

UNA REVISIÓN SOBRE LAS CAUSAS DEL DESLIZAMIENTO DEL KM. 58 DE JUNIO 13
DE 2019, MUNICIPIO DE GUAYABETAL, CUNDINAMARCA, CARRETERA BOGOTÁ -
VILLAVICENCIO.



JONATHAN ANDRES DUEÑAS SUCUNCHOQUE



UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
VILLAVICENCIO

2025

UNA REVISIÓN SOBRE LAS CAUSAS DEL DESLIZAMIENTO DEL KM. 58 DE JUNIO 13
DE 2019, MUNICIPIO DE GUAYABETAL, CUNDINAMARCA, CARRETERA BOGOTÁ -
VILLAVICENCIO.

JONATHAN ANDRES DUEÑAS SUCUNCHOQUE

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de Ingeniero civil

Aprobado por:

Ing. Mg. GERMAN ERNESTO CHICANGANA MONTON

Magister en Ciencias Geología

Tutor Universidad

Co-Director:

Ing. Mg. JUAN MANUEL SALGADO DIAZ

Magister en Ingeniería

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
VILLAVICENCIO

2025

Autoridades Académicas

P. Álvaro José ARANGO RESTREPO O.P.

Rector General

P. Mauricio Antonio CORTÉS GALLEGU, O.P.

Vicerrector Académico General

P. José Antonio BALAGUERA CEPEDA, O.P.

Rector Seccional Villavicencio

P. Adrián Mauricio GARCÍA PEÑARANDA, O.P.

Vicerrector Académico Seccional Villavicencio

Mg Julieth Andrea SIERRA TOBON

Secretaria General Seccional Villavicencio

Mg Luis Fernando DIAZ CRUZ

Decano Facultad de Ingeniería civil

Agradecimientos

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento al Ingeniero German Ernesto Chicangana Monton, por su ayuda continua, su orientación y la guía brindada durante todo el desarrollo de este proyecto. A mi mamá, por su apoyo incondicional, su paciencia, comprensión. Asimismo, agradezco a todas las personas que, de una u otra forma, me brindaron su apoyo, ánimo y confianza para alcanzar este objetivo.

Contenido

	Pág.
Resumen	11
Abstract.....	12
Glosario.....	13
Introducción.....	16
1. Planteamiento del problema	17
1.1. Descripción del problema.....	17
2. Objetivos	20
2.1. Objetivo general	20
2.2. Objetivos específicos.....	20
3. Justificación.....	21
4. Metodología.....	22
5. Marco teórico	23
5.1. Fenómenos de remoción en masa.....	23
5.2. Clasificación de deslizamiento.....	23
5.2.1 La geotecnia en el talud	23
5.3. Deslizamiento por Falla	25
5.4. Excavación de túneles en terrenos inestables.....	25
5.5. Precipitación.....	26
5.6. Humedad superficial	27
5.7. Filtración	27
5.8. Movimiento en masa	28
5.8.1 Caídas.....	28
5.8.2 Inclinación o volteo.....	29
5.8.3 Reptación	30
5.8.4 Deslizamientos	31
5.8.5 Deslizamiento rotacional	32
5.8.6 Deslizamiento planar	32
5.8.7 Esparcimiento lateral	33

5.8.8	Flujo	34
5.8.9	Avalanchas	35
5.9.	Escorrentía.....	36
5.10.	Humedad.....	36
6.	Marco legal.....	37
6.1.	Normativa colombiana y planificación territorial	37
6.2.	Directrices para la formulación de planes de gestión del riesgo de desastres: decreto 2157 de 2017	38
6.3.	Decreto 1807 de 2014 – Determinación de amenazas por movimientos en masa	38
6.4.	Decreto 1478 de 2022: actualización del plan nacional de Gestión del riesgo	38
7.	Estado del arte	40
8.	Geología y geomorfología.....	47
8.1.	Filitas y cuarcitas de guayabetal (PEqgu)	48
8.2.	Depósitos cuaternarios (Qt, Qfg, Qd y Qal).....	49
8.3.	Falla Rio negro	50
8.4.	Falla Jabonera.....	51
8.5.	Antecedentes Geológicos	52
8.6.	Antecedente de la terraza Quebrada Blanca.....	53
8.7.	Erosión en la terraza Mesa Grande	53
8.8.	Geología del sector y características del terreno.....	54
8.9.	Geomorfología	57
8.9.1	Ambiente denudacional	58
9.	Clima	60
9.1.	Inestabilidad progresiva de la Terraza Mesa Grande por escorrentía	60
9.2.	Red hidrográfica y drenaje	61
9.3.	Precipitación.....	62
10.	Resultados	67
10.1.	Línea de tiempo	67
10.1.1	1950-2007	67
10.1.2	28 junio 1974	68
10.1.3	2013.....	68

10.1.4	2016.....	69
10.1.5	2017.....	71
10.1.6	2018.....	72
10.1.7	2019.....	75
10.2.	Evolución de los Problemas de Inestabilidad en 2018 y 2019	80
10.3.	Intervención del Grupo Consultor (GCC)	81
10.4.	Comportamiento Hidrogeológico Post-Deslizamientos (2019)	83
10.5.	Modificación de la Recarga por Intervención Antrópica	85
10.6.	Erosión y cárcavamiento en las terrazas de Mesa Grande y Quebrada Blanca	85
11.	Análisis de resultados	87
11.1.	Excavación de túneles en terrenos inestables	87
11.2.	Efectos de la deforestación sobre la estabilidad del terreno	87
11.3.	Condiciones climáticas y precipitación en la región	88
11.4.	Intervención humana e infraestructura vial	88
11.5.	Gestión del riesgo y medidas de mitigación	89
12.	Conclusiones	90
13.	Recomendaciones	92
13.1.	Fortalecimiento del monitoreo geotécnico e hidrometeorológico	92
13.2.	Optimización y mantenimiento de los sistemas de drenaje	92
13.3.	Ampliación y actualización de los planes de gestión en otros puntos críticos.	92
13.4.	Control y manejo de aguas superficiales	93
13.5.	Mantenimiento y revisión post-intervención	93
13.6.	Recomendación para el desarrollo de estudios previos a futuras construcciones	93
14.	Referencias bibliográficas.....	94

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Metodología para la realización de la monografía.....	22
Tabla 2. Tipos de movimientos en masa.....	36
Tabla 3. Geología del sector Guayabetal	52
Tabla 4. Precipitación mensual (mm) Estación Monterredondo.....	63
Tabla 5. Precipitación mensual (mm) Estación Bunker 1 – Bunker Tablon.....	64
Tabla 6. Precipitación mensual (mm) Estación Susumuco.....	64
Tabla 7. Precipitación mensual (mm) Estación Galería T3A – Oro Perdido.....	65
Tabla 8. Precipitación mensual (mm) Estación Zona servicio- Puente Quetame.....	65
Tabla 9. Precipitación mensual (mm) Estación Quebrada Blanca.....	65
Tabla 10. Precipitación mensual (mm) Estación Chirajara.....	66

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Derrumbe kilómetro 58, vía Bogotá Villavicencio, Municipio de Guayabetal.....	17
Figura 2. Derrumbe Kilómetro 58, Municipio de Guayabetal.....	18
Figura 3. Foto Aérea derrumbe Kilómetro 58, Municipio de Guayabetal.....	18
Figura 4. Movimiento de un Talud.	24
Figura 5. Red pluviométrica de Colombia.....	26
Figura 6. Caída de bloques de roca por el efecto de la gravedad	29
Figura 7. Volteo de materiales	30
Figura 8. Inclinación de la falla	30
Figura 9. Proceso de Reptación	31
Figura 10. Movimiento de suelos blandos	31
Figura 11. Deslizamiento rotacional.....	32
Figura 12. Deslizamiento Planar.....	33
Figura 13. Deslizamiento planar en macizo rocoso.....	33
Figura 14. Esquema de un esparcimiento lateral	34
Figura 15. Velocidades de los flujos de agua	34
Figura 16. Avalancha.....	35
Figura 17. Geología del Km 58, el cual se ubica en la margen izquierda del rio Negro	50
Figura 18. Procesos de remoción en masa y caída de detritos a la vía existente desde la ladera suroccidental de Mesa Grande. Izquierda.....	55
Figura 19. Proceso de remoción en masa generado en mayo de 2019 en la ladera suroccidental de Mesa Grande K58.	55
Figura 20. Vista general de los procesos de remoción en masa en la ladera suroccidental de Mesa Grande K58	56
Figura 21. Unidades geomorfológicas presentes en la zona del km 58 y alrededores	58
Figura 22. Localización de las estaciones hidroclimáticas Monterredondo y Susumuco	63
Figura 23. Fotografías aéreas del sector km 58	67
Figura 24. Deslizamiento de quebrada blanca	68
Figura 25. Laderas de la meseta en buenas condiciones.....	69

Figura 26. Evidencias iniciales de erosión en laderas de la meseta.....	69
Figura 27. Proceso erosivo superficie de la parte alta del talud por agua de escorrentía y a media ladera por afloramiento de agua de infiltración	70
Figura 28. Erosion a media ladera	70
Figura 29. Flujo de detritos que afecta la vía.....	70
Figura 30. Aparición de grietas importantes arriba del Portal 26.....	71
Figura 31. Deslizamiento portal 26 y 27.....	71
Figura 32. Erosión y deslizamiento en los taludes de Quebrada Seca.....	72
Figura 33. los procesos erosivos iniciados en periodos previos se intensificaron, provocando deslizamientos en la vía y derivando en eventos de remoción en masa	72
Figura 34. Proceso de remoción en masa que involucra todos los taludes perimetrales de Mesa Grande, impactando tanto la vía existente como la nueva calzada.	73
Figura 35. Remoción en masa que genera afectaciones sobre la nueva calzada.	73
Figura 36. portal 26 y 27.....	74
Figura 37. Desplazamiento hastial derecho	74
Figura 38. Grietas diagonales con filtración de agua.....	75
Figura 39. Hastial izquierdo.....	75
Figura 40. Hastial Derecho	76
Figura 41. Agrietamiento portal 26.....	76
Figura 42. Panorámica mayo 2019	77
Figura 43. Derrumbe y taponamiento de la vía	78
Figura 44. Panorámica junio 08 del 2019	78
Figura 45. Desprendiendo de material 11 de junio 2019.....	79
Figura 46. Nuevo deslizamiento K58, 13 de junio	79
Figura 47. Colapso del puente Quebrada seca.....	80
Figura 48. Localización del sector Q. Blanca a Q. Seca.....	81
Figura 49. Panorámica del sector K58.....	82
Figura 50. Grietas principales mapeadas desde septiembre de 2018-2019 (Planta).....	83
Figura 51. Afloramientos de agua en la ladera	84
Figura 52. Perforación	85

Resumen

El 13 de junio de 2019 se presentó un deslizamiento en el kilómetro 58 de la carretera Bogotá–Villavicencio, en el municipio de Guayabetal (Cundinamarca), causando graves afectaciones a la infraestructura vial y al tránsito entre estas dos ciudades. Este hecho tuvo consecuencias económicas importantes y evidenció la vulnerabilidad de la zona ante eventos de remoción en masa. La presente monografía tiene como objetivo realizar una revisión de los factores que pudieron haber originado este deslizamiento, teniendo en cuenta elementos geológicos, climáticos y estructurales, como la excavación del Túnel 13 y la presencia de suelos inestables en la zona. Para el desarrollo del trabajo se utilizó una metodología cualitativa basada en la revisión de documentos técnicos, noticias e informes de entidades como la Agencia Nacional de Infraestructura (ANI) y empresas encargadas del mantenimiento de la vía. A partir de esta información, se identificaron las principales causas del evento, se revisaron antecedentes en el sector y se plantearon algunas recomendaciones para evitar que este tipo de situaciones se repitan, especialmente entre los kilómetros 57 y 59. Con este trabajo se espera aportar al análisis del riesgo geotécnico en esta región y proponer posibles soluciones de mitigación.

Palabras Clave: deslizamiento, Guayabetal, kilómetro 58, vía Bogotá–Villavicencio, Túnel 13.

Abstract

On June 13, 2019, a landslide occurred at kilometer 58 of the Bogotá–Villavicencio highway, in the municipality of Guayabetal (Cundinamarca), causing serious damage to the road infrastructure and disrupting traffic between the two cities. This event had significant economic consequences and highlighted the vulnerability of the area to mass movement events. The purpose of this monograph is to analyze the possible causes of the landslide, considering geological, climatic, and structural factors, such as the excavation of Tunnel 13 and the presence of unstable soils in the region.

A qualitative methodology was used for the development of this research, based on the review of technical documents, news articles, and reports from entities such as the National Infrastructure Agency (ANI) and road concessionaires. From this information, the main causes of the event were identified, historical landslides in the area were reviewed, and recommendations were proposed to prevent similar situations, particularly between kilometers 57 and 59. This study aims to contribute to the analysis of geotechnical risk in the region and suggest possible mitigation strategies.

Key Word- landslide, Guayabetal, kilometer 58, Bogotá–Villavicencio highway, Tunnel 13.

Glosario

- **Afloramiento:** Exposición natural de una formación rocosa o estrato en la superficie terrestre, observable sin necesidad de excavación.
- **Aluvión:** Sedimento transportado y depositado por ríos o quebradas. Suelen formar planicies y terrazas bajas.
- **ANI (Agencia Nacional de Infraestructura):** Entidad del gobierno colombiano encargada de estructurar, contratar, ejecutar y supervisar proyectos de infraestructura de transporte, como carreteras, puertos, aeropuertos y ferrocarriles.
- **Arcilla:** Suelo compuesto por partículas muy finas ($<0,002$ mm), con alta plasticidad y capacidad de retención de agua. En estado saturado, puede perder resistencia estructural.
- **Carcavamiento:** Erosión acelerada que forma surcos o zanjas profundas en suelos expuestos, común en zonas deforestadas o con mala escorrentía.
- **Coluvión:** Depósito de sedimentos transportados por gravedad, generalmente compuesto por fragmentos de roca y suelo acumulados en la base de laderas.
- **Cono aluvial:** Formación de sedimentos en forma de abanico que se genera por la deposición de materiales transportados por agua en zonas de pendiente abrupta.
- **Cordillera Oriental:** Sistema montañoso de los Andes colombianos donde se ubica el kilómetro 58. Presenta alta complejidad geológica y condiciones propensas a fenómenos de remoción en masa.
- **Cuarcita:** Roca metamórfica compuesta casi exclusivamente por cuarzo. Es dura, resistente y poco permeable. Asociada a la Formación Guayabetal.
- **Deslizamiento:** Movimiento descendente de una masa de tierra o roca por una ladera, generalmente provocado por la saturación del suelo, fallas geológicas o intervenciones humanas.
- **Escarpe de falla:** Escalón o pendiente abrupta que se forma en la superficie terrestre como resultado del desplazamiento vertical a lo largo de una falla.
- **Escorrentía:** Flujo superficial de agua sobre el terreno, usualmente generado por lluvias intensas. Puede contribuir a la erosión y al debilitamiento de taludes.
- **Esparcimiento lateral:** Deformación horizontal del terreno inducida por licuación o pérdida de resistencia en suelos blandos, generando fracturas de tracción y flujo lateral.

