSO

El sistema RMR permite evaluar la calidad del Gneiss a partir de sus parámetros estructurales e hidrogeológicos. Para el Gneiss de Bucaramanga en el barrio La candelaria, se analizan los siguientes puntos:

6.1.3.1 Resistencia a la compresión

La resistencia a la compresión simple (UCS) refleja la competencia intrínseca de la roca y constituye la base de la clasificación. La resistencia estimada (por bibliografía y correlación con observaciones de campo) oscila entre 50 y 100 MPa, correspondiente a una roca medianamente dura.

Tabla 12. Resistencia a la compresión simple (UCS)

RESISTENCIA A COMPRESIÓN SIMPLE (MPA)	DESCRIPCIÓN DE LA ROCA	PUNTAJE RMR
> 250	Muy dura	15
100 – 250	Dura	12
50 – 100	**Medianamente dura**	**7**
25 – 50	Moderadamente blanda	4
5 – 25	Blanda	2
< 5	Muy blanda	0

Fuente: Tomado y modificado de Bieniawski (1989).

6.1.3.2 Índice de calidad de la roca (RQD)

El RQD (Rock Quality Designation) expresa el porcentaje de recuperación de testigos mayores a 10 cm de longitud en un sondeo o la estimación visual del grado de fracturación.

De acuerdo con las observaciones de campo, presenta fracturación moderada y bloques de 25–50 cm, lo que corresponde a un RQD estimado entre 60 % y 70 %.

Tabla 13. Índice de calidad de la roca (RQD)

RQD (%)	DESCRIPCIÓN	PUNTAJE RMR
90 – 100	Excelente	20

RQD (%)	DESCRIPCIÓN	PUNTAJE RMR
75 – 90	Buena	17
50 – 75	**Regular**	**13**
25 – 50	Mala	8
0 – 25	Muy mala	3

Fuente: Tomado y modificado de Deere (1963), citado en Bieniawski (1989).

6.1.3.3 Espaciamiento de discontinuidades

El espaciamiento refleja la distancia promedio entre fracturas o planos de debilidad. En campo se midieron diaclasas con separaciones promedio de 0.3m, lo cual indica un espaciamiento medio.

Tabla 14. Espaciamiento de discontinuidades

ESPACIAMIENTO (M)	DESCRIPCIÓN	PUNTAJE RMR
> 2.0	Muy amplio	20
0.6 – 2.0	Amplio	15
0.2 – 0.6	**Medio**	**10**
60 – 200 mm	Cerrado	8
< 60 mm	Muy cerrado	5

Fuente: Tomado y modificado de Bieniawski (1989).

6.1.3.4 Condición de agua subterránea

La presencia de agua afecta significativamente la resistencia del macizo, la presión intersticial y la cohesión en los planos de discontinuidad. En el área no se evidencian zonas húmedas, sin presencia de goteos importantes, lo que corresponde a una condición mojada.

Tabla 15. Condición de agua subterránea

CONDICIÓN DE AGUA	DESCRIPCIÓN	PUNTAJE RMR
Completamente seca	Sin humedad	15
Húmeda	**Superficies brillantes**	**10**

CONDICIÓN DE AGUA	DESCRIPCIÓN	PUNTAJE RMR
Mojada	Presencia de humedad intersticial o leve rezume	7
Goteo	Fugas localizadas	4
Fluyente	Corrientes continuas	0

Fuente: Tomado y modificado de Bieniawski (1989).

6.1.3.5 Ajuste por orientación de discontinuidades

El factor de ajuste por orientación depende de la relación entre la disposición de las discontinuidades y la dirección de excavación o talud.

Se aplica un ajuste de -5 debido a la orientación desfavorable de algunas cuñas respecto a la pendiente del terreno en el barrio La Colina y Candelaria.

Tabla 16. Ajuste por orientación de discontinuidades

CONDICIÓN DE ORIENTACIÓN	TALUDES	TÚNELES	FUNDACIONES
Muy favorable	0	0	0
Favorable	–2	–5	–2
Regular	**–5**	**–10**	**–5**
Desfavorable	–10	–15	–7
Muy desfavorable	–12	–25	–8

Fuente: Tomado y modificado de Bieniawski (1989).

6.1.4 EVALUACIÓN GLOBAL DEL MACIZO

Al integrar los parámetros evaluados mediante el sistema de clasificación de Bieniawski (1989), se obtiene un RMR total estimado de 55, el cual corresponde a una Clase III, categorizada como roca de calidad intermedia. Este valor indica que el macizo presenta un comportamiento geotécnico competente, con una resistencia global moderada y una respuesta estructural condicionada por la densidad de fracturas y el grado de meteorización.

Tabla 17. Evaluación global del macizo

PARÁMETRO	DESCRIPCIÓN	VALOR	JUSTIFICACIÓN
Resistencia	5–10 MPa	7	Roca muy blanda o débilmente cementada
RQD	45–60 %	**13**	Regular, fragmentación moderada
Espaciamiento	0.2–0.5 m	**10**	Fracturas medianamente espaciadas
Condición de fracturas	Rugosidad moderada	20	Media a alta
Agua	Húmedo a mojado	10	Ligera saturación
Subtotal		60	
Orientación de fracturas	Desfavorable (130/55 y 140/75 respecto a talud)	**–5**	
RMR total		**≈ 55**	**Clase III – Roca calidad intermedia**

Fuente: Autor

Este valor de RMR = 55 indica un macizo de comportamiento competente intermedio, con una respuesta estructural condicionada por la red de fracturas tectónicas asociadas a la falla Bucaramanga-Santa Marta.

6.1.4.1 Estimación del Índice Geológico de Resistencia (GSI)

El macizo de Gneis en el barrio La Candelaria presenta una estructura "Blocky" (Bloqueada), con bloques bien formados pero limitados por el intenso fracturamiento regional. Las superficies de discontinuidad presentan ligera oxidación, pero mantienen buena rugosidad, lo que garantiza fricción interna.