- **Estabilidad de taludes:** Condición de equilibrio en una pendiente natural o artificial. Cuando se pierde esta estabilidad, se pueden generar deslizamientos o colapsos.
- **Filita:** Roca metamórfica de grano fino derivada de lutitas o limolitas, caracterizada por brillo sedoso y foliación marcada. Común en el Grupo Quetame.
- **Filita clorítica:** Variedad de filita con contenido elevado de clorita, que le da tonalidades verdes y propiedades de baja resistencia al corte.
- **Geoforma:** Rasgo o unidad del relieve terrestre que resulta de la acción de procesos geológicos, climáticos o antrópicos.
- **Gestión del riesgo:** Conjunto de políticas, estrategias y acciones orientadas a la identificación, análisis, reducción y monitoreo de riesgos naturales o antrópicos.
- **Hidrogeología:** Rama de la geología que estudia la distribución y movimiento del agua subterránea en el suelo y las rocas.
- **Infiltración:** Proceso mediante el cual el agua de lluvia penetra en el suelo. Un exceso de infiltración puede saturar los materiales y favorecer deslizamientos.
- **Licuación:** Fenómeno por el cual un suelo saturado pierde su resistencia y rigidez como consecuencia de un aumento rápido en la presión de poros, generalmente durante un sismo.
- **Limo:** Partículas de suelo de tamaño intermedio entre la arena y la arcilla; puede retener agua y presentar comportamiento plástico bajo saturación.
- **Lutita:** Tipo de roca sedimentaria compuesta por partículas finas. Su presencia en laderas puede favorecer la inestabilidad debido a su baja resistencia y alta plasticidad.
- **Matriz del suelo:** Componente fino del suelo (arena, limo, arcilla) que rodea y une a los fragmentos más grandes (cantos, bloques).
- **Pendiente:** Inclinação de un terreno expresada en grados o porcentaje; es un factor crítico en la estabilidad de laderas.
- **Presión de poros:** Presión ejercida por el agua contenida en los poros del suelo; su incremento puede reducir la resistencia al corte del terreno.
- **Remoción en masa:** Fenómeno geodinámico que incluye todos los tipos de movimientos del terreno, como deslizamientos, flujos, caídas y avalanchas de rocas o suelos.

- **Saturación del suelo:** Condición en la que los poros del terreno están completamente llenos de agua, reduciendo la resistencia al corte y aumentando la probabilidad de deslizamientos.
- **Terraza fluviotorrencial:** Depósito de origen cuaternario formado por flujos de agua torrenciales, compuesto por gravas, cantos y bloques embebidos en matriz limo-arenosa.
- **Terreno fluviotorrencial:** Depósito sedimentario formado por acción combinada de ríos y flujos torrenciales; se compone de materiales heterogéneos y poco consolidados
- **Topografía:** Conjunto de características del relieve de una superficie terrestre, como altitud, inclinación y forma.
- **Túnel 13:** Infraestructura construida como parte de la doble calzada Bogotá–Villavicencio. Su excavación en materiales poco consolidados ha sido señalada como uno de los factores que contribuyeron al deslizamiento del km 58.
- **Zona de tensión:** Sector superior de un talud donde el terreno tiende a fracturarse o separarse debido a esfuerzos diferenciales internos y a la pérdida de soporte.

Introducción

La carretera Bogotá–Villavicencio es una de las más importantes del país, ya que conecta el centro de Colombia con los Llanos Orientales y facilita el transporte de productos agrícolas, combustibles y bienes de consumo. Esta vía no solo es estratégica para el desarrollo económico regional, sino que también representa un corredor fundamental para el abastecimiento de la capital y el fortalecimiento de las relaciones comerciales entre diferentes regiones del país. Sin embargo, por atravesar una zona montañosa de la Cordillera Oriental, con condiciones geológicas y climáticas complejas, se ha convertido en un punto crítico en cuanto a la ocurrencia de desastres naturales, especialmente deslizamientos y derrumbes.

Uno de los eventos más graves ocurrió el 13 de junio de 2019 en el kilómetro 58, ubicado en el municipio de Guayabetal, Cundinamarca. Ese día, un deslizamiento de grandes proporciones provocó el cierre total de la vía durante varias semanas, generando afectaciones significativas en la movilidad de miles de personas y ocasionando pérdidas económicas considerables tanto a nivel regional como nacional. El colapso de la ladera no solo puso en riesgo la vida de los usuarios, sino que también evidenció la vulnerabilidad del terreno ante fenómenos de remoción en masa. Aunque posteriormente se realizaron intervenciones de emergencia para estabilizar la zona, la continuidad de estos eventos demuestra que no se han comprendido completamente las causas estructurales, naturales y antrópicas que los originan.

Frente a esta problemática, el objetivo principal de esta monografía es analizar los factores que pudieron influir en el deslizamiento del kilómetro 58, tomando como base información geológica, climática y estructural. Para ello, se llevará a cabo una revisión documental que recopile informes técnicos, estudios especializados y reportes institucionales emitidos por entidades como la Agencia Nacional de Infraestructura (ANI), Coviandes, Ingeniería y Georriesgos IGR SAS, el Ministerio de Transporte, medios de comunicación y otras fuentes relevantes. Esta recopilación no solo busca comprender con mayor profundidad qué ocurrió y por qué ocurrió, sino también proponer algunas recomendaciones que contribuyan a la prevención y mitigación de posibles deslizamientos futuros.

1. Planteamiento del problema

1.1. Descripción del problema

En el km 58 de la carretera Bogotá-Villavicencio en el municipio de Guayabetal, se presentó el deslizamiento del 13 de junio del 2019, el cual causó severos daños a la infraestructura vial, a los vehículos que transitaban por la zona y a las propiedades cercanas. El evento provocó el cierre de la vía durante varias semanas, lo que afectó gravemente la movilidad entre Bogotá y Villavicencio, generando pérdidas económicas significativas para la región y el país debido a la interrupción del comercio y el transporte. Los costos derivados de las reparaciones, la pérdida de productos perecederos y los desvíos en la ruta incrementaron considerablemente el impacto financiero.

A pesar de los esfuerzos por restaurar la vía y mitigar el riesgo de futuros deslizamientos, la recurrencia de estos fenómenos evidencia que no se han comprendido del todo las causas que los provocan.

Figura 1. Derrumbe kilómetro 58, vía Bogotá Villavicencio, Municipio de Guayabetal



Nota. Tomado de Periódico El Tiempo, (2019).

El 15 de mayo de 2019 se presentaron dos derrumbes en los kilómetros 58 y 64 dejando a los pobladores del Municipio de Guayabetal incommunicados y convirtiendo a esta zona en la más vulnerable de la vía.

Figura 2. Derrumbe Kilómetro 58, Municipio de Guayabetal



Nota. Tomado de Revista Semana, (2019).

Figura 3. Foto Aérea derrumbe Kilómetro 58, Municipio de Guayabetal



Nota. Tomado de Periódico El Tiempo, (2019).

Por todo esto, en esta monografía se busca determinar cuáles fueron los posibles factores geológicos, climáticos o estructurales que posiblemente contribuyeron al deslizamiento, con el fin de desarrollar estrategias preventivas que minimicen el riesgo de futuros eventos y mitiguen

sus impactos, evitando así daños a la infraestructura y pérdidas económicas similares en el futuro.

2. Objetivos

2.1. Objetivo general

Realizar una revisión sobre las causas del deslizamiento del km. 58 de junio 13 de 2019, municipio de Guayabetal, Cundinamarca, carretera Bogotá -Villavicencio.

2.2. Objetivos específicos

- Verificar los antecedentes de los deslizamientos en la región que corresponde al sector de Mesa Grande y próximos al km. 58.
- Determinar las causas que detonaron el deslizamiento de junio 13 de 2019.
- Indicar unas recomendaciones sobre la estabilidad del talud de la ladera de la Meseta Mesa Grande que corresponde desde el kilómetro 57 al Kilómetro 59.

3. Justificación

El deslizamiento ocurrido el 13 de junio de 2019 en el kilómetro 58 de la carretera Bogotá-Villavicencio, en el municipio de Guayabetal, representa uno de los eventos más significativos en la historia reciente de esta vía, no solo por los daños causados a la infraestructura, sino también por el impacto negativo en la economía regional y nacional. La interrupción de esta importante ruta comercial resultó en pérdidas millonarias y evidenció la vulnerabilidad del corredor vial ante fenómenos naturales recurrentes. A pesar de los esfuerzos por mitigar el riesgo de deslizamientos, la recurrencia de estos eventos sugiere que no se ha alcanzado una comprensión total de las causas subyacentes que los provocan, lo que justifica la necesidad de una revisión más detallada y profunda.

Esta monografía busca aclarar, mediante el análisis de información secundaria suministrada por diversas fuentes, qué fue lo que ocurrió, por qué ocurrió y qué se puede hacer para prevenir futuros deslizamientos en este sector. Para ello, se contará con datos proporcionados por la prensa, concesionarios encargados de la vía, la Agencia Nacional de Infraestructura (ANI), así como otras entidades gubernamentales y técnicas que han estudiado el caso. La revisión permitirá identificar los factores geológicos, climáticos y estructurales que confluyeron en el evento, y desarrollará una comprensión integral de la situación.

El propósito final de este análisis es formular recomendaciones prácticas y efectivas para la prevención de futuros deslizamientos. Estas recomendaciones abordarán medidas a corto, mediano y largo plazo, enfocadas en la estabilidad del terreno, el monitoreo continuo y la implementación de infraestructura que mitigue el impacto de eventos similares en el futuro. Con esta monografía, se espera contribuir al desarrollo de estrategias que minimicen el riesgo de nuevos deslizamientos, garantizando así la seguridad vial y la continuidad del comercio en este importante corredor.

4. Metodología

La presente monografía se basa en un enfoque cualitativo, el cual permite realizar un análisis profundo de las causas que provocaron el deslizamiento del 13 de junio de 2019 en el km 58 de la carretera Bogotá-Villavicencio. La metodología está orientada a la recopilación y análisis de información proveniente de diversas fuentes documentales, medios de comunicación y entidades gubernamentales, con el fin de generar un marco comprensivo sobre los factores geológicos, climáticos y estructurales que contribuyen.

Tabla 1. Metodología para la realización de la monografía

Objetivo	Actividad	Descripción	Actores
Verificar los antecedentes de los deslizamientos en la región que corresponde al sector de Mesa Grande y próximos al km. 58.	Recolección de información de documentos, documentos técnicos, medios de comunicación y agencias.	Revisión y análisis de documentos proporcionados por concesionarios, informes de la prensa, estudios técnicos de la Agencia Nacional de Infraestructura (ANI) y otras entidades gubernamentales que han investigado el historial de deslizamientos en el sector.	Investigador, concesionarios de la vía, ANI, medios de comunicación, entidades gubernamentales.
Determinar las causas que detonaron el deslizamiento de junio 13 de 2019	Análisis de información suministrada por entidades especializadas y medios	Evaluación de informes técnicos proporcionados por la ANI y concesionarios viales. Revisión de coberturas mediáticas y estudios emitidos por entidades gubernamentales que analizan las condiciones geológicas, climáticas y estructurales que pudieron haber causado el deslizamiento.	Investigador, concesionarios de la vía, ANI, medios de comunicación, entidades gubernamentales.
Indicar unas recomendaciones sobre la estabilidad del talud de la ladera de la Meseta Mesa Grande que corresponde desde el kilómetro 57 al Kilómetro 59.	basadas en estudios y análisis previos. elaborar de un informe donde se incluyan las recomendaciones para futuros proyectos en la ladera de la meseta mesa grande o sectores similares	Redacción de un conjunto de recomendaciones preventiva, basadas en los análisis realizados por entidades especializadas y en la revisión documental.	Investigador, concesionarios de la vía, ANI, medios de comunicación, entidades gubernamentales.

5. Marco teórico

5.1. Fenómenos de remoción en masa

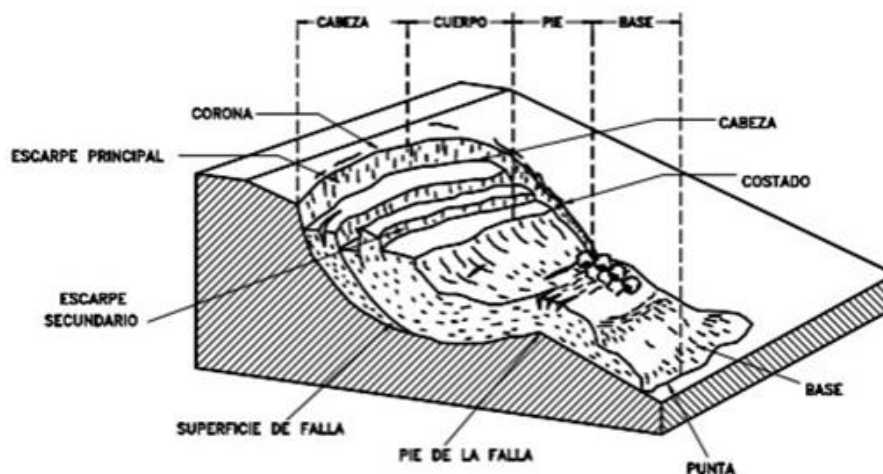
Los fenómenos de remoción en masa son procesos geodinámicos que implican el movimiento descendente de material superficial (suelo o roca) por acción de la gravedad. Dentro de estos procesos se incluyen los deslizamientos, caídas de rocas, flujos de lodo y reptaciones. La inestabilidad de una ladera suele deberse a una combinación de factores: geológicos (tipo de suelo, inclinación del terreno), climáticos (precipitaciones), hidrológicos (presión de poros), biológicos (vegetación) y antrópicos (intervenciones del ser humano).

En el caso específico del kilómetro 58, el tipo de movimiento identificado corresponde a un deslizamiento de ladera, desencadenado por condiciones de inestabilidad acumuladas a lo largo del tiempo, las cuales sobrepasaron la resistencia del terreno y generaron el colapso. Según Díaz y Zapata (2020), estos eventos no son aislados, sino que forman parte de un patrón de riesgo estructural en este corredor vial.

5.2. Clasificación de deslizamiento

5.2.1 *La geotecnia en el talud*

En un Talud se puede observar procesos geotécnicos que se encuentran activos por los diferentes movimientos comprendidos hacia afuera y hacia debajo de roca, estos movimientos ocurren por falla y por movimientos de masa, erosión y flujos. Estos significan que el talud se mueve hacia arriba o abajo, (Suarez Diaz, 1998).

Figura 4. Movimiento de un Talud.

Nota. Tomado de Suarez (1998)

Un talud afectado por movimientos en masa puede analizarse dividiéndolo en varias zonas características, las cuales se definen de la siguiente manera:

- a) Escarpe principal: corresponde al sector más empinado del talud, originado por el desprendimiento y descenso del material inestable.
- b) Escarpe secundario: formación adicional de ruptura que también se genera como consecuencia del desplazamiento del terreno.
- c) Cabeza: porción del material desplazado ubicada en la parte superior de la masa movilizada.
- d) Cima: punto más elevado entre la masa en movimiento y el escarpe principal.
- e) Corona: sector intacto del terreno que permanece sin alteración y que limita con el borde del escarpe principal.
- f) Superficie de falla: plano por el cual se desplaza la masa inestable, localizado bajo la zona movilizada.
- g) Base: corresponde al material presente en la parte inferior del talud, justo por debajo del pie.
- h) Punta: extremo inferior del depósito de material movilizado, ubicado a mayor distancia de la cima.
- i) Costado: hace referencia al perfil lateral del deslizamiento o del corte en el terreno.

- j) Superficie original del terreno: nivel del terreno previo a la ocurrencia del movimiento de masa.

5.3. Deslizamiento por Falla

Los deslizamientos pueden ser inducidas por fallas mecánicas o geológicas. Por lo anterior es importante realizar, el análisis geotécnico, así como un análisis topográfico y morfológico, con estos análisis se clasifican las etapas del movimiento en masa (Leiva Ruiz, 2020):

- a. Etapa de deterioro, el suelo no ha sido afectado de ninguna forma.
- b. Etapa de falla: Es la ocurrencia de una falla y a su vez el movimiento del material.
- c. Etapa post-falla, movimiento de la masa de inicio a fin.
- d. Etapa de posible reactivación, nuevos movimientos de masa.

5.4. Excavación de túneles en terrenos inestables

La construcción de túneles en materiales no consolidados, como depósitos coluviales o rocas fracturadas, puede alterar el equilibrio de las laderas, debido a la reducción del soporte natural del terreno. Esto incrementa las tensiones de tracción y puede disminuir la resistencia de los suelos. En estos casos, se requieren medidas de estabilización como anclajes, pernos, revestimientos y drenajes profundos.

En el caso del Túnel 13, en la vía Bogotá–Villavicencio, gran parte fue construido sobre depósitos de terraza en lugar de roca sólida, lo cual modificó los patrones de esfuerzo y la circulación subterránea del agua, contribuyendo a la desestabilización del terreno y al deslizamiento del km 58 (Ingeniería y Georriesgos IGR SAS, 2019; Sociedad Colombiana de Ingenieros, 2020).

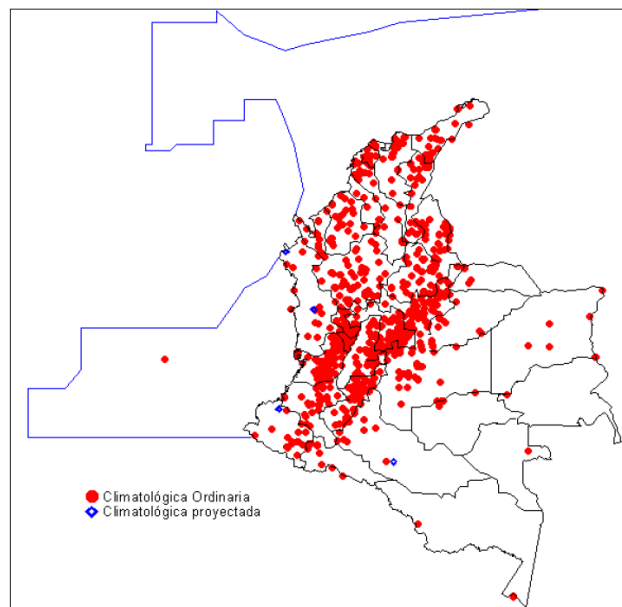
Un buen diseño de drenaje es clave en zonas de alta pluviosidad como Guayabetal, ya que permite mantener la estabilidad del talud y prevenir deslizamientos masivos.

5.5. Precipitación

La precipitación hace referencia al conjunto de partículas que se desprenden de la atmósfera y alcanzan la superficie terrestre, siendo la lluvia una de sus formas más comunes, entendida como el volumen total que se acumula en un punto determinado (Casas, 1977). Este fenómeno ocurre cuando las gotas contenidas en las nubes alcanzan un tamaño crítico por saturación, y debido a la acción de la gravedad, caen hacia el suelo. En el contexto colombiano, uno de los sitios con mayor nivel de pluviosidad es el municipio de Puerto López, ubicado en el departamento de Cundinamarca, donde se registra una precipitación anual cercana a los 12.892 mm (Davies, 2018).

La medición de la precipitación atmosférica se realiza mediante instrumentos como el pluviómetro y el pluviógrafo. Este último es especialmente útil para registrar eventos de corta duración y alta intensidad, como aguaceros torrenciales. Para asegurar lecturas precisas, estos dispositivos deben instalarse en lugares libres de obstáculos físicos como edificaciones o árboles, que puedan generar interferencias. En Colombia, la red de monitoreo pluviométrico cuenta con un total de 2.071 pluviómetros y 401 pluviógrafos distribuidos a lo largo del territorio nacional (IDEAM, 2019).

Figura 5. Red pluviométrica de Colombia



Nota. Tomado de IDEAM (2019, como se citó en Leiva Ruiz, 2020)

En Colombia, el monitoreo de las precipitaciones es realizado a través de una red instrumental administrada por el IDEAM, la cual cuenta con más de 2.000 pluviómetros distribuidos en todo el territorio, además de varios cientos de pluviógrafos que permiten registrar eventos de lluvia de alta intensidad y corta duración.

La precipitación atmosférica desempeña un papel fundamental en los procesos de infiltración y en la recarga del agua subterránea, factores que inciden directamente en la estabilidad de los taludes. En regiones de clima tropical, como Colombia, las precipitaciones suelen ser significativamente más intensas que en otras partes del mundo, debido a la presencia de sistemas nubosos que abarcan grandes extensiones. Estas condiciones generan un mayor potencial de inestabilidad en laderas, especialmente cuando el terreno presenta características geológicas susceptibles a la saturación (IDEAM, 2019).

5.6. Humedad superficial

La humedad presente en la superficie del terreno influye directamente en fenómenos como la escorrentía, la capacidad de infiltración y el comportamiento de los desniveles del relieve. Estos procesos están condicionados por factores como la topografía, las características del suelo y las propiedades climáticas del entorno. En particular, las zonas con suelos arcillosos o limosos saturados tienden a desarrollar fisuras, lo que incrementa su susceptibilidad a transformaciones volumétricas. Este tipo de comportamiento es especialmente notorio en rellenos utilizados en infraestructura vial. En ese sentido, tanto los factores ambientales como las propiedades físicas del suelo afectan la dinámica de infiltración, siendo determinantes los primeros 40 centímetros del perfil del terreno (Bilz, 1995).

5.7. Filtración

La infiltración es el proceso mediante el cual el agua procedente de la precipitación atmosférica, el riego o el deshielo penetra en el suelo a través de su superficie. Este fenómeno depende de diversos factores, entre ellos la porosidad del material, el contenido de humedad previo, la pendiente del terreno, el tipo de cobertura vegetal y la intensidad de la lluvia. En terrenos compuestos por materiales de baja permeabilidad, como los suelos arcillosos o limo-

arcillosos, la infiltración suele ser limitada, lo cual favorece la escorrentía superficial y puede incrementar la carga hidráulica sobre las capas superiores del suelo (Bilz, 1995; IDEAM, 2019).

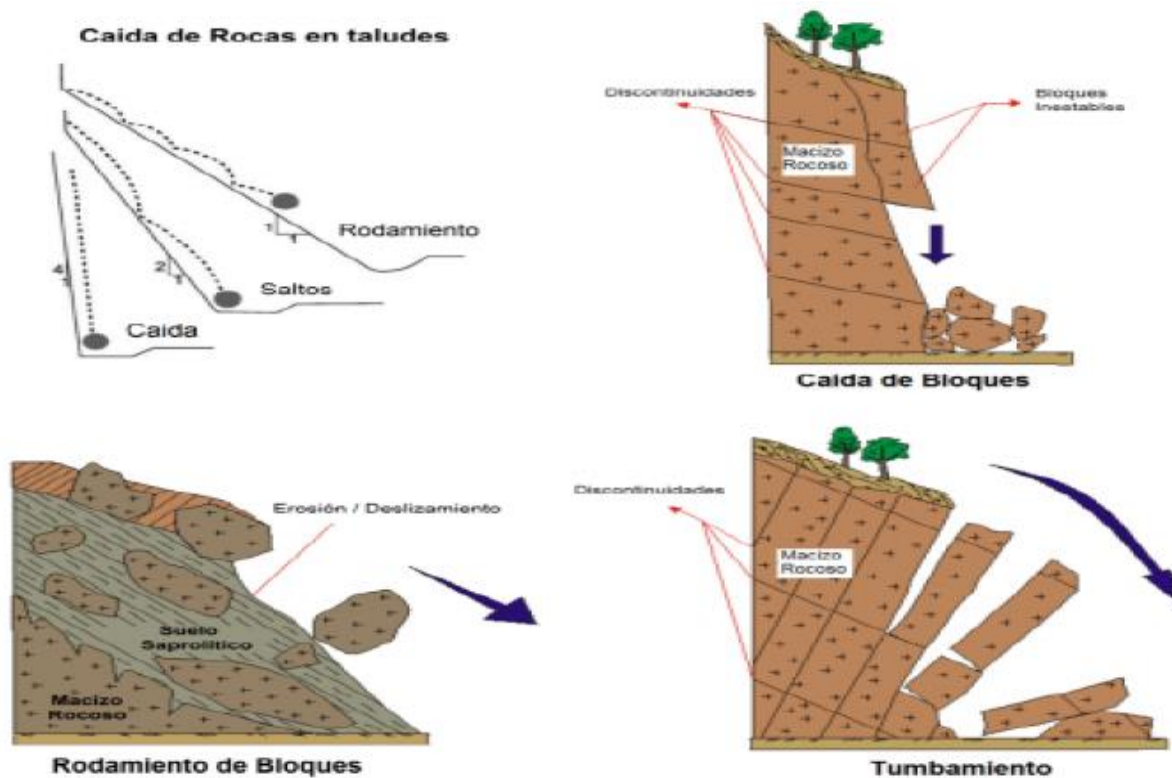
En contextos de inestabilidad geotécnica, como el observado en la terraza de Mesa Grande (km 58), la infiltración juega un papel crítico, ya que puede incrementar la presión de poros y reducir la resistencia al corte del suelo, facilitando así los procesos de remoción en masa. Además, cuando se acumula agua en capas poco drenantes, se crean zonas saturadas que promueven fisuramientos y deslizamientos superficiales, especialmente durante temporadas de lluvia intensa.

5.8. Movimiento en masa

Existen diversas formas de movimientos en masa, cada una con características particulares en cuanto a su dinámica y proceso de deformación. Para su identificación y análisis en relación con la evolución del talud, se empleará la clasificación propuesta por Varnes (1978), ampliamente reconocida en el estudio de la estabilidad de laderas.

5.8.1 Caídas

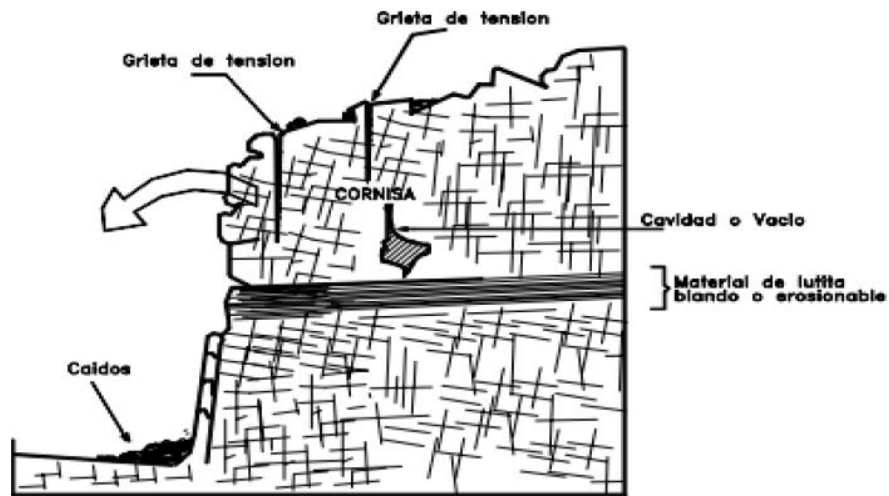
Este tipo de movimiento corresponde al desprendimiento súbito de fragmentos de roca o suelo que se desplazan por caída libre desde taludes muy empinados, generalmente con pendientes superiores a los 75 grados. Las masas involucradas pueden variar en tamaño y el fenómeno ocurre con escasa o nula deformación interna, siendo común en escarpes rocosos y zonas montañosas con fracturamiento estructural (Varnes, 1978).

Figura 6. Caída de bloques de roca por el efecto de la gravedad

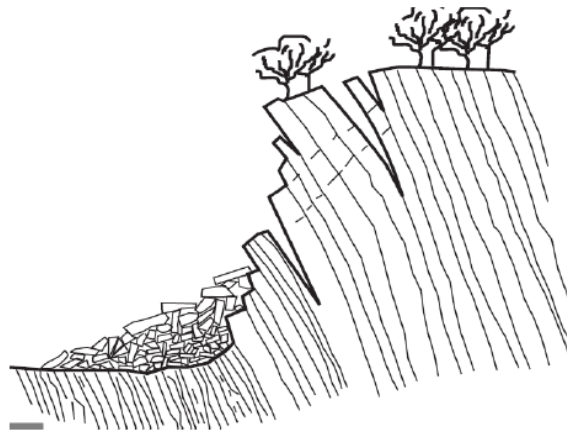
Nota. Tomado de Luza Huillca & Sosa Senticala, (2016)

5.8.2 *Inclinación o volteo*

Este tipo de movimiento se presenta principalmente en formaciones rocosas con bloques o estratos inclinados hacia el vacío, donde ocurre una rotación progresiva del material alrededor de un eje basal. La velocidad del volteo puede ser lenta o rápida, y está condicionada por las características geométricas y estructurales del terreno, como la orientación de las discontinuidades, la pendiente y el grado de fracturamiento. En taludes con estructuras desfavorables, este mecanismo puede conducir al colapso parcial o total del talud (Cruden & Varnes, 1996).

Figura 7. Volteo de materiales

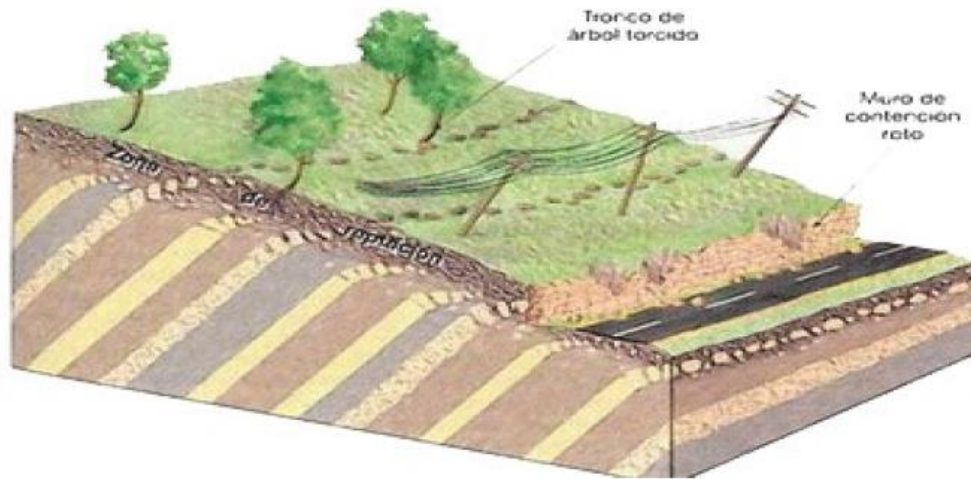
Nota. Tomado de Tomado de Suarez, (1998)

Figura 8. Inclínación de la falla

Nota. Tomado de Suarez, (1998)

5.8.3 Reptación

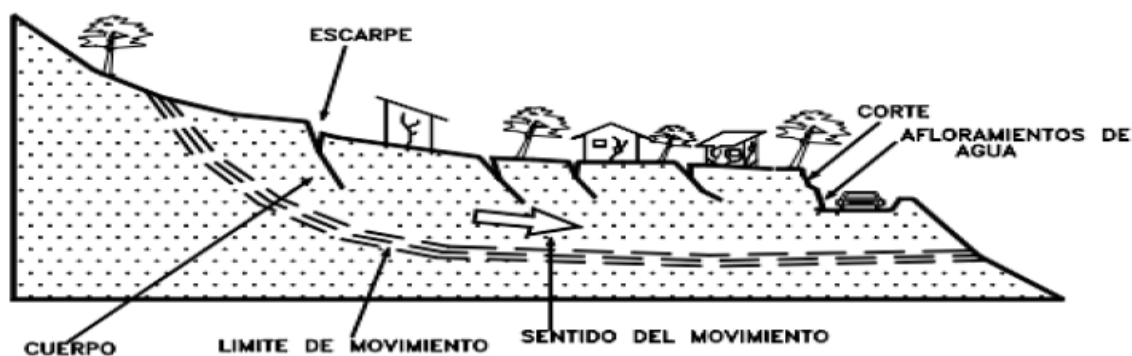
Es un proceso de desplazamiento muy lento y progresivo del suelo superficial, que se desarrolla a lo largo del tiempo como resultado de ciclos repetidos de humedecimiento y secado, así como variaciones térmicas. Aunque su movimiento es imperceptible en el corto plazo, puede generar deformaciones acumuladas que predisponen el terreno a la ocurrencia de deslizamientos, especialmente en taludes moderados con suelos arcillosos o limo-arcillosos (Cruden & Varnes, 1996).