Con base en la estructura observada y el estado de las juntas, el macizo se clasifica con un GSI entre 50 y 60, correspondiente a rocas ligeramente alteradas. Este valor es coherente con el RMR obtenido y con la integridad de la matriz del Gneis.

Tabla 18. Estimación del GSI

ESTRUCTURA DEL MACIZO	CONDICIÓN DE LAS DISCONTINUIDADES	RANGO GSI	DESCRIPCIÓN GEOTÉCNICA
Masivo, pocas discontinuidades	Rugosas, frescas	75–90	Roca dura y sana
Masivo, fracturado	**Ligeramente alteradas**	**65–80**	**Roca competente con fracturación moderada**
Bloques fracturados o parcialmente desintegrados	Moderadamente a muy alteradas, relleno fino	35–50	Roca blanda a media, parcialmente meteorizada
Altamente desintegrada o muy fracturada	Muy alteradas, relleno arcilloso	20–35	Roca pobre, transición saprolítica
Desintegrada / suelto (saprolito)	Totalmente alterada	< 20	Suelo residual derivado

Fuente: Tomado y modificado de Hoek y Brown (1997), y Hoek y Marinos (2000).

6.1.5 CLASIFICACIÓN FINAL DEL MACIZO ROCOSO

La integración de los parámetros establece que el macizo rocoso de Gneis de Bucaramanga se clasifica como roca de calidad intermedia (Clase III), con un RMR de 55 y un GSI de 65.

Esta clasificación describe un macizo estable pero que requiere atención en los planos de debilidad foliados y zonas de cizalla. Desde el punto de vista geotécnico, el macizo requiere tratamientos preventivos como drenaje de fracturas y pernos de anclaje puntuales en cuñas críticas que puedan aparecer en el proceso constructivo.

El valor de GSI = 65 obtenido para el macizo rocoso de Gneiss muestra una correlación directa y coherente con el RMR estimado en 55, correspondiente a una Clase III – roca de calidad regular o intermedia, según la clasificación de Bieniawski (1989). Ambos índices reflejan un macizo con una integridad estructural moderada, donde la dureza intrínseca de la roca metamórfica compensa el grado de fracturamiento impuesto por la proximidad a la Falla Bucaramanga-Santa Marta.

La correspondencia entre el GSI y el RMR confirma que el comportamiento geomecánico del sector de La Candelaria está controlado por una red de diaclasas y planos de foliación que definen bloques de tamaño medio, los cuales conservan una buena resistencia al corte debido a la rugosidad de sus superficies y a la ausencia de rellenos arcillosos potentes. A diferencia

de los materiales lodo-lutíticos, esta unidad presenta una mayor estabilidad interna y una menor susceptibilidad a la degradación inmediata por humedad.

Según las correlaciones empíricas propuestas por Hoek y Brown (1997), un valor de RMR cercano a 55 se asocia típicamente con un GSI que oscila entre 50 y 75, rango dentro del cual se ubica el valor adoptado para este estudio. Esto valida la consistencia del análisis realizado y permite emplear estos parámetros con confianza para la determinación de los criterios de rotura de Hoek-Brown modificado en diseños posteriores de ingeniería.

En síntesis, la coherencia entre ambos sistemas de clasificación evidencia que el macizo de Gneis presenta un comportamiento competente intermedio, caracterizado por una resistencia global aceptable, pero con un control estructural dominante derivado de su historia tectónica regional.

Tabla 19. Clasificación del macizo rocoso basada en Bieniawski (1989) y Hoek & Brown (1997, 2002).

ÍNDICE GSI	CLASE	CONDICIÓN ESTRUCTURAL	DESCRIPCIÓN DEL MACIZO
75–90	Muy buena	Roca sana, masiva	Roca dura sin alteración
60–75	Buena	Fracturada, poco alterada	Bloques competentes
35–50	Regular a pobre	Fracturada, alterada, rellenos finos	Bloques muy fracturados
20–35	Pobre	Muy alterada, saprolítica	Transición a suelo residual
< 20	Muy pobre	Desintegrada	Suelo residual arcilloso

Fuente: Autor

6.1.6 CONCLUSIONES DEL ANÁLISIS DE SOCAVACIÓN

El cálculo de la socavación en roca para caissons de 1.2 m de diámetro y 5 m de profundidad requiere considerar la naturaleza discontinua y variable del macizo rocoso, así como los mecanismos de desprendimiento de bloques descritos previamente. A diferencia de los materiales granulares, donde se aplican fórmulas empíricas como las de Laursen o CSU, en roca el proceso está determinado por la calidad, orientación y apertura de las discontinuidades, el grado de meteorización y la resistencia al corte de los contactos entre bloques.

La socavación potencial se evalúa identificando primero las zonas de mayor fracturación y meteorización, donde la erodabilidad es superior. Para el caso de caissons de 1.2 m, se recomienda adoptar como profundidad de socavación máxima esperada la altura del bloque

crítico delimitado por discontinuidades desfavorables, que puede variar entre 1 y 2 veces la apertura dominante de las fracturas. En ausencia de datos específicos, y siguiendo criterios conservadores, se puede considerar una socavación local máxima de 0.5 a 1.0 m en sectores de roca sana, y hasta 2.0 m en sectores de roca intensamente fracturada.

Por lo anterior, para el diseño de los caissons de 1.2 m de diámetro y 5 m de profundidad, se sugiere prever un empotramiento adicional de al menos 1.0 m sobre la profundidad mínima de cimentación recomendada, garantizando así que aun en el escenario de remoción selectiva de bloques, la estabilidad general y la capacidad portante no se vean comprometidas.

Este criterio debe validarse y ajustarse con información de campo durante la excavación, tomando en cuenta la verdadera calidad y geometría de las discontinuidades. Sin embargo, el sondeo 1 y 2 muestra que a la profundidad de cimentación empiezan a aparecer roca sana con un RQD variable y resistencia a la compresión alta.