Figura 9. Proceso de Reptación

Nota. Tomado de Strahler, (1960)

5.8.4 Deslizamientos

Este tipo de movimiento se caracteriza por el desplazamiento de una o varias masas de suelo o roca a lo largo de una o más superficies de ruptura definidas. En los casos en que el material involucrado corresponde a suelos poco consolidados o de baja resistencia, como arcillas o rellenos, se habla de deslizamiento en suelos blandos. Estas fallas pueden involucrar múltiples unidades que se mueven de forma conjunta o sucesiva, y su velocidad puede variar desde lenta hasta súbita, dependiendo de las condiciones geotécnicas y de saturación del terreno (Varnes, 1996).

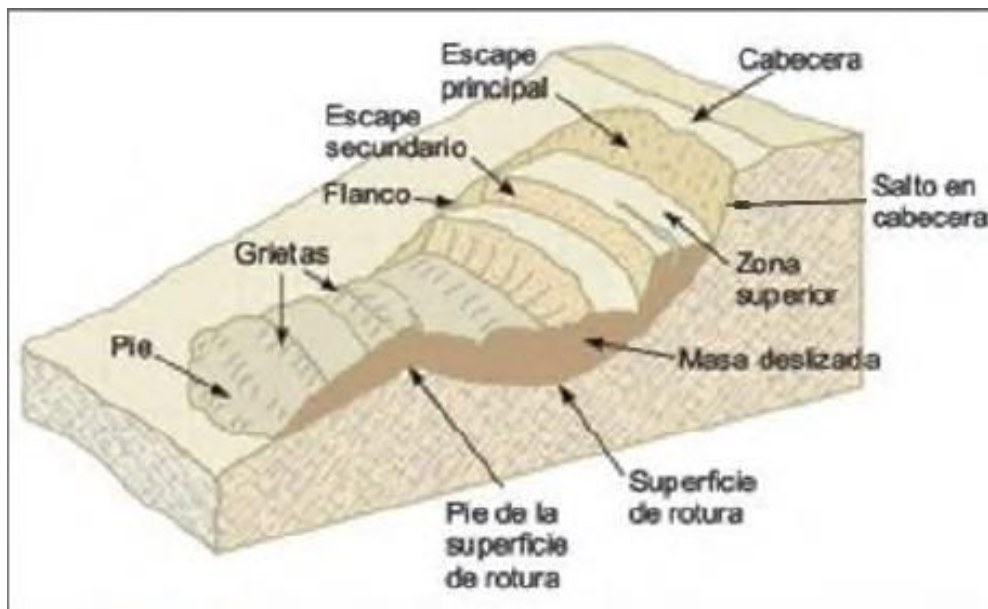
Figura 10. Movimiento de suelos blandos

Nota. Tomado de Suarez, (1998)

5.8.5 Deslizamiento rotacional

Este tipo de deslizamiento se caracteriza por desarrollarse sobre una superficie de falla curva, generando un movimiento rotacional de la masa hacia atrás. El centro de rotación se ubica por encima del centro de gravedad del deslizamiento, lo que provoca un hundimiento de la parte frontal y una elevación del extremo posterior. Este fenómeno suele darse en materiales homogéneos y su análisis requiere considerar la presencia de discontinuidades, condiciones de saturación y propiedades mecánicas del suelo o roca implicada, mediante estudios de estabilidad geotécnica (PMA, 2007).

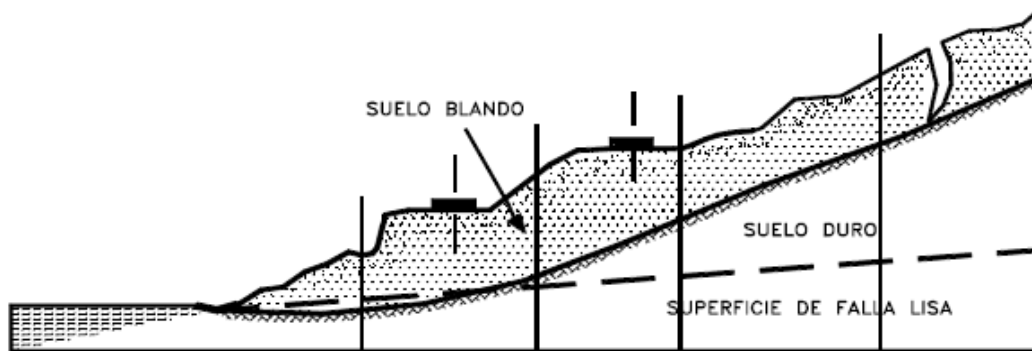
Figura 11. Deslizamiento rotacional



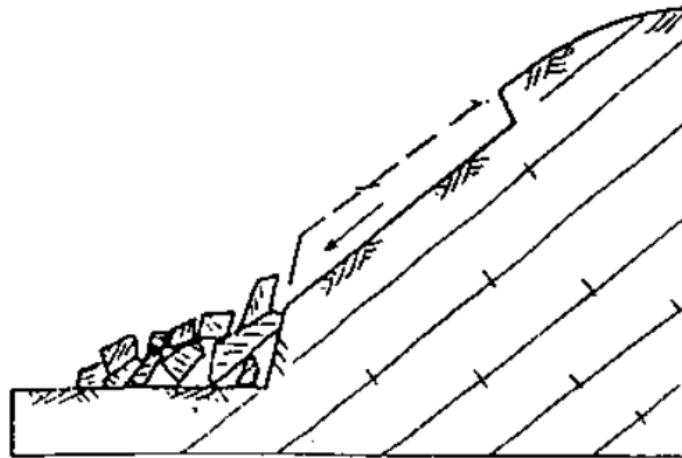
Nota. Tomado de Vallejo, 2002

5.8.6 Deslizamiento planar

El deslizamiento planar corresponde a un tipo de movimiento donde una masa de suelo o roca se desplaza de manera lineal a lo largo de una superficie de falla plana, sin presentar rotación del material. Este fenómeno es frecuente en laderas con estratos inclinados desfavorablemente y puede estar asociado a la presencia de agua o fracturas estructurales (IDEAM et al., 2016).

Figura 12. Deslizamiento Planar

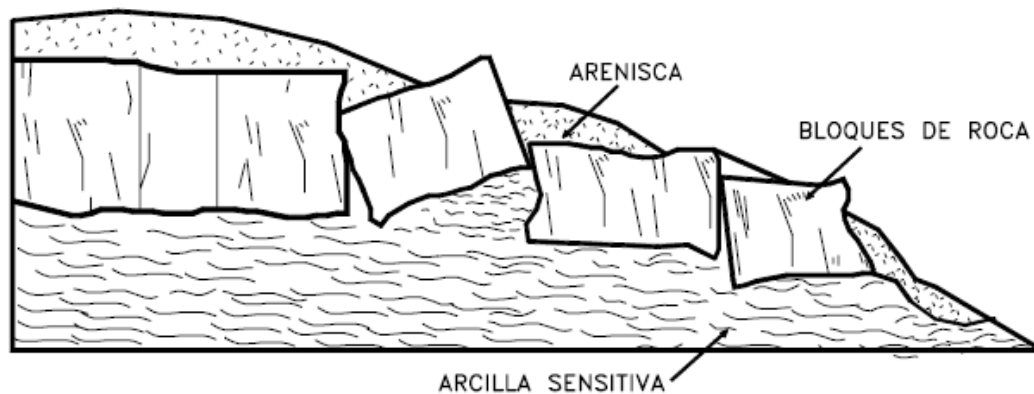
Nota. Tomado de Suarez, (1998)

Figura 13. Deslizamiento planar en macizo rocoso

Nota. Tomado de Organización Panamericana de la Salud [OPS], (1997)

5.8.7 *Esparcimiento lateral*

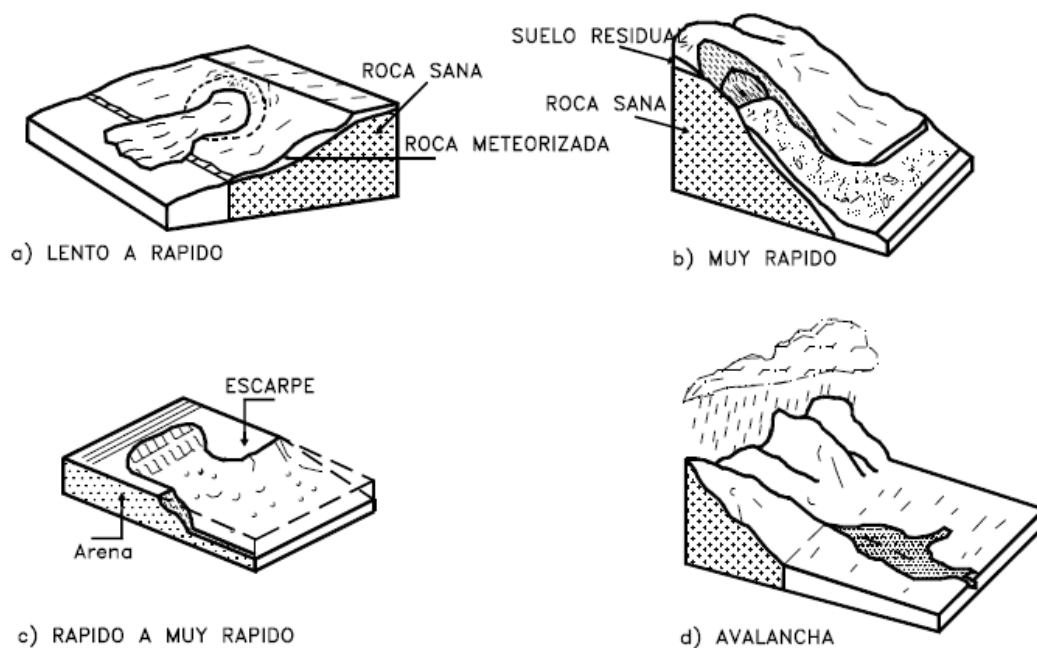
Los esparcimientos laterales se caracterizan por un movimiento horizontal que se produce como resultado de deformaciones internas en el terreno, asociadas a fracturas por tracción y corte. Este tipo de fenómeno puede involucrar distintos mecanismos de falla, incluyendo componentes de flujo, rotación y desplazamiento traslacional. Por su complejidad, estos movimientos son difíciles de clasificar con precisión y, en la mayoría de los casos, se desarrollan de forma muy lenta. Su aparición es común tanto en formaciones rocosas asentadas sobre suelos plásticos como en terrenos constituidos por materiales finos y sensibles, como arcillas y limos, que tienden a perder resistencia cuando se remoldean (Suarez, 1998).

Figura 14. Esquema de un esparcimiento lateral

Nota. Tomado de Suarez, (1998)

5.8.8 Flujo

En los flujos, es común observar desplazamientos internos entre partículas o fragmentos pequeños dentro de la masa que se traslada sobre una superficie de ruptura. Este tipo de movimiento puede presentarse tanto a baja como a alta velocidad, y puede estar compuesto por materiales secos o saturados, incluyendo fragmentos rocosos, desechos o suelos (Suarez, 1998).

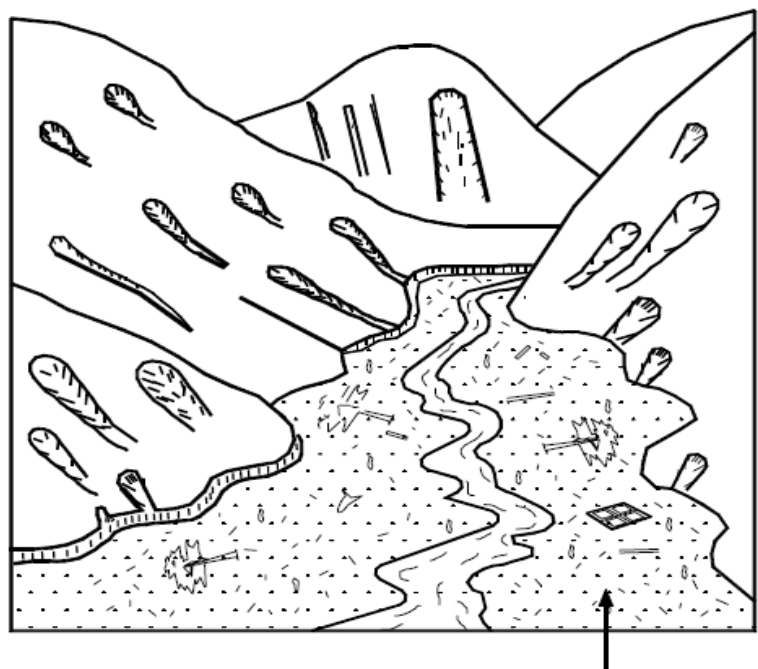
Figura 15. Velocidades de los flujos de agua

Nota. Tomado de Suarez, (1998)

5.8.9 Avalanchas

Las avalanchas se caracterizan por una ruptura súbita del terreno, seguida de un descenso violento de material que se comporta como un río de suelo y roca. Este tipo de flujo suele originarse por precipitaciones extremadamente intensas, el deshielo en zonas montañosas o eventos sísmicos, aunque la falta de vegetación, si bien puede influir, no es un factor indispensable para su ocurrencia. Por lo general, estas masas provienen de grandes volúmenes de materiales inestables producto de uno o varios deslizamientos previos combinados con agua en cantidades significativas. El resultado es una corriente con propiedades similares a las de un líquido viscoso, capaz de alcanzar velocidades muy elevadas y causar daños severos a gran escala, especialmente en cuencas hidrográficas. En ciertos casos, las avalanchas pueden superar los 50 metros por segundo. Este tipo de movimiento también puede explicarse por un comportamiento de flujo turbulento granular, en el cual las partículas se desplazan sin necesidad de una fase líquida o gaseosa, mediante colisiones que transmiten energía entre ellas (Suarez, 1998).

Figura 16. Avalancha



MATERIALES DEPOSITADOS POR LA AVALANCHA

Nota. Tomado de Suarez, (1998)

Tabla 2. Tipos de movimientos en masa

	Frecuencia	Actividad	Forma	Velocidad	Humedad	Masa
Caído	progresivo	Estabilizado	Sucesivo	Extremadamente rápido	Muy mojado	Tierra
Inclinación	Retrogresivo	Abandonado	Compuesto	Muy rápido	Mojado	Residuos
Deslizamiento	Ampliándose	Dormido	Complejo	Rápido	Húmedo	Roca
Esparcimiento	Alargándose	Inactivo	Múltiple	Moderado	Seco	
Flujo	Moviéndose	Suspendido	Sencillo	Lento		
	Disminuyendo	Reactivo		Muy lento		
	Confinado	Activo		Extremadamente lento		

Nota. Tomado de Cruden & Varnes, (1996)

5.9. Escorrentía

La escorrentía superficial ocurre cuando la tasa de precipitación excede la capacidad de infiltración del suelo. Es decir, si el suelo ya está saturado o no puede absorber rápidamente el agua, el exceso se desplaza superficialmente, contribuyendo a erosión, arrastre de sedimentos y carga adicional en las laderas (AgriCos, 2021).

5.10. Humedad

La humedad del suelo es la cantidad de agua presente en los poros del terreno, expresada como porcentaje del volumen o la masa total del suelo. Esta variable controla directamente la resistencia al corte, la permeabilidad y la presión de poros del material, que son elementos críticos en la estabilidad de pendientes. Un incremento de la humedad disminuye el esfuerzo efectivo del suelo y puede predisponer al colapso de laderas, especialmente en materiales heterogéneos o coluviales (Fredlund & Rahardjo, 1993).

6. Marco legal

6.1. Normativa colombiana y planificación territorial

La Ley 1523 de 2012 establece la Política Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres y crea el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres en Colombia. Define la gestión del riesgo como un proceso integral que abarca la planificación, ejecución, seguimiento y evaluación de políticas, planes, programas, regulaciones y acciones orientadas a conocer, reducir y manejar los riesgos y desastres. Esta normativa busca garantizar la seguridad, el bienestar y la calidad de vida de la población, promoviendo el desarrollo sostenible. Asimismo, establece que tanto las autoridades como los ciudadanos tienen responsabilidad en la gestión del riesgo, y que las entidades públicas, privadas y comunitarias deben implementar los procesos de prevención y mitigación de acuerdo con sus competencias y jurisdicción, dentro del marco del Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres (Congreso de la República de Colombia, 2012)

El Decreto 602 de 2017 establece que los concesionarios y contratistas de infraestructura vial deben atender de manera inmediata las emergencias que se presenten en sus zonas de actividad o influencia, garantizando así la continuidad de la movilidad y la seguridad de los usuarios. Además, este decreto habilita el uso del Fondo Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres para respaldar financieramente dichas intervenciones (República de Colombia, 2017).

Por otro lado, los Lineamientos de Infraestructura Verde Vial para Colombia, formulados por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible en conjunto con el Ministerio de Transporte, promueven la incorporación de criterios de sostenibilidad en los proyectos viales. Dichos lineamientos recomiendan el uso de soluciones basadas en la naturaleza, el diseño de sistemas de drenaje eficientes y el monitoreo ambiental, aspectos esenciales para corredores viales con alta susceptibilidad a deslizamientos, como el del kilómetro 58 en la vía Bogotá–Villavicencio (MinAmbiente & MinTransporte, 2022)

6.2. Directrices para la formulación de planes de gestión del riesgo de desastres: decreto 2157 de 2017

El Decreto 2157 de 2017 complementa la Ley 1523 de 2012 al establecer lineamientos para la formulación de los Planes de Gestión del Riesgo de Desastres (PGRD) por parte de entidades públicas y privadas. Este decreto resalta la importancia de integrar la gestión del riesgo en la planeación institucional y sectorial, de manera que se contemplen acciones de prevención, reducción y control frente a amenazas de origen natural y antrópico. Asimismo, promueve que los proyectos de infraestructura y las actividades económicas incluyan medidas orientadas a garantizar la seguridad, la sostenibilidad y la capacidad de respuesta ante eventuales emergencias (República de Colombia, 2017).

6.3. Decreto 1807 de 2014 – Determinación de amenazas por movimientos en masa

El Decreto 1807 de 2014 establece directrices técnicas para la identificación y zonificación de amenazas asociadas a fenómenos de remoción en masa, incluyendo deslizamientos, flujos de detritos y caídas de rocas. Este reglamento orienta a que los estudios incorporen variables geológicas, geomorfológicas, hidrológicas, sísmicas y antrópicas, además del análisis de antecedentes históricos y la elaboración de cartografía temática. Asimismo, exige la producción de mapas de zonificación de amenaza y la definición de medidas de mitigación y monitoreo, con el fin de guiar la planificación territorial y las intervenciones en infraestructura. Tales disposiciones resultan particularmente relevantes en áreas críticas como el kilómetro 58 de la vía Bogotá–Villavicencio, donde la frecuencia de deslizamientos demanda criterios técnicos uniformes para garantizar soluciones efectivas (República de Colombia, 2014).

6.4. Decreto 1478 de 2022: actualización del plan nacional de Gestión del riesgo

El Decreto 1478 de 2022 constituye una de las disposiciones más recientes en materia de gestión del riesgo en Colombia. Este decreto actualiza el Plan Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres y modifica algunos apartados del Decreto Único Reglamentario 1081 de 2015. Su propósito central es fortalecer los lineamientos que guían a las entidades territoriales y al

Gobierno Nacional en la planificación, prevención y reducción de riesgos derivados de fenómenos naturales y antrópicos.

En el contexto del deslizamiento ocurrido en el kilómetro 58 de la carretera Bogotá-Villavicencio, esta normativa resulta especialmente relevante, ya que obliga a incorporar dentro de los planes de desarrollo y en la gestión de proyectos de infraestructura vial un enfoque de prevención y adaptación frente a amenazas como los movimientos en masa. Con ello se busca garantizar que obras estratégicas, como la principal vía de conexión entre Bogotá y los Llanos Orientales, contemplen medidas para minimizar la vulnerabilidad de los taludes y mejorar la capacidad de respuesta institucional ante emergencias (República de Colombia, 2022).

7. Estado del arte

El deslizamiento registrado en el kilómetro 58 de la vía Bogotá–Villavicencio, en jurisdicción del municipio de Guayabetal durante 2019, evidenció el alto grado de inestabilidad de la ladera en este sector. La zona presenta una vulnerabilidad histórica frente a este tipo de fenómenos, originada por la interacción de factores geológicos, hidrológicos, climáticos y antrópicos. Las obras de infraestructura desarrolladas en un terreno frágil como túneles y calzadas no solo incrementaron las condiciones de riesgo, sino que también influyeron en la magnitud de los impactos generados por el evento.

La región donde se sitúa el kilómetro 58 forma parte de la Cordillera Oriental, una zona caracterizada por su topografía escarpada y terrenos compuestos de suelos coluviales, lutitas y rocas sedimentarias altamente fracturadas. Estos tipos de terrenos son especialmente vulnerables a los deslizamientos, ya que los suelos coluviales tienen baja cohesión y tienden a saturarse rápidamente durante eventos de precipitación intensa (Leiva, 2020 & Diaz y Zapata, 2020).

El deslizamiento de junio de 2019 en el kilómetro 58 fue causado por una combinación de factores geológicos, como los suelos coluviales y fracturados de la Cordillera Oriental, y el impacto humano, particularmente la excavación del Túnel 13. Según la Sociedad Colombiana de Ingenieros, esta construcción debilitó la compactación de la montaña, creando un "desconfinamiento" que, junto con las lluvias torrenciales, desestabilizó la ladera SCI (2020). Los informes del Ministerio de Transporte confirmaron la inestabilidad geológica de la zona, destacando la necesidad de un cierre indefinido de la vía para proteger a los usuarios (Ministerio de Transporte. 2019).

Estudios han señalado que las lluvias extremas en 2019 superaron los valores históricos, saturando el suelo y aumentando la presión de los poros, lo que debilitó aún más la estructura del terreno (Leiva Ruiz, 2020 & Díaz Martínez, 2020). Los esfuerzos de mitigación incluyen la construcción de muros de contención, pero se está evaluando la viabilidad de soluciones permanentes como viaductos para evitar futuros deslizamientos. (Delgado Gómez, P. 2020).

Ayala Romero, N. E. (2018), señala que la construcción de la carretera Bogotá–Villavicencio, en particular la doble calzada y los túneles, ha tenido un impacto significativo en la estabilidad del terreno, la excavación de túneles en terrenos inestables como los de la Cordillera Oriental requiere de técnicas avanzadas de geomecánica y monitoreo constante. Sin

embargo, en la práctica, los esfuerzos por estabilizar los taludes en áreas críticas como el kilómetro 58 han sido insuficientes.

El Método Austriaco de Excavación de Túneles (NATM) fue uno de los métodos más utilizado en la construcción de varios túneles de la vía, pero los desafíos geotécnicos de la zona, como las fracturas en el macizo rocoso y la alta permeabilidad de los suelos, dificultaron el control de las infiltraciones de agua. Estos factores, combinados con la construcción de las calzadas, contribuyeron a un aumento de la presión de los poros en el terreno, acelerando la pérdida de estabilidad (Leiva, 2020; Díaz y Zapata, 2020).

El documento (Ingeniería y Georriesgos IGR SAS, (2019), menciona que uno de los factores más críticos en la desestabilización de la ladera fue la construcción del Túnel 13, parte de la doble calzada Bogotá-Villavicencio. Aunque inicialmente se proyectó que el túnel sería excavado en roca, la mayor parte se construyó en depósitos de terraza, lo que comprometió la estabilidad del terreno. Los estudios de estabilidad revelaron que la excavación del túnel alteró los patrones de esfuerzo y de circulación de aguas subterráneas, lo que condujo a una mayor saturación de los suelos y una disminución de la resistencia del macizo.

Ingeniería y Georriesgos IGR SAS,(2019), señala también que el túnel había comenzado a mostrar signos de deformación en agosto de 2018, cuando se reportaron fisuras y filtraciones de agua en los últimos 200 metros del túnel. Esto coincidió con la activación de fallas en la escalera superior, lo que afectó severamente su estabilidad. La construcción de la doble calzada, junto con los cambios en los patrones de escorrentía superficial y subsuperficial, también contribuyó al aumento de la erosión y la acumulación de agua en áreas clave de la ladera.

Otros estudios han señalado que la granja avícola Pollo Olímpico, ubicada en las cercanías del kilómetro 58, pudo haber tenido un impacto en el deterioro gradual de la ladera. Aunque inicialmente se especuló que la construcción de la granja y la infraestructura relacionada podrían haber contribuido a la inestabilidad de la ladera, los estudios concluyeron que el impacto directo de Pollo Olímpico en el intervalo fue limitado. Sin embargo, la granja sí alteró los patrones de escorrentía superficial al cambiar el flujo de agua hacia las laderas inestables del kilómetro 58 (Coviandes SAS, 2019).

Coviandes SAS, (2019), señala también que el aumento de la escorrentía superficial debido a la construcción de galpones y otras infraestructuras en el Pollo Olímpico, junto con la deforestación en la parte superior de la meseta, exacerbó la erosión en las laderas, haciendo que

el terreno fuera más susceptible a graduales. Aunque el análisis posterior determinó que no fue la causa principal del gradual, la interacción de estas actividades humanas con las condiciones geológicas y meteorológicas locales contribuyó a la inestabilidad de la región.

El sector de Mesa Grande, donde se localiza el kilómetro 58 de la carretera Bogotá–Villavicencio, ha mostrado problemas de inestabilidad al menos desde 2010, cuando se documentaron los primeros desprendimientos significativos. Desde entonces, se han registrado múltiples eventos en 2013, 2016, 2017 y 2018, provocando cierres parciales y totales de la vía, así como daños estructurales y pérdidas humanas. La persistencia de estos episodios refleja una vulnerabilidad geotécnica intrínseca de la zona, que se ve agravada por factores naturales y antrópicos (Coviandes, 2019).

La geomorfología de la región presenta terrazas basculadas y laderas con pendientes superiores al 35 %, asociadas a procesos erosivos activos. Estos rasgos, junto con la sismicidad regional derivada del Sistema de Fallas del Borde Llanero, configuran un escenario de amenaza geotécnica relevante para la estabilidad de las obras de infraestructura vial presentes en el sector (Pulido y Gomez, 2001).

Entre los elementos que han favorecido los deslizamientos recurrentes destacan las características geológicas y geomorfológicas de la terraza, la sismicidad regional y el aumento de precipitaciones y caudales de escorrentía, posiblemente relacionados con el cambio climático. Asimismo, la construcción de infraestructura avícola en la parte alta de la meseta, especialmente los galpones y vías de acceso del proyecto Pollo Olímpico, alteró la cobertura vegetal y modificó los patrones de escorrentía superficial, generando zonas de saturación y erosión en los taludes (Coviandes, 2019).

Se describe que en 2008 la meseta de Mesa Grande no mostraba intervenciones antrópicas significativas ni procesos erosivos visibles. Sin embargo, para 2016 ya existían los galpones de la granja avícola y se observaban signos iniciales de erosión, posiblemente asociados a nacimientos internos en la terraza. En 2017 la degradación avanzó, mostrando desprendimientos y alteraciones progresivas de las laderas. Entre junio y julio de 2019 la vegetación del talud suroccidental desapareció casi por completo, el material comenzó a caer hacia el río Negro y se evidenció un mecanismo secuencial de inestabilidad: erosión, carcavamiento remontante, deslizamientos someros y flujos de detritos, similar a los procesos

descritos por Suárez (1989) para deslaves por lluvias intensas (Ingeniería y Georriesgos IGR SAS 2019).

En septiembre y octubre de 2018, tras detectarse deformaciones y agrietamientos en el Túnel 13 y múltiples deslizamientos en la Terraza Mesa Grande, se llevaron a cabo inspecciones técnicas que revelaron la magnitud del problema. El túnel se construyó en depósitos aluviales de origen fluvio-torrencial con bloques, cantos y gravas en matriz areno-limosa a limo-arcillosa, materiales susceptibles a pérdida de resistencia al saturarse. Las lluvias intensas de finales de agosto e inicios de septiembre de 2018, sumadas a posibles represamientos de la quebrada Caño Seco por deslizamientos ocurridos en 2017 y 2018, incrementaron la infiltración y la presión hidráulica sobre el revestimiento del túnel, generando descascaramientos, agrietamientos y deformaciones laterales en sus últimos 250 metros. (Geoandina SAS, 2018).

El sector del kilómetro 58 de la vía Bogotá–Villavicencio, ubicado en la meseta de Mesa Grande, presenta una configuración geológica y geomorfológica que lo hace altamente susceptible a inestabilidad. Geológicamente, el área pertenece al Grupo Quetame, compuesto por rocas metamórficas de bajo grado como filitas y cuarcitas, afectadas por fallas activas y plegamientos, lo que ha generado macizos muy fracturados. La terraza de Mesa Grande está conformada por depósitos fluvio-torrenciales no consolidados de granulometría variada —desde finos hasta bloques—, con suelos jóvenes de tipo entisoles e inceptisoles, sin evolución pedogenética significativa, de buen drenaje y limitados por fragmentos de roca, lo que reduce su cohesión (Navarro et al., 2019).

La amenaza se incrementa por factores antrópicos como la adecuación de taludes para la vía y la excavación del Túnel 13, que han modificado las condiciones hidrogeológicas y geotécnicas de la terraza, provocando desconfinamientos y favoreciendo el incremento de la presión de poros. Sumado a las precipitaciones intensas y a la sismicidad moderada-alta asociada al Sistema de Fallas del Borde Llanero, se conforma un escenario de amenaza alta por movimientos en masa (Navarro et al., 2019).

Según Pulido y Gomez (2001), El área correspondiente al kilómetro 58, en el sector de Mesa Grande, se ubica dentro del Macizo de Quetame, una estructura geológica conformada principalmente por rocas metamórficas del Grupo Quetame, como filitas y cuarcitas de edad precámbrica y paleozoica. Estas unidades presentan un alto grado de fracturamiento y foliación, lo que favorece la infiltración de agua y la disminución de la resistencia de los macizos rocosos.

En la zona se han cartografiado varias fallas activas, como la Falla de Quetame, de rumbo aproximado N20°E, que controla el curso de los ríos Negro y Blanco, y la Falla Río Negro, de dirección N40°W, relacionada con actividad tectónica cuaternaria.

En las áreas más bajas, adyacentes a la vía Bogotá–Villavicencio, se desarrollan depósitos cuaternarios aluviales y fluviotorrenciales, conformados por gravas, arenas y limos, de alta permeabilidad y baja cohesión. Estos depósitos están dispuestos en terrazas y conos de deyección, modelados por la dinámica de los ríos y quebradas locales. La combinación de materiales no consolidados, pendiente pronunciada y aporte constante de agua de escorrentía y nacimientos, incrementa la susceptibilidad a movimientos en masa, especialmente deslizamientos traslacionales y flujos de detritos durante temporadas de lluvias intensas (Pulido y Gomez, 2001).

En las regiones montañosas tropicales, la ocurrencia de deslizamientos está fuertemente condicionada por la interacción de factores como la topografía abrupta, la alta sismicidad, la intensa meteorización y las lluvias abundantes. Estos elementos, combinados, generan un escenario propicio para la inestabilidad de laderas y taludes. Aunque muchas veces las laderas han permanecido estables por largos periodos, cambios en el relieve, variaciones en el régimen hídrico subterráneo, reducción de la resistencia del suelo o intervenciones antrópicas pueden detonar fallas imprevistas (Suárez, 1998).