7. MODELO GEOTÉCNICO

La Norma Colombiana CCP-14 remite el alcance de la investigación de cimentaciones al Artículo 10.4; por tanto, la profundidad de los sondeos para cada estribo debe definirse conforme a lo exigido en el Art. 10.4 (investigación del subsuelo) y en función del tipo de cimentación, la geometría del estribo y la presencia de estratos competentes. En la práctica se exige sondear hasta alcanzar el estrato portante o hasta una profundidad mínima que permita diseñar la cimentación (ver explicación y recomendaciones abajo).

Fundamento normativo

"Una investigación del subsuelo, incluyendo perforaciones y ensayos de suelos, debe llevarse a cabo de acuerdo con las disposiciones del Artículo 10.4 para proporcionar información pertinente y suficiente para el diseño de unidades de la subestructura."

Frase tomada del texto de la Sección 2.4 (CCP-14).

Interpretación práctica y recomendaciones (qué hacer para cada estribo)

1. Regla general (mandato del código):
    - Sondear conforme Art. 10.4. El código no fija una única profundidad fija por tipo de estribo en la Sección 2; exige que la investigación sea *suficiente* para el diseño de la subestructura y que incluya perforaciones y ensayos.
2. Criterios técnicos que normalmente exige el Art.10.4 (práctica de ingeniería):
    - Sondear hasta encontrar el estrato portante competente (capa de roca o suelo con capacidad de carga adecuada) y obtener perfiles continuos y ensayos in-situ (SPT, CPT) y de laboratorio.
    - Profundidad mínima práctica para estribos con zapata superficial: sondeos que penetren al menos 2–3 veces la profundidad estimada de cimentación por debajo de la base de la zapata o hasta 3–5 m adicionales para caracterizar variaciones; si existe estrato blando, profundizar hasta estrato competente.
    - Para pilotes o cimentaciones profundas: sondear hasta 3–5 m por debajo de la punta prevista del pilote o hasta alcanzar criterios de capacidad por ensayo (ensayo de carga, CPT, o resistencia a punta).
    - En ríos o zonas con riesgo de socavación: incluir sondeos laterales y sondeos hasta profundidad suficiente para evaluar la profundidad de socavación de diseño (ver Art. 2.6 y Art.10).
3. Sondeos complementarios y ensayos:

- SPT/CPT continuos, muestras perturbadas y no perturbadas, ensayos de laboratorio (densidad, límites, resistencia cortante), y ensayos de carga cuando proceda.
- En zonas con rellenos, estratos orgánicos o niveles freáticos variables, extender sondeos hasta confirmar la ausencia de capas problemáticas o hasta estrato competente.

Para el proyecto del puente La Candelaria, se realizaron dos sondeos a rotopercusión con extracción de muestras localizados como se muestra en la siguiente imagen:

Ubicación de los sondeos






UBICACIÓN DEL
SONDEO 1

HSC HIDROSUELOS DE COLOMBIA	PERFIL ESTRATIGRÁFICO	CODIGO	FT-EX-003
		FECHA	15/11/2023
		VERSIÓN	2
		Página 1 de 1	

N° DE PERFORACION	1	N° DE ORDEN DE SERVICIO	027-26	N° DE ORDEN DE TRABAJO	027-26	FECHA INCIO	11/02/2026

PROYECTO	PUENTE VILLAS DEL RIO		
SUPERVISOR	ROBINSON OCHOA	OPERADOR	ARTURO ALVAREZ
EQUIPO DE PERFORACIÓN	ROTOPERCUSIÓN	LUGAR DE PERFORACIÓN	PUENTE VILLAS DEL RIO
CONDICIONES METEREOLÓGICAS	SOLEADO		

COORDENADAS	PLANIMÉTRICAS		GEOGRÁFICAS		COTA	1018
	NORTE	1114069.500	N	7.98568091		
	ESTE	1264367.400	W	73.04564550		

MÉTODO DE PERFORACIÓN	SPT - RTP

EXPLORACIÓN DE CAMPO

N° MUESTRA	PROFUNDIDAD (m)		TIPO DE EXTRACCIÓN		N° de golpes			V N	NF	¿RECUPERÓ MUESTRA?		LONGITUD DE LA MUESTRA (cm)	DESCRIPCION DE CAMPO (SUELO-ROCA-CAMBIOS DE ESTRATO, TEXTURA, COLOR)
			SPT	ROTACIÓN	6"	12"	18"			SI	NO		
1	0.00	0.45	✔	-	3	3	4	7	-	✔	-	-	SUELO ARENOSO DE GRANO MEDIO A FINO CONSISTENCIA FIRME COLOR 7,5 YR 6/4
	0.45	0.90	✔	-	6	7	7	14	-	✔	-		
2	0.90	1.35	✔	-	3	7	4	11	-	✔	-	-	SUELO ARENO DE GRANO MEDIO A FINO CON GRAVAS SUB-REDONDEADAS Y MATERIALES ATIPICOS COLOR 7,5 YR 5/4
	1.35	1.80	✔	-	6	5	38R	R	-	✔	-		
3	1.80		-	✔	-	-	-	-	-	✔	-	-	SUELO ARENOSO DE DE GRANO MEDIO A FINO CON GRAVAS SUB-ANGULOSAS HUMEDO COLOR 7,5 YR 5/4
		3.30	-	✔	-	-	-	-	-	✔	-		
4	3.30		-	✔	-	-	-	-	-	✔	-	-	NUCLEO DE ROCA CONGLOMERATICA
		4.80	-	✔	-	-	-	-	-	✔	-		

Resumen del Sondeo 1 (Sondeo 01)

Ubicación y profundidad

- Coordenadas: N 1114069,500 / E 1264367,400; **cota ≈ 1018 m**.
- Perforación iniciada el **11/02/2026**; muestreos relevantes entre **0,00 – 4,80 m**.