El agua es uno de los factores más influyentes en la inestabilidad de taludes, especialmente en zonas tropicales donde la precipitación es elevada. La infiltración derivada de lluvias intensas o prolongadas incrementa la presión de poros y disminuye la resistencia al corte del material, facilitando la ocurrencia de deslizamientos. Además, regímenes de lluvias con temporadas definidas de aguaceros torrenciales pueden generar eventos súbitos de gran magnitud (Suárez, 1998),

Desde el punto de vista geotécnico, la resistencia al corte de los materiales determinada por parámetros como el ángulo de fricción y la cohesión, la permeabilidad, la sensibilidad y la expansividad, son determinantes en la estabilidad de un talud. La variabilidad de estos parámetros en suelos residuales tropicales exige evaluaciones detalladas para estimar el factor de seguridad y prevenir fallas (Suárez, 1998).

Las avenidas torrenciales son eventos hidrológicos extremos que ocurren en cauces de alta pendiente, permanentes o intermitentes, caracterizados por el transporte veloz de mezclas de

agua y sólidos en proporciones variables. El material sólido puede provenir de la erosión de laderas adyacentes o del mismo lecho del cauce, acumulándose en sectores de menor pendiente. Estos procesos se desencadenan, principalmente, por precipitaciones intensas que exceden la capacidad de infiltración del terreno, provocando escorrentía superficial concentrada (Ramos Cañón et al., 2021).

Los estudios geofísicos y geológicos realizados en el sector del Túnel 13, en la vía Bogotá–Villavicencio, han permitido caracterizar con mayor precisión la estructura y comportamiento de la terraza aluvial de Guayabetal y su relación con las rocas metamórficas subyacentes. La combinación de sondeos de magnetotelúrica y tomografías eléctricas evidenció espesores variables de la terraza, la presencia de fallas activas y zonas de alta fracturación que favorecen el flujo subterráneo de agua, factores que, junto con las precipitaciones y la sismicidad local, actúan como detonantes de movimientos en masa. Estos hallazgos resaltan la importancia de comprender la interacción entre la litología, la tectónica y la hidrogeología para prevenir deslizamientos que puedan afectar la infraestructura vial y túneles en zonas tectónicamente activas (Cuéllar, Vallejo & Pescador, 2018).

análisis geofísicos permitieron detectar la presencia de estructuras tectónicas activas que cortan la terraza, lo cual influye en la estabilidad global del sector. Estas fallas, combinadas con la alta pluviosidad de la región y la capacidad limitada de drenaje de los suelos finos presentes en la matriz, incrementan el riesgo de deslizamientos rotacionales y traslacionales. Esta información es clave para el diseño de medidas de estabilización que integren soluciones estructurales y de manejo de aguas superficiales y subterráneas (Cuéllar, Vallejo & Pescador, 2018).

Según Coviandes S.A.S. (2019), La caracterización geotécnica del área muestra que la ladera está compuesta por depósitos cuaternarios no consolidados, intercalados con materiales de origen metamórfico fracturado del Grupo Quetame. Este tipo de litología, al saturarse, experimenta una disminución significativa en su resistencia al corte, lo que favorece procesos de falla en masa. El análisis histórico de eventos revela que los deslizamientos en esta zona han afectado de forma recurrente la estabilidad de la vía, generando cierres prolongados y altos costos de rehabilitación.

El sector del kilómetro 58 de la vía Bogotá–Villavicencio, ubicado en la ladera de Mesa Grande, presenta una amenaza alta por movimientos en masa debido a su conformación geológica y geomorfológica, la pendiente pronunciada y las condiciones hidrológicas. Los

estudios identifican procesos activos como erosión regresiva, flujos de detritos y deslizamientos traslacionales y rotacionales, agravados por las lluvias intensas y la infiltración de aguas superficiales y subterráneas. Estos factores, sumados a las intervenciones antrópicas para la construcción de infraestructura vial, han incrementado la susceptibilidad del terreno y la probabilidad de ocurrencia de eventos de gran magnitud (Coviandes S.A.S., 2019).

Según Coviandes S.A.S. (2019), La caracterización geotécnica del área muestra que la ladera está compuesta por depósitos cuaternarios no consolidados, intercalados con materiales de origen metamórfico fracturado del Grupo Quetame. Este tipo de litología, al saturarse, experimenta una disminución significativa en su resistencia al corte, lo que favorece procesos de falla en masa. El análisis histórico de eventos revela que los deslizamientos en esta zona han afectado de forma recurrente la estabilidad de la vía, generando cierres prolongados y altos costos de rehabilitación.

Según Leiva Ruiz. (2020), El análisis hidrológico del kilómetro 58 en la vía Bogotá Villavicencio indica que las precipitaciones no fueron la causa principal de los deslizamientos, aunque sí actuaron como un factor coadyuvante. La interacción de condiciones geológicas desfavorables, la construcción del Túnel 13 y otros procesos antrópicos generaron un deterioro progresivo del talud. Incluso sin niveles extremos de lluvia, se formaron flujos en la ladera que erosionaron la superficie de la meseta Mesa Grande, contribuyendo a su degradación.

los registros pluviométricos históricos y recientes muestran que, aunque en eventos como el de julio de 2019 se alcanzaron precipitaciones de hasta 148 mm superando el promedio histórico de 140 mm, estos niveles no rebasaron los periodos de retorno previstos en el diseño de la vía. Esto sugiere que la precipitación tuvo un papel indirecto en la inestabilidad, siendo más determinantes las características geotécnicas del terreno y las intervenciones de infraestructura (Leiva Ruiz, 2020).

Un análisis desarrollado por la Universidad de los Andes aplicando modelos de *machine learning* identificó al kilómetro 58, próximo a Guayabetal, como el punto con mayor probabilidad de deslizamientos en la vía Bogotá–Villavicencio. Esto se debe a la interacción de fallas geológicas activas, la cercanía al cauce del río Guayuriba y la configuración del relieve. El estudio también evidenció que, en 2018, se registraron más de 180 deslizamientos con pérdidas diarias superiores a 950 millones de pesos, mientras que la emergencia de junio de 2019 ocasionó pérdidas superiores a dos billones de pesos (Universidad de los Andes, 2025).

8. Geología y geomorfología

En el sector del kilómetro 58 de la vía Bogotá–Villavicencio afloran unidades rocosas correspondientes a las filitas y cuarcitas del conjunto Guayabetal, una formación geológica que debe su nombre a la población del mismo nombre. Esta unidad aflora principalmente entre la quebrada Susumuco y áreas como Chirajara, Guayabetal, Loma Jabonera y la vereda Naranjal, extendiéndose a lo largo del corredor vial en dirección oriente–occidente (INGEOMINAS, 2011).

La zona de estudio se encuentra conformada por depósitos cuaternarios, entre los que se destacan los depósitos aluviales (Qal) y de derrubio (Qd), además de unidades de roca sedimentaria y metamórfica. Esta diversidad litológica se encuentra representada en la estratigrafía local, reflejando la complejidad estructural y geotécnica del sector.

La Cordillera Oriental de los Andes colombianos se caracteriza por su topografía escarpada y suelos poco consolidados, compuestos principalmente por lutitas, suelos coluviales y rocas sedimentarias fracturadas. Estos materiales presentan baja cohesión y una alta susceptibilidad a la saturación, lo cual los hace propensos a deslizamientos, especialmente durante temporadas de lluvia intensa (Leiva Ruiz, 2020).

En el sector del km 58, se ha identificado que el tipo de suelo, junto con la fracturación del macizo rocoso, favorece la infiltración del agua y la pérdida de resistencia del terreno (Ayala Romero, 2018).

El contexto geológico de la zona corresponde a materiales paleozoicos pertenecientes al grupo Quetame, específicamente al conjunto conocido como filitas y cuarcitas de Guayabetal. Este conjunto está compuesto principalmente por filitas, filitas cloríticas y metalimolitas verdes, las cuales presentan un bajo grado de metamorfismo. Además, se identifican depósitos cuaternarios como coluviones, aluviones, terrazas y materiales remobilizados por procesos de remoción en masa, que cubren parcialmente las formaciones más antiguas (Coviandes S.A.S., 2019).

8.1. Filitas y cuarcitas de guayabetal (PEqgu)

pertenecen al Grupo Quetame que está compuesto por rocas metamórficas y presenta afloramientos notables entre Guayabetal y el río Guamal. En el sector del kilómetro 58 de la vía Bogotá–Villavicencio, se destacan las Filitas y Cuarcitas de Guayabetal (Peqgu), cuya exposición más representativa se extiende desde la quebrada Susumuco, al oriente, hasta Chirajara, Loma Jabonera y la vereda Naranjal, hacia el occidente. Esta unidad geológica aflora principalmente al norte del corredor vial (Navarro et al., 2019 & Pulido y Gomez, 2001).

Esta unidad geológica, de amplia extensión en la región, se desarrolla desde la quebrada Susumoco hacia el oriente hasta la vereda Naranjal en el occidente, pasando por sectores como Chirajara, Guayabetal y Loma Jabonera. Su composición varía notablemente según el área: en Chirajara predominan filitas verdes y moradas con intercalaciones de cuarcita, mientras que entre Guayabetal y Naranjal se observan filitas de tonalidades verde claro a crema con capas esporádicas de cuarcita. De manera puntual, se registran filitas grises oscuras y verdosas afectadas por meteorización. La foliación más común sigue una orientación N50°E, aunque presenta deformaciones vinculadas a la actividad tectónica.

Su mineralogía está dominada por moscovita, biotita y cuarzo, acompañados de minerales accesorios como turmalina, circón, grafito, clorita, pirita, magnetita limonitizada, apatito y limonita. Petrográficamente, se identifican texturas lepidoblásticas, lepidoporfirolásticas y heteroblásticas, así como indicios de varias fases de metamorfismo (S₀ a S₃). El espesor calculado supera los 2.000 metros y corresponde a la facies metamórfica de esquisto verde.

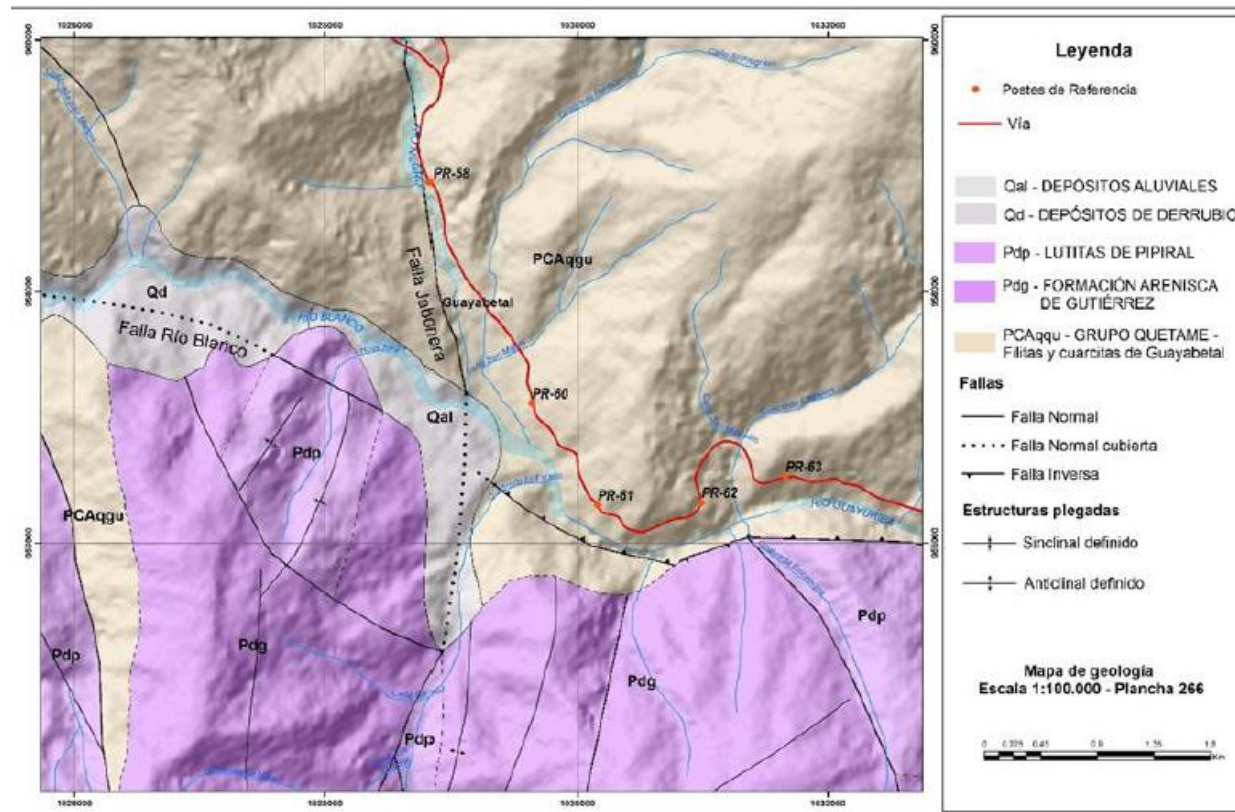
En cuanto a su estructura, el contacto oriental con las rocas del Cretácico se da mediante fallas de cabalgamiento, entre las que destaca la Falla de Río Grande, prolongación meridional de la Falla de Servitá. Hacia el occidente, las fallas de Cristales y Río Chiquito limitan la unidad con sedimentitas del Devónico-Carbonífero, mientras que hacia el noroeste, fallas como El Deseo, El Tabor, El Engaño y Palermo la atraviesan y continúan fuera del área representada.

8.2. Depósitos cuaternarios (Qt, Qfg, Qd y Qal)

En el área de influencia del río Blanco se identifican depósitos cuaternarios compuestos por materiales de derrubio (Qd) y aluviales (Qal). Los depósitos Qd se desarrollan en zonas de ladera y piedemonte como resultado de procesos gravitacionales que acumulan fragmentos de roca de distintos tamaños, mientras que los depósitos Qal se encuentran restringidos a los cauces de ríos y quebradas activos, como en el caso del río Blanco (Navarro et al., 2019).

En la meseta de Mesa Grande aflora un depósito de origen fluviotorrencial con un espesor considerable, estimado en aproximadamente 250 metros. Este depósito está conformado por fragmentos de roca metamórfica de gran tamaño, como gravas, cantos y bloques, los cuales presentan formas poco fracturadas. Estos materiales se encuentran embebidos en una matriz de textura arenosa a limo-arenosa (Vargas Cortés et al., 2022).

En la zona de estudio se reconocen varios tipos de depósitos cuaternarios. Las terrazas (Qt) predominan en la sabana de los Llanos Orientales y, en menor medida, en sectores elevados de ríos y quebradas, como en las proximidades de Villavicencio, donde contienen gravas y fragmentos de roca sedimentaria y metamórfica, originados por la erosión del Borde Llanero. Los depósitos fluvioglaciales (Qfg) se ubican en áreas de páramo, próximos a las fuentes de los ríos Guamal y Culebras. Los depósitos de derrubio (Qd) se localizan en laderas y piedemonte, formados por acumulaciones gravitacionales de bloques y cantos de roca, con mayor presencia al oeste de Acacías. Por su parte, los depósitos aluviales (Qal) se asocian a cauces de ríos y quebradas, siendo relevantes en los ríos Guatiquía, Guayuriba, Acacías y Guamal. De acuerdo con Goosen (1964), en las áreas de piedemonte y sabanas se distinguen abanicos aluviales subrecientes, terrazas aluviales de distintos niveles y aluviones recientes (Pulido y Gomez, 2001).

Figura 17. Geología del Km 58, el cual se ubica en la margen izquierda del río Negro

Nota. Tomada de Navarro et al., (2019)

El sector de estudio se localiza en la región estructural comprendida entre el Macizo de Quetame y los Farallones de Medina, extendiéndose hacia el Borde Llanero y los Llanos Orientales. En esta zona, los pliegues observados están estrechamente vinculados a las estructuras geológicas vecinas. El plegamiento, especialmente en las zonas occidental y central, se ajusta a un patrón tectónico de compresión característico del piedemonte andino oriental, donde predominan pliegues estrechos y asimétricos asociados a sistemas de cabalgamiento (Navarro et al., 2019).

8.3. Falla Río negro

La Falla Río Negro es una fractura regional con rumbo general N40°W que, en la mayor parte de su trazo, sigue el curso del río Negro o, en algunos sectores, adopta una disposición semiparalela. Su influencia sobre la configuración del relieve en el sector se evidencia en

diversos indicios: presencia de metamorfitas devónicas, como las cuarzoarenitas de la Formación Gutiérrez; desarrollo de zonas cataclásticas asociadas; fracturación persistente en cuarcitas y filitas; discontinuidad e inversión de secuencias en terrazas fluviales; y ocurrencia de deslizamientos. Estos rasgos permiten inferir que la estructura, o sus fallas satélites, han presentado actividad tectónica durante el Cuaternario Coviandes (2019).

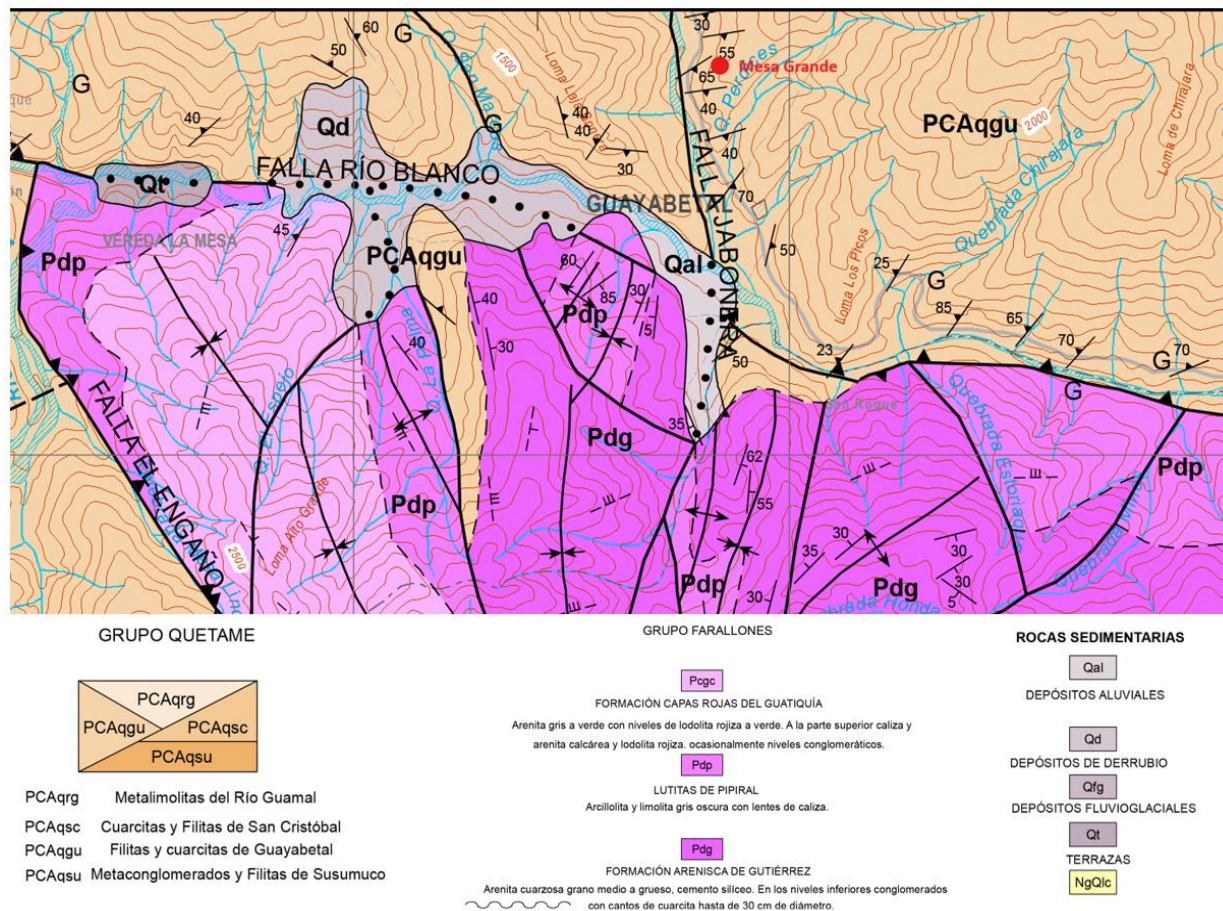
Otros elementos que refuerzan esta interpretación incluyen la existencia de cuencas de tracción (*pull-apart basins*), terrazas cuaternarias aisladas, surgencias termales y valles colgados recientes como el de Quetame. La expresión morfológica de la falla se manifiesta mediante facetas triangulares, drenajes rectilíneos, patrones de encajonamiento enrejado, valles en “V” de los ríos Negro y Blanco, pendientes estructurales, quiebras o sillas de falla, topografías escalonadas, así como estrías y superficies pulidas por fricción, todos ellos rasgos característicos de áreas sometidas a deformación tectónica regional (Ingeominas, 1998).

8.4. Falla Jabonera

La Falla Jabonera es una estructura inversa con dirección general NNW que afecta rocas precámbricas del Macizo de Quetame, controlando gran parte del cauce del río Negro y favoreciendo el desarrollo de un valle aluvial con presencia de depósitos cuaternarios. Con rumbo aproximado N20°E, sigue un trazo por la quebrada Seca, modificando parcialmente el curso de los ríos Negro y Blanco, e incidiendo directamente sobre las rocas del Grupo Quetame Coviandes (2019).

En algunos tramos ha sido descrita como una falla normal con orientación N-S, que actúa como control estructural del río Negro hasta su confluencia con el río Blanco, encontrándose en ciertos sectores cubierta por depósitos cuaternarios.

En la zona de estudio, además del fallamiento principal, se reconocen estructuras menores asociadas, como pliegues anticlinales y sinclinales desarrollados principalmente sobre las Areniscas de Gutiérrez, las Lutitas de Pipiral y las Capas Rojas del Guatiquía. Estos plegamientos presentan direcciones que varían entre N-S y N20°E, con estructuras relativamente estrechas (Servicio Geológico Colombiano et al., 2019).

Tabla 3. Geología del sector Guayabetal

Nota. Tomado de Plancha Geológica 266 Villavicencio

8.5. Antecedentes Geológicos

En este apartado se expondrán las causas que afectan la ladera suroccidental del kilómetro 58 (km 58), correspondiente a una terraza de origen aluvial o fluviotorrencial. Esta terraza forma parte de un conjunto más amplio de terrazas similares que se encuentran desde antes del km 58, como las terrazas de Monte Redondo, las cuales también han sufrido procesos de degradación debido a movimientos sísmicos y deslizamientos provocados por los períodos torrenciales ocurridos en la región. (Dávila et al., 2021).

Aunque los primeros indicios visibles de inestabilidad en la terraza de Mesa Grande se remontan al año 2013, fue a partir de las lluvias intensas ocurridas en agosto de 2018 cuando se evidenciaron impactos severos sobre la vía Bogotá-Villavicencio en operación y el Túnel 13. De acuerdo con estudios previos, la inestabilidad del sector responde a una combinación de factores

naturales y antrópicos. Entre los factores naturales destacan la geología, la topografía, la geomorfología, la alta pluviosidad y la sismicidad regional. Por su parte, los factores antrópicos como la deforestación, el cambio en el uso del suelo y la modificación de los patrones naturales de drenaje han tenido un papel determinante en la aceleración de estos procesos. A diferencia de los condicionantes naturales, estos últimos pueden ser gestionados con mayor facilidad (Coviandes SAS, 2019; IGL-Hidroconsulta, 2017).

8.6. Antecedente de la terraza Quebrada Blanca

El primer evento de deslizamiento significativo en esta zona ocurrió en junio de 1974, cuando un deslizamiento masivo causó pérdidas fatales, con más de un centenar de vidas humanas, además de interrumpir la vía Bogotá-Villavicencio durante más de un año. Este evento obligó a la construcción de una variante, actualmente conocida como la vía antigua o calzada primera, que incluye dos túneles continuos con una separación mínima entre ellos. Asimismo, se construyó un puente sobre la Quebrada Blanca, cerca del punto donde esta desemboca en el río Negro (Dávila et al., 2021).

8.7. Erosión en la terraza Mesa Grande

Impacto en las terrazas: Tanto la terraza de Quebrada Blanca como la terraza del km 58, conocida como Mesa Grande, así como las terrazas adyacentes, han sufrido graves problemas de inestabilidad y erosión. Estos procesos han aumentado la vulnerabilidad de la zona ante deslizamientos y otros fenómenos geotécnicos. Desde 2017, se ha observado un proceso de erosión lineal y carcavamiento que comienza desde el borde superior de la terraza Mesa Grande, situada a unos 200 metros de altura sobre la carretera. Estos problemas de erosión y carcavamiento han generado preocupación entre la concesionaria y los consultores, debido a los riesgos que suponen para la estabilidad del terreno y la seguridad vial en el sector. (Dávila et al., 2021).

8.8. Geología del sector y características del terreno

El corredor Bogotá–Villavicencio atraviesa la Cordillera Oriental de los Andes colombianos, una zona geológicamente activa, con topografía escarpada, suelos coluviales y formaciones de lutitas y rocas sedimentarias fuertemente fracturadas. Este tipo de materiales tiene baja cohesión y alta susceptibilidad a la saturación por agua, lo que incrementa notablemente la posibilidad de remoción en masa. En el kilómetro 58, estudios realizados identificaron una ladera compuesta en gran parte por depósitos de terraza y zonas con fracturas en el macizo rocoso. Estas condiciones favorecen la infiltración de agua y debilitan la estabilidad del terreno, especialmente cuando se presentan lluvias continuas o se realizan intervenciones sin medidas adecuadas de refuerzo. (Ingeniería y Georriesgos IGR SAS, 2019).

Los estudios geotécnicos y geológicos desarrollados entre finales de 2012 y comienzos de 2013 determinaron que el Túnel 13 y el Portal 26, ubicados bajo la meseta de Mesa Grande, fueron construidos sobre un terreno clasificado como terraza aluvial de origen fluviotorrencial. Este depósito está compuesto por bloques, cantos y gravas subredondeadas de origen cuarcítico y filítico, contenidos en una matriz blanda con textura areno-limosa a limo-arcillosa. Durante la construcción, se observó una humedad generalizada de nivel medio en el terreno, atribuida a la presencia de agua subterránea, aunque sin evidencia de flujos activos (Geoandina SAS, 2019).

En el sector comprendido entre la vía Bogotá–Villavicencio y la meseta de Mesa Grande (K58), se identificaron tres procesos activos de remoción en masa. Estos movimientos han generado erosión, así como el desprendimiento de flujos de detritos y bloques de gran tamaño que alcanzan la vía existente. Como resultado de esta inestabilidad, se han producido caídas de material de gran volumen, lo cual ha ocasionado cierres temporales de la calzada en operación (Geoandina SAS, 2019).

Figura 18. Procesos de remoción en masa y caída de detritos a la vía existente desde la ladera suroccidental de Mesa Grande. Izquierda

Proceso más cercano a Bogotá (1)



Proceso más cercano a Villavicencio (2)



Nota. Tomado de Geotecnia Andina Consultores SAS (2019, p4)

Figura 19. Proceso de remoción en masa generado en mayo de 2019 en la ladera suroccidental de Mesa Grande K58.

Proceso ubicado entre los dos mostrados en la imagen anterior (3)



Nota. Tomado de Geotecnia Andina Consultores SAS (2019, p5)

Figura 20. Vista general de los procesos de remoción en masa en la ladera suroccidental de Mesa Grande K58



Nota. Tomado de Geotecnia Andina Consultores SAS (2019, p6)

En el tramo comprendido entre la quebrada Seca y la confluencia de los ríos Blanco y Negro, la zona de Mesa Grande se encuentra sobre depósitos de origen fluvio-torrencial. Estos materiales presentan morfologías predominantemente planas o lobuladas, con inclinación hacia el cauce del río Negro, y se extienden a lo largo de la margen izquierda de dicho río y de la margen derecha del río Blanco. Se evidencia un posible control estructural de estos depósitos asociado a la influencia de la Falla Río Blanco. Las terrazas alcanzan espesores cercanos a los 200 metros, con escarpes casi verticales que muestran estratos clasto-soportados y matriz-soportados, con una matriz limo-arenosa a areno-limosa. En estos estratos se observan intercalaciones que sugieren eventos periódicos de flujo con arrastre de bloques de hasta 2 metros de tamaño, de formas angulosas, en depósitos de consolidación intermedia (Coviandes S.A.S., 2019).

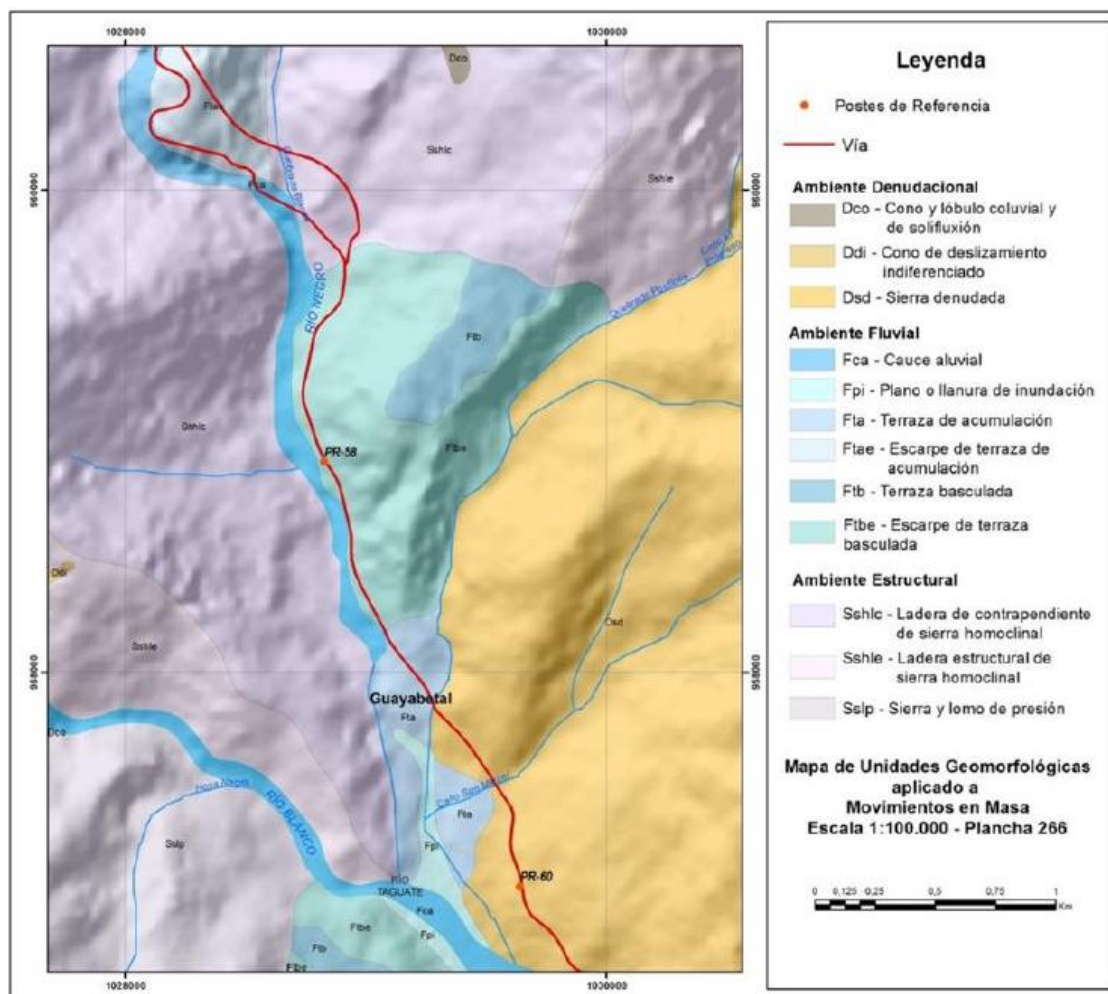
En la zona de Mesa Grande se reconocen diversos depósitos de origen cuaternario, entre los que se incluyen coluviones, aluviones y terrazas fluviotorrenciales. Estos materiales cubren

una porción considerable del terreno y están asociados a las márgenes de cuerpos de agua como el río Negro. Las terrazas pueden alcanzar espesores importantes y, junto con los coluviones saturados, están directamente relacionados con los fenómenos de inestabilidad que afectan la región (Ingeniería y Georriesgos IGR SAS. (2019).