Estratigrafía y descripción de campo

- Estrato superficial hasta ~3,3 m: **suelos arenosos de grano medio a fino**, con gravas sub-redondeadas; consistencia firme.
- Entre ~3,3 y 4,8 m se registra **núcleo de roca conglomerática**.
- Observación de humedad y textura: muestras descritas como "**SUELO ARENOSO DE GRANO MEDIO A FINO**" y "**NUCLEO DE ROCA CONGLOMERATICA**".

Ensayos de laboratorio asociados (muestras S-1)

- **Humedad**: muestra de lecho del cauce reporta **14,27 %**.
- **Granulometría**: muestra dominante en arena (≈70 %) y grava (≈27 %), finos ≈3 %.
- **Interpretación práctica:** capa superficial de arenas/gravas sugiere buena capacidad de soporte relativa en estratos no saturados; la presencia de núcleo rocoso a <5 m es favorable para cimentaciones profundas o zapatas que busquen apoyo en roca.

SONDEO 2




UBICACIÓN DEL SONDEO 2



ESTUDIO GEOTÉCNICO PARA CONSTRUCCIÓN DEL PUENTE VEHICULAR LA CANDELARIA, MUNICIPIO DE PIEDECUESTA

PERFIL ESTRATIGRÁFICO

CODIGO	FT-EX-003
FECHA	15/11/2023
VERSIÓN	2
Página 1 de 1	

N° DE PERFORACION	2	N° DE ORDEN DE SERVICIO	027-26	N° DE ORDEN DE TRABAJO	027-26	FECHA INCIO	15/02/2026

PROYECTO	PUENTE VILLAS DEL RIO		
SUPERVISOR	ROBINSON OCHOA	OPERADOR	ARTURO ALVAREZ
EQUIPO DE PERFORACIÓN	ROTOPERCUSIÓN	LUGAR DE PERFORACIÓN	PUENTE VILLAS DEL RIO
CONDICIONES METEREOLÓGICAS	SOLEADO		

COORDENADAS	PLANIMÉTRICAS		GEOGRÁFICAS		COTA	1106
	NORTE	1264337.800	N	6.98541503		
	ESTE	1114165.800	W	73.04436414		
MÉTODO DE PERFORACIÓN	RTP					

EXPLORACIÓN DE CAMPO

N° MUESTRA	PROFUNDIDAD m		TIPO DE EXTRACCIÓN		N° de golpes			V N	NF	¿RECUPERÓ MUESTRA?		LONGITUD DE LA MUESTRA (cm)	DESCRIPCION DE CAMPO (SUELO-ROCA-CAMBIOS DE ESTRATO, TEXTURA, COLOR)
			SPT	ROTACIÓN	6"	12"	18"			SI	NO		
1	0.00		-	✔	-	-	-	-	-	✔	-	-	NUCLEO CONCRETO
		0.20	-	✔	-	-	-	-	-	✔	-		
2	0.20	0.65	✔	-	6	2	38R	38R	-	✔	-	-	SUELO ARENO LIMOSO CONSISTENCIA FIRME COLOR 7,5 YR 5/4
	0.65	0.65	✔	-	-	-	-	-	-	✔	-		
3	0.65		-	✔	-	-	-	-	-	✔	-	-	NUCLEO GRAVAS MATERIAL ALUVIAL ARENOSO
		2.15	-	✔	-	-	-	-	-	✔	-		
	2.15		✔	-	38R	-	-	38R	-	-	✔	-	NUCLEO GRAVAS MATERIAL ALUVIAL ARENOSO
		2.15	✔	-	-	-	-	-	-	-	✔		
4	5.15		-	✔	-	-	-	-	-	✔	-	-	NUCLEO GRAVAS MATERIAL ALUVIAL ARENOSO
		3.65	-	✔	-	-	-	-	-	✔	-		
4	3.65		✔	-	38R	-	-	38R	-	-	✔	-	NUCLEO GRAVAS MATERIAL ALUVIAL ARENOSO
		3.65	✔	-	-	-	-	-	-	-	✔		

PERFIL ESTRATIGRÁFICO

CODIGO	FT-EX-003
FECHA	15/11/2023
VERSIÓN	2
Página 1 de 1	

N° DE PERFORACION	2	N° DE ORDEN DE SERVICIO	027-26	N° DE ORDEN DE TRABAJO	027-26	FECHA INCIO	15/02/2026

PROYECTO	PUENTE VILLAS DEL RIO
SUPERVISOR	ROBINSON OCHOA
EQUIPO DE PERFORACIÓN	ROTOPERCUSIÓN
CONDICIONES METEREOLÓGICAS	SOLEADO

OPERADOR	ARTURO ALVAREZ			
LUGAR DE PERFORACIÓN	PUENTE VILLAS DEL RIO			
COORDENADAS	PLANIMÉTRICAS		GEOGRÁFICAS	
	NORTE	1264337.800	N	6.98541503
	ESTE	1114165.800	W	73.04436414
COTA	1106			
MÉTODO DE PERFORACIÓN	RTP			

EXPLORACIÓN DE CAMPO

N° MUESTRA	PROFUNDIDAD (m)		TIPO DE EXTRACCIÓN		N° de golpes			V N	NF	¿RECUPERÓ MUESTRA?		LONGITUD DE LA MUESTRA (cm)	DESCRIPCION DE CAMPO (SUELO-ROCA-CAMBIOS DE ESTRATO, TEXTURA, COLOR)
			SPT	ROTACIÓN	6"	12"	18"			SI	NO		
5	3.65		-	✓	-	-	-	-	-	✓	-	-	NUCLEO DE ROCA DE ARENISCAS DE MATERIAL ALUVIAL
		5.15	-	✓	-	-	-	-	-	✓	-		
	5.15		✓	-	38R	-	-	38R	-	-	✓	-	NUCLEO DE ROCA DE ARENISCAS DE MATERIAL ALUVIAL
		5.15	✓	-	-	-	-	-	-	-	✓		
6	5.15		-	✓	-	-	-	-	-	✓	-	-	NUCLEO DE ROCA DE ARENISCAS DE MATERIAL ALUVIAL
		6.65	-	✓	-	-	-	-	-	✓	-		
	6.65		✓	-	38R	-	-	38R	-	-	✓	-	NUCLEO DE ROCA DE ARENISCAS DE MATERIAL ALUVIAL
		6.65	✓	-	-	-	-	-	-	-	✓		
7	6.65		-	✓	-	-	-	-	-	✓	-	-	NUCLEO DE ROCA DE ARENISCAS DE MATERIAL ALUVIAL
		8.15	-	✓	-	-	-	-	-	✓	-		
	8.15		✓	-	38R	-	-	38R	-	-	✓	-	NUCLEO DE ROCA DE ARENISCAS DE MATERIAL ALUVIAL
		8.15	✓	-	-	-	-	-	-	-	✓		

PERFIL ESTRATIGRÁFICO

CODIGO	FT-EX-003
FECHA	15/11/2023
VERSIÓN	2
Página 1 de 1	

N° DE PERFORACION	2	N° DE ORDEN DE SERVICIO	027-26	N° DE ORDEN DE TRABAJO	027-26	FECHA INCIO	15/02/2026

PROYECTO	PUENTE VILLAS DEL RIO
SUPERVISOR	ROBINSON OCHOA
OPERADOR	ARTURO ALVAREZ
EQUIPO DE PERFORACIÓN	ROTOPERCUSIÓN
LUGAR DE PERFORACIÓN	PUENTE VILLAS DEL RIO
CONDICIONES METEREOLÓGICAS	SOLEADO

COORDENADAS	PLANIMÉTRICAS		GEOGRÁFICAS		COTA	1106
	NORTE	1264337.800	N	6.98541503		
	ESTE	1114165.800	W	73.04436414		

MÉTODO DE PERFORACIÓN	RTP

EXPLORACIÓN DE CAMPO

N° MUESTRA	PROFUNDIDAD (m)		TIPO DE EXTRACCIÓN		N° de golpes			VN	NF	¿RECUPERÓ MUESTRA?		LONGITUD DE LA MUESTRA (cm)	DESCRIPCION DE CAMPO (SUELO-ROCA-CAMBIOS DE ESTRATO, TEXTURA, COLOR)
			SPT	ROTACIÓN	6"	12"	18"			SI	NO		
8	8.15		-	✔	-	-	-	-	-	✔	-	-	NUCLEO DE ROCA MATERIAL ALUVIAL DEL CAUCE
		9.65	-	✔	-	-	-	-	-	✔	-		
	9.65		✔	-	38R	38R	-	-	-	✔	-	-	NUCLEO DE ROCA MATERIAL ALUVIAL DEL CAUCE
		9.65	✔	-	-	-	-	-	-	✔	-		
9	9.65		-	✔	-	-	-	-	-	✔	-	-	NUCLEO DE ROCA MATERIAL ALUVIAL DEL CAUCE
		11.15	-	✔	-	-	-	-	-	✔	-		
	11.15		✔	-	38R	38R	-	-	-	-	✔	-	NUCLEO DE ROCA MATERIAL ALUVIAL DEL CAUCE
		11.15	✔	-	-	-	-	-	-	-	✔		
10	11.15		-	✔	-	-	-	-	-	✔	-	-	LIMOLITA FRACTURADA COLOR 5 R 4/6
		12.65	-	✔	-	-	-	-	-	✔	-		
	12.65		✔	-	38R	38R	-	-	-	-	✔	-	LIMOLITA FRACTURADA COLOR 5 R 4/6
		12.65	✔	-	-	-	-	-	-	-	✔		

HSC HIDROSUELOS DE COLOMBIA	PERFIL ESTRATIGRÁFICO	CODIGO	FT-EX-003
		FECHA	15/11/2023
		VERSIÓN	2
		Página 1 de 1	

N° DE PERFORACION	2	N° DE ORDEN DE SERVICIO	027-26	N° DE ORDEN DE TRABAJO	027-26	FECHA INCIO	15/02/2026

PROYECTO	PUENTE VILLAS DEL RIO

SUPERVISOR	ROBINSON OCHOA	OPERADOR	ARTURO ALVAREZ
EQUIPO DE PERFORACIÓN	ROTOPERCUSIÓN	LUGAR DE PERFORACIÓN	PUENTE VILLAS DEL RIO
CONDICIONES METEREOLÓGICAS	SOLEADO		

COORDENADAS	PLANIMÉTRICAS		GEOGRÁFICAS		COTA	1106
	NORTE	1264337.800	N	6.98541503		
	ESTE	1114165.800	W	73.04436414		

MÉTODO DE PERFORACIÓN	RTP

EXPLORACIÓN DE CAMPO

N° MUESTRA	PROFUNDIDAD (m)		TIPO DE EXTRACCIÓN		N° de golpes			V N	NF	¿RECUPERÓ MUESTRA?		LONGITUD DE LA MUESTRA (cm)	DESCRIPCION DE CAMPO (SUELO-ROCA-CAMBIOS DE ESTRATO, TEXTURA, COLOR)
			SPT	ROTACIÓN	6"	12"	18"			SI	NO		
11	12.65		-	✓	-	-	-	-	-	✓	-	-	-
		14.15	-	✓	-	-	-	-	-	✓	-		
	14.15		✓	-	6	2	38R	-	-	✓	-	-	-
		14.15	✓	-	-	-	-	-	-	✓	-		
12	14.15		-	✓	-	-	-	-	-	✓	-	-	-
		15.65	-	✓	-	-	-	-	-	✓	-		

Resumen del Sondeo 2 (Sondeo 02)

Ubicación y profundidad

- Coordenadas: N 1264337,800 / E 1114165,800; **cota ≈ 1106 m**.
- Perforación iniciada el **15/02/2026**; sondeo documentado hasta **>15 m** (muestreos y núcleos hasta 15,65 m).

Estratigrafía y descripción de campo

- Capas superiores (0–~3 m): **suelos arenosos limosos** y material aluvial con gravas; núcleos de concreto en superficie inmediata del puente.

- Entre ~3–9 m aparecen **materiales aluviales y núcleos de roca (areniscas)**; a profundidades mayores (≈11–15 m) se registran **limolitas fracturadas** y niveles de roca más competentes.
- En varios tramos se registraron recuperaciones de núcleo y golpes SPT con intervalos donde aparece “38R” (indicando encuentro con material muy denso o roca).

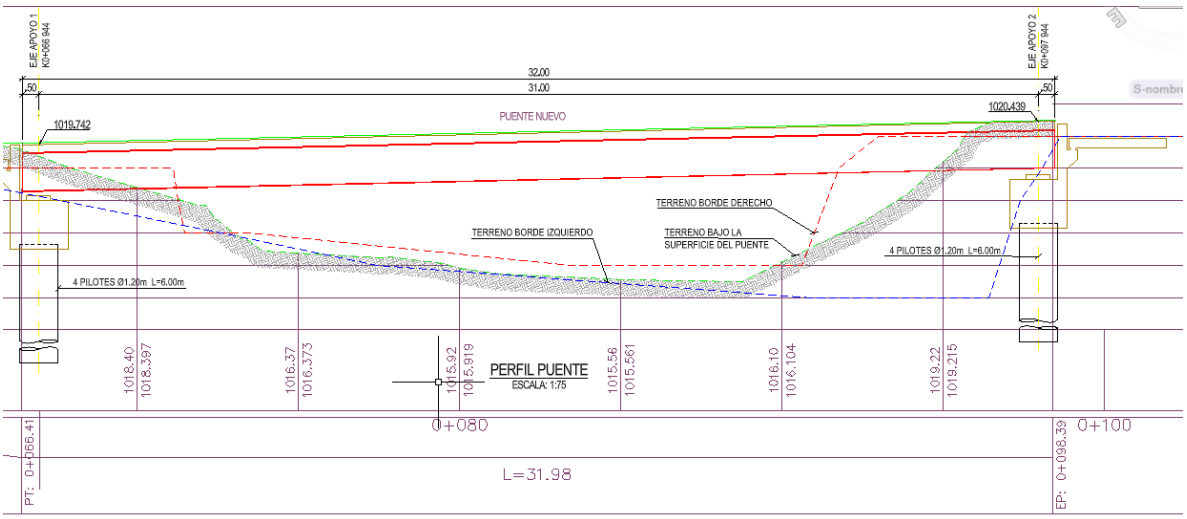
Ensayos de laboratorio asociados (muestras S-2)

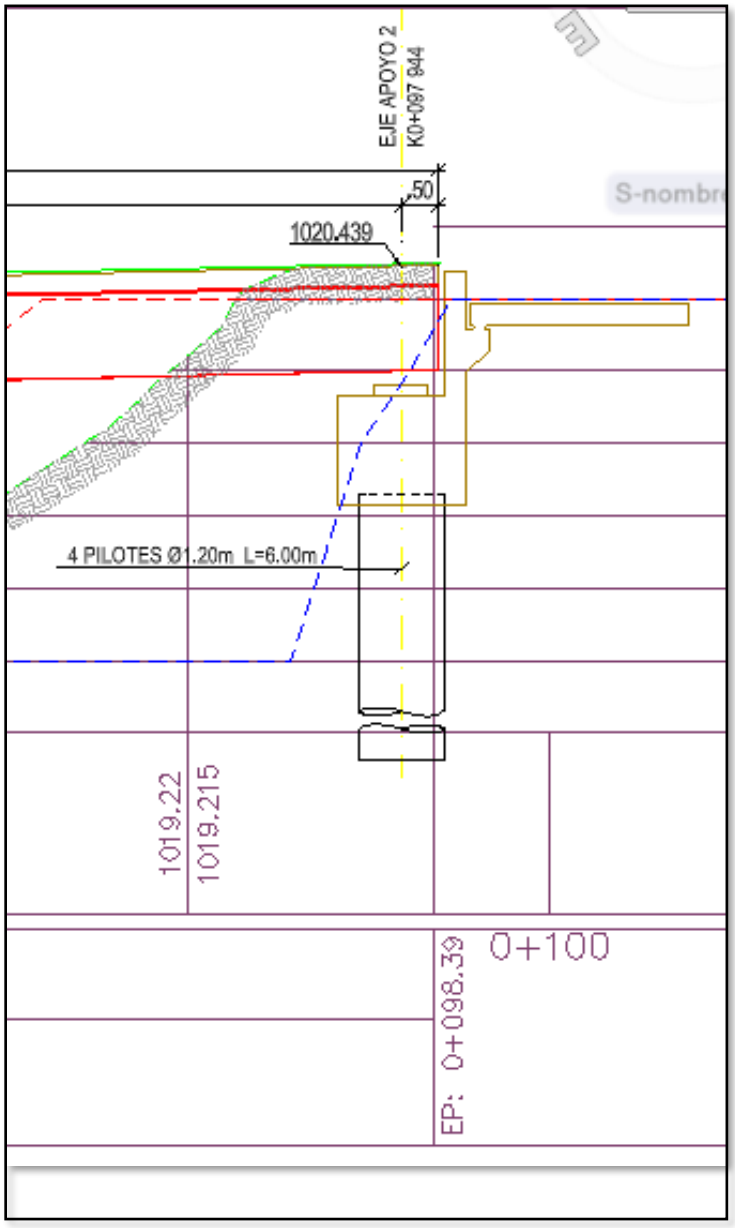
- **Humedad**: ejemplo de muestra entre 0,90–1,80 m reporta **5,99 %**.
- **Granulometría**: muestras muestran mayor proporción de arena y grava; finos variables (ej.: 24–25 % en algunas muestras más finas).
- **Densidades / pesos unitarios**: ensayos ASTM D7263 en muestras de S-2 arrojan **peso unitario seco ≈ 24–24.5 kN/m^3** en algunos estratos.

Interpretación:

- Sondeo 2 muestra una columna más profunda con alternancia arena-grava / niveles de roca y lentes de limolita; **roca competente aparece a profundidades variables (≈>9–12 m)**, lo que puede permitir pilotes cortos o zapatas profundas según cargas.
- La variabilidad estratigráfica y la presencia de limolitas fracturadas requieren verificación para asentamientos y para el diseño sísmico.

7.1 RECOMENDACIONES PARA EL DISEÑO DE LA CIMENTACIÓN DEL PUENTE





Para el diseño de la cimentación, se recomienda emplear pilotes o zapatas profundas que alcancen el estrato rocoso identificado por debajo de los 9 metros cimentados en el estrato rocoso comprendido entre la **cota -4 MTS** (DEFINIR CON TOPOGRAFIA), con el fin de garantizar la estabilidad y capacidad portante adecuada para las estructuras proyectadas.

Actualmente el cauce presenta una cantidad de sedimentos alta, producto del represamiento que actualmente se ejerce por el puente existente. Estos sedimentos deben ser removidos en su totalidad para lograr bajar el nivel del cauce y que los estribos se cimienten en un estrato más competente.

A continuación, se presenta un esquema del proyecto con el resumen de los estratos que se encontraron en las perforaciones mecánicas ubicadas en la sección transversal del eje del diseño geométrico

CAPACIDAD DE SOPORTE DEL SISTEMA CAISSONS - ESTRIBOS.

Se propone para la cimentación la construcción de Caissons como apoyo a los estribos de 1.2 mts de diámetro y a 6 mts de profundidad para poderlos realizar manualmente. Esto garantiza que los esfuerzos aplicados en los estribos sean trasmitidos directamente al estrato rocoso.

El cálculo de la capacidad de soporte para un caisson de 1.2 m de diámetro y 5 m de longitud, cimentado sobre un estrato rocoso con RQD bajo y resistencia a la compresión de 400 kg/cm^2, puede realizarse considerando principalmente la capacidad última por punta (base) y el aporte por fricción lateral suele ser menor en rocas alteradas o fracturadas. Se utiliza la siguiente expresión para la capacidad de soporte por punta:

- Capacidad por punta: $Q_p = q_u \times A_b$, donde q_u es la resistencia última de la roca (400 kg/cm^2) y A_b es el área de la base del caisson.
- $A_b = \pi \times (D/2)^2 = \pi \times (1.2/2)^2 \approx 1.13$ m^2.
- $q_u = 40$ kg/cm^2 = 400 t/m^2.
- $Q_p = 400$ t/m^2 × 1.13 m^2 ≈ 452 t.
- Reducción por RQD bajo: Dado que el RQD es bajo, se recomienda aplicar un factor de seguridad mayor (FS ≥ 3) y considerar una reducción de la resistencia a la compresión (por ejemplo, tomar el 50-70% del valor reportado).
- $Q_{adm} = (q_u \times A_b) / FS$.
- Si se toma el 60% de la resistencia: $q_{u,red} = 240$ t/m^2.
- $Q_{adm} = (240$ t/m^2 × 1.13 m$^2) / 3 \approx 90.4$ t.
- La capacidad de soporte admisible del caisson, considerando un estrato rocoso de baja calidad (RQD bajo) y resistencia a la compresión de 400 kg/cm^2, es aproximadamente 90 t. Se debe verificar en campo la continuidad y calidad del estrato rocoso cuando se realice la excavación.
- El análisis anterior es preliminar y se debe corroborar con los diseños estructurales finales.
- No se esperan asentamientos diferenciales. Los asentamientos inmediatos se deben verificar con las cargas de diseño estructural.

7.2 CÁLCULO DE LA CAPACIDAD DE SOPORTE SEGÚN CCP-14

Para un caisson de 1.2 m de diámetro y 5 m de longitud, cimentado sobre un estrato rocoso de baja calidad (RQD bajo) y resistencia a la compresión de 40 kg/cm^2 (400 t/m^2), el procedimiento recomendado por el código CCP-14 consiste en calcular la capacidad última y luego aplicar los factores de reducción y seguridad.

- Área de apoyo (A_b): $A_b = \pi \times (D/2)^2 = \pi \times (1.2/2)^2 \approx 1.13$ m^2.

- Resistencia reducida por RQD bajo: De acuerdo con las recomendaciones para RQD bajo, se toma entre el 50% y 70% de la resistencia reportada. Usando el 60%: $q_{u,red} = 0.60 \times 400\ t/m^2 = 240\ t/m^2$.
- Capacidad última (Q_p): $Q_p = q_{u,red} \times A_b = 240\ t/m^2 \times 1.13\ m^2 \approx 271$ t.
- Factor de seguridad: El CCP-14 recomienda un FS ≥ 3 para cimentaciones sobre roca de baja calidad. Por tanto, $Q_{adm} = Q_p / FS = 271\ t / 3 \approx 90.4$ t.
- Conclusión: La capacidad de soporte admisible para el caisson, según el CCP-14 y bajo las condiciones descritas, es aproximadamente 90 t. Este valor debe confirmarse en campo verificando la continuidad y calidad del estrato rocoso durante la excavación y con los resultados de los ensayos geotécnicos finales.

7.3 ESTADO LÍMITE DE SERVICIO, ESTADO LÍMITE DE RESISTENCIA ULTIMA Y ESTADO LÍMITE DE EVENTO EXTREMO

CHEQUEOS

El sistema de cuatro pilotes preexcavados de 1,20 m de diámetro y 6,0 m de longitud cumple las verificaciones registradas. La condición gobernante es la capacidad axial: 150,80 ton admisibles frente a 150,00 ton aplicadas, equivalente a 99,47% de utilización. La capacidad del grupo también queda al 99,47%, mientras asentamientos y esfuerzos utilizan 51,24% y 36,13% de sus límites. La aprobación queda condicionada a validar en obra los parámetros geotécnicos y la integridad/capacidad de los pilotes.

INDICADORES DE VERIFICACIÓN

N°	Verificación	Resultado	Límite / criterio	Índice	Margen	Estado	Fuente
1	Capacidad axial individual	150,80	150,00	99,47%	0,80	✓ CUMPLE	CCP-14 §10.5.3
2	Capacidad lateral	123,31	50855,04	0,24%	50731,73	✓ CUMPLE	CCP-14 §10.7
3	Asentamiento total	0,109	0,213	51,24%	0,104	✓ CUMPLE	CCP-14 §10.6
4	Esfuerzo combinado	3,41	9,45	36,13%	6,04	✓ CUMPLE	CCP-14 §10.8
5	Separación S/D	2,78	2,50	111,11%	0,28	✓ CUMPLE	CCP-14 §10.5.4
6	Capacidad del grupo	603,19	600,00	99,47%	3,19	✓ CUMPLE	CCP-14 §10.5.4
7	Ductilidad Le/D	5,00	3,00	166,67%	2,00	✓ CUMPLE	CCP-14 §10.5.5
8	Desplazamiento sísmico	0,0000	0,0600	0,00%	0,0600	✓ CUMPLE	CCP-14 §10.5.5

NOTAS:

1. Capacidad axial gobernante: el margen individual es de solo 0,80 ton (0,53% sobre la demanda); cualquier reducción de resistencia o incremento de carga puede agotar la reserva.

2. El grupo de cuatro pilotes dispone de 603,19 ton frente a 600,00 ton, con margen de 3,19 ton; hereda la misma sensibilidad de la capacidad individual.

3. Asentamiento total estimado: 0,109 m frente a 0,213 m admisibles. El margen de servicio es 0,104 m y la utilización es 51,24%.

4. El esfuerzo combinado alcanza 3,41 MPa frente a 9,45 MPa admisibles. La respuesta estructural conserva un margen de 6,04 MPa.

RECOMENDACIONES PRIORITARIAS

1. Confirmar RQD, qu, estratigrafía y nivel de empotramiento mediante registro de perforación antes de aceptar la capacidad de diseño.

2. Ejecutar al menos una prueba de carga y pruebas de integridad (PIT/PDA/CAPWAP, según disponibilidad y plan de calidad).

3. Controlar que la carga de servicio por pilote no supere 150 ton sin recalcular la capacidad y el grupo.

4. Revisar en detalle las unidades y supuestos del método lateral, dado que el índice calculado presenta una reserva excepcionalmente alta.

Estado límite de servicio (ELS): En el caso del caisson de 1.2 m de diámetro y 5 m de longitud, el estado límite de servicio se refiere a que los asentamientos y deformaciones bajo las cargas de operación normales no deben afectar la funcionalidad ni la estabilidad de la estructura.

Considerando la cimentación sobre roca de baja calidad, pero con capacidad admisible de 90 t, se espera que los asentamientos inmediatos sean mínimos, aunque deben verificarse con los resultados de los ensayos geotécnicos y las cargas reales de diseño para asegurar que no se excedan los límites de servicio establecidos en el proyecto.

Estado límite de resistencia última (ELU): El estado límite de resistencia última corresponde a la carga máxima que puede soportar el caisson antes de fallar por ruptura o pérdida de capacidad estructural. Según el cálculo realizado, la capacidad última (Q_p) es de aproximadamente 271 t. Se utiliza un factor de seguridad de 3, recomendado por el CCP-14, para obtener la capacidad admisible, lo que garantiza que el caisson no alcance la falla estructural bajo condiciones normales y extraordinarias de carga.

Estado límite de evento extremo (ELEE): Este estado contempla situaciones excepcionales como sismos severos, crecientes extremas o eventos hidráulicos que pueden comprometer temporalmente la estabilidad de la cimentación. Para el caisson sobre roca de baja calidad, se considera que el potencial de licuación es bajo, pero podrían existir zonas localmente susceptibles si hay fracturación intensa o transición con materiales sueltos. Por ello, es fundamental confirmar en campo la continuidad y calidad del estrato rocoso y aplicar medidas constructivas que minimicen riesgos ante eventos extremos, como refuerzos adicionales o monitoreo durante la ejecución.

7.4 MANEJO DEL NIVEL FREÁTICO

Se espera un nivel freático en condición variable según el nivel de creciente del rio, ya que se va a trabajar en un nivel inferior del cauce actual, ya sea en la construcción de los pilotes o caissons y en la construcción de los estribos del puente, se deben proveer procesos constructivos que tengan en cuenta esta condición. A continuación, se dan algunas recomendaciones que se deben tener en cuenta en la etapa de diseño del proceso constructivo posterior ejecución de la obra.

Es indispensable delimitar y señalizar claramente la zona de trabajo antes de iniciar cualquier actividad en el lecho del río, garantizando la seguridad del personal y la maquinaria. Se recomienda realizar los trabajos principales durante la época seca o de menor caudal, minimizando riesgos asociados a crecidas súbitas y facilitando el control de agua.

- Se debe implementar un sistema de bombeo o desvío provisional del cauce para mantener seca el área de excavación, utilizando cortinas impermeables, ataguías o tablestacas según las condiciones locales. Es fundamental que estos sistemas sean revisados constantemente para prevenir filtraciones o inundaciones inesperadas.

- Durante la excavación y construcción de la cimentación, se debe controlar la erosión y el arrastre de sedimentos mediante barreras, geotextiles o zanjas de retención, reduciendo el impacto ambiental aguas abajo. Todo material excavado debe manejarse y disponerse de manera adecuada para evitar la contaminación del cauce.

- Si bien el estrato de apoyo principal para la cimentación corresponde a un lecho rocoso de baja calidad (RQD bajo), el potencial de licuación en este tipo de material es generalmente bajo, ya que la roca intacta rara vez experimenta pérdida de resistencia por incremento de presión de poros. Sin embargo, en zonas donde el estrato rocoso presenta fracturación intensa, alteración o zonas de transición con gravas mal cementadas, puede existir susceptibilidad local a fenómenos de licuación, especialmente bajo eventos sísmicos severos, situación que será controlada con la construcción de los caissons.