8.9. Geomorfología

Desde el enfoque geomorfológico, el sector del kilómetro 58 presenta una alta susceptibilidad debido a la presencia de unidades relacionadas con ambientes fluviales, como terrazas basculadas y escarpes asociados. Estas geoformas, que resultan tanto de procesos agradacionales como degradacionales, presentan una configuración estructural que las hace especialmente propensas a la ocurrencia de movimientos en masa (INGEOMINAS, 2011).

El corredor vial Bogotá–Villavicencio, y en particular el sector correspondiente al kilómetro 58, se encuentra emplazado en la parte norte del cinturón orogénico andino, dentro de la provincia geomorfológica de la Cordillera Oriental. Esta zona presenta un relieve profundamente encañonado, influenciado por procesos denudacionales intensos y por una marcada tectónica regional que ha generado una alta densidad de fracturamiento. Estas condiciones están asociadas a la presencia de corredores de fallas activas, cuya manifestación en superficie incluye escarpes, terrazas deformadas y drenajes controlados estructuralmente. Como resultado, los ambientes morfogenéticos predominantes en el área son de tipo fluvial, estructural y denudacional (SGC & UPTC, 2018; INGEOMINAS, 2011).

Figura 21. Unidades geomorfológicas presentes en la zona del km 58 y alrededores

Nota. Tomado de SGC y UPTC (2018)

8.9.1 Ambiente denudacional

En la región del km 58, el paisaje presenta geoformas que han sido modificadas progresivamente por la acción conjunta de la meteorización, la erosión y los procesos de transporte tanto gravitacional como pluvial. Estas dinámicas han suavizado las formas del relieve original, dando lugar a terrenos de menor altitud, con cimas redondeadas típicamente asociadas a procesos erosivos prolongados. El sector presenta una alta susceptibilidad geológica debido a la presencia de depósitos fluviotorrenciales no consolidados, los cuales están dispuestos en estratos con variabilidad granulométrica, desde materiales finos hasta bloques de gran tamaño. Estos depósitos están expuestos a procesos de meteorización que afectan sus propiedades

geomecánicas, reduciendo su resistencia y favoreciendo la aparición de condiciones de inestabilidad en el terreno (INGEOMINAS, 2011).

9. Clima

Los deslizamientos asociados a precipitaciones son frecuentes en diferentes regiones del mundo y constituyen un riesgo considerable para las obras de infraestructura. Investigaciones realizadas en el proyecto de control hídrico de Xiajiang analizaron de manera detallada estos procesos, incorporando el seguimiento de aguas subterráneas, presiones internas y propiedades mecánicas de los materiales inestables. Dichos estudios demostraron que la infiltración pluvial modifica los niveles freáticos y genera pérdida de estabilidad en las capas superficiales. Además, se confirmó que la interacción entre el agua, el suelo y la roca de base desempeña un papel determinante en el comportamiento de los taludes, lo que resalta la necesidad de aplicar medidas de ingeniería que reduzcan la probabilidad de ocurrencia de estos movimientos.

El municipio de Guayabetal presenta una temperatura promedio cercana a los 23,5 °C y un régimen de precipitaciones anuales que alcanza los 5.300 mm. Estas condiciones, sumadas a la variabilidad altitudinal de su relieve, generan múltiples pisos térmicos y depresiones fluviales, lo cual incrementa la complejidad climática de la zona. Esta combinación de factores hace que el clima actúe como un detonante significativo para la ocurrencia de movimientos en masa (Díaz Martínez & Zapata de Hoyos, 2020).

El área objeto de estudio se encuentra ubicada en la vereda Mesa Grande, jurisdicción del municipio de Guayabetal, al oriente del departamento de Cundinamarca. La región presenta un clima muy húmedo, con temperaturas promedio entre 18 °C y 24 °C, y una precipitación anual estimada entre 2.000 y 4.000 mm. Las altitudes oscilan entre los 1.000 y 2.000 metros sobre el nivel del mar, en un entorno montañoso con condiciones ambientales de humedad elevada (Coviandes S.A.S., 2019).

Se registraron lluvias de gran intensidad y duración, principalmente desde la última semana de agosto hasta mediados de octubre de 2018, las cuales provocaron saturación del terreno y represamientos en quebradas cercanas como Quebrada Seca (Geoandina SAS, 2018).

9.1. Inestabilidad progresiva de la Terraza Mesa Grande por escorrentía

El proceso de inestabilidad que afecta a la ladera suroccidental de la Terraza Mesa Grande, al Portal 26 y a los últimos 200 metros del Túnel 13 posiblemente extendiéndose hacia

otros 200 metros adicionales se debe a movimientos activos de remoción en masa. Estos procesos involucran volúmenes considerables de material, desde miles hasta más de un millón de metros cúbicos, y se originan principalmente en la nariz de la terraza y la divisoria de aguas. La principal causa de esta remoción progresiva ha sido la saturación del terreno, acompañada de agrietamiento y debilitamiento estructural, exacerbada por lluvias intensas ocurridas entre agosto y octubre de 2018, y nuevamente desde febrero de 2019. Estos eventos están además influenciados por un aumento en la intensidad y frecuencia de las precipitaciones, posiblemente relacionado con el cambio climático (Geoandina SAS, 2019).

Durante los últimos años se ha observado un aumento en la intensidad y frecuencia de las lluvias en la región, acompañado de una mayor cantidad de días con precipitaciones que superan los promedios históricos. Este comportamiento climático tuvo manifestaciones significativas entre 2010 y 2011, y nuevamente en 2018, provocando afectaciones generalizadas sobre la infraestructura vial, incluyendo la ocurrencia de fenómenos de remoción en masa en sectores vulnerables como Mesa Grande (Coviandes S.A.S., 2018).

El análisis de las condiciones climáticas en el sector del kilómetro 58 evidencia que el factor climático tiene una influencia crítica en la generación de movimientos en masa. En particular, se ha identificado que las precipitaciones extremas, con valores diarios que pueden superar los 220 mm en 24 horas, representan un detonante significativo de procesos de remoción de masa en la zona (INGEOMINAS, 2011).

9.2. Red hidrográfica y drenaje

La zona de influencia presenta una red hidrográfica conformada por diversas microcuencas que descargan sus aguas hacia el río Negro, considerado la corriente principal del sistema. El patrón de drenaje predominante en esta cuenca es de tipo dendrítico, caracterizado por la disposición ramificada de los cauces. Entre los cuerpos de agua identificados durante los recorridos de campo se encuentran el río Negro, la quebrada Perdices, la quebrada San Miguel y la quebrada Seca (Coviandes S.A.S., 2019).

Los cauces identificados en la zona de estudio corresponden morfológicamente a sistemas de piedemonte y valle aluvial, ubicados principalmente en sectores de ladera. Estos cuerpos hídricos se caracterizan por presentar pendientes pronunciadas y altas velocidades de

flujo, especialmente en los tramos que cruzan la vía. Debido a su localización en zona montañosa, todos los cauces permanecen confinados dentro de canales naturales, sin desarrollar planicies de inundación amplias (Coviandes S.A.S., 2019).

La zona de estudio se clasifica dentro de un régimen de lluvias moderadas a altas, con intensidades que superan los 30 mm/hora. En eventos extraordinarios, las precipitaciones pueden alcanzar valores superiores a los 78 mm/hora para tormentas con períodos de retorno mayores a 50 años y duraciones de 10 minutos. Para precipitaciones de una hora, se han reportado intensidades de hasta 30 mm/hora. Es importante resaltar que durante el año 2018 se registraron lluvias significativamente superiores al promedio histórico, destacando el mes de agosto, en el que se acumuló un total de 684 mm, con un máximo diario de 176 mm el 26 de agosto, equivalente al 26 % del total mensual (Coviandes S.A.S., 2019).

9.3. Precipitación

La precipitación es uno de los factores climáticos más relevantes en la evaluación de la estabilidad de taludes, ya que influye directamente en los niveles de humedad del suelo, la infiltración y la presión de poros. En zonas montañosas como la del kilómetro 58 de la vía Bogotá–Villavicencio, las lluvias intensas o prolongadas pueden acelerar procesos de saturación y disminuir la resistencia de los materiales, aumentando el riesgo de deslizamientos. El análisis de los registros históricos permite comprender la variabilidad temporal y estacional de este fenómeno, así como su posible relación con eventos de remoción en masa en el área de estudio (E.D.L. SAS & Coviandes, 2019).

Con el fin de caracterizar el comportamiento de las lluvias en el área de influencia del kilómetro 58, se utilizaron registros históricos de precipitación provenientes de estaciones meteorológicas administradas por el IDEAM. Estos datos, que incluyen valores mensuales y promedios anuales, permiten identificar patrones estacionales y periodos de mayor intensidad pluviométrica, constituyéndose en un insumo clave para el análisis hidrometeorológico y la evaluación de la amenaza por movimientos en masa en el sector (E.D.L. SAS & Coviandes, 2019).

Figura 22. Localización de las estaciones hidroclimáticas Monterredondo y Susumuco

Nota. Tomado de Google earth, modificado por Hidroconsulta, (2017)

Tabla 4. Precipitación mensual (mm) Estación Monterredondo

AÑO	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Precip. Prom
1990	71,3	35,8	156,2	249,8	351,2	401,3	279,1	305,9	174,0	134,6	45,8	81,9	190,63
1991	4,0	91,7	62,6	153,4	275,3	320,6	440,4	444,7	222,4	125,8	92,4	23,4	188,89
1992	30,4	17,1	99,0	223,9	217,9	252,6	467,4	317,4	274,4	154,1	96,1	49,3	183,90
1993	88,4	18,5	231,4	286,3	269,5	355,9	428,5	354,1	179,1	198,7	134,1	75,5	216,67
1994	97,5	68,4	117,5	215,4	439,0	358,1	506,3	396,9	174,7	221,1	90,1	64,0	224,17
1995	48,1	4,2	108,1	213,9	310,9	338,6	177,8	273,5	234,2	138,8	56,2	59,7	163,67
1996	14,3	187,3	52,9	219,5	320,8	242,1	497,9	250,9	312,0	114,0	121,0	112,0	203,76
1997	36,2	101,0	106,0	185,0	444,0	211,0	503,0	366,0	215,0	191,0	79,0	37,0	206,18
1998	11,0	83,0	94,0	271,0	328,0	591,0	454,0	272,0	118,0	219,0	175,0	76,0	224,33
1999	101,0	111,0	114,0	308,0	342,0	314,0	309,0	266,0	221,0	282,0	139,0	65,0	209,75
2000	40,0	77,0	145,0	130,0	461,0	210,0	334,0	328,0	240,0	240,0	156,0	107,0	210,53
2001	15,0	30,0	100,0	197,0	561,0	379,0	308,0	357,0	264,0	172,0	171,0	175,0	210,75
2002	14,0	5,0	176,0	239,0	399,0	477,0	321,0	334,0	245,0	155,0	171,0	80,0	218,00
2003	0,0	17,0	105,0	216,0	270,0	258,0	436,0	334,0	265,0	145,0	113,0	55,0	184,33
2004	17,0	116,0	119,0	209,0	315,0	650,0	410,0	351,0	269,0	172,0	145,0	33,0	231,75
2005	107,0	87,0	54,0	334,0	413,0	446,0	303,0	306,0	293,0	158,0	126,0	48,0	222,52
2006	112,0	31,0	249,0	235,0	300,0	404,0	323,0	446,0	277,0	204,0	161,0	40,0	232,25
2007	11,0	21,0	166,0	198,0	250,0	497,0	257,0	426,0	268,0	116,0	149,0		209,00
2008	28,0	76,0	47,0	157,0	356,0		439,0	243,0	295,0	168,0	191,0	93,0	191,18
2009	99,0	38,0	165,0	231,0	178,0	435,0	310,0	362,0	229,0	134,0	72,0	55,0	154,33
2010	5,0	88,0	271,0	362,0	301,0	302,0	487,0	235,0	234,0	176,0	153,0	215,0	235,75
2011	32,0	64,0	189,0	218,0	382,0	195,0	346,0	213,0	229,0	240,0	192,0	115,0	201,58
2012	22,0	90,0	255,0	316,0	354,0	378,0	426,0	355,0	249,0	215,0	117,0	122,0	241,58
2013	8,0	126,0	136,0	221,0	409,0	236,0	447,0	248,0	172,0	169,0	113,0	101,0	198,33
2014	27,0	77,0	105,0	339,0	266,0	447,0	412,0	428,0	184,0	158,0	84,0	93,0	217,83
2015	89,0	64,0	136,0	304,0	241,0	443,0	446,0	312,0	164,0	171,0	144,0	76,0	215,83
2016	5,0	65,0	120,0	299,0	402,0	312,0	279,0	536,0	285,0	178,0	124,0	96,0	229,25
2017	91,0	87,0	155,0	190,0	456,0	422,0	465,0	272,0	293,0	238,0	167,0	73,7	245,81
2018	68,6	5,5	77,9	253,6	514,6	392,1	386,7	501,0	246,5				271,84
PROM	40,18	59,91	121,85	227,32	322,77	368,16	373,95	323,06	227,22	171,44	119,10	75,98	

Nota. Tomado de E.D.L. SAS & Coviandes, (2019)

Tabla 5. Precipitación mensual (mm) Estación Bunker 1 – Bunker Tablon

Año	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Precip. Promedio
2009	44,4	23,3	114,4	155,7	112,5	181,9	181,2	203,3	90,5	89,9	48,9	21,5	103,6
2010	1,1	50,9	111,9	227,5	226,7	133,4	183,4	79,8	111,2	112,8	164,5	186,2	182,5
2011	15,2	134,3	258,1	407,3	429,6	241,8	281	221	189	285,1	310,2	120,5	241,1
2012	26,7	130,9	352,2	462	359,9	372,9	423,5	133,8	81,6	86,2	52,5	59,3	211,8
2013	6,3	114,7	160,4	248,1	517,6	245,3	450,3	278,7	69,2	225,4	246,8	92,4	221,3
2014	31,6	52,8	109,5	125,3	104,6	469,2	403,2	142,9	213,5	171,7	130,5	113,9	172,4
2015	81,7	62,3	106	328,6	660,8	788	589,2	395,5	288	158,6	146,5	43,9	304,1
2016	0,7	150,6	135	248,4	146,4	391,8	421,2	671,4	450	284,4	322,2	54,3	279,0
2017	42,6	150,6	279,8	244,2	333,6	331,8	136,2	0	223,8	225	0	0	164,0
2018	18,6	124,2	4,2	105,3	171	162		120,9	105	76,5			98,8
2019													
PROM	26,9	99,5	163,2	255,2	306,3	331,8	341,0	224,7	182,2	171,6	158,0	76,9	

Nota. Tomado de E.D.L. SAS & Coviandes, (2019)

Tabla 6. Precipitación mensual (mm) Estación Susumuco

AÑO	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Precip. Promedio
1990	140.6	180	475.8	440.1	673.1	619.4	625.9	416.3	480.9	230.2	310.6	258.6	404.3
1991	60.2	158.6	124.6	430.8	844.5	767.2	938.5	561.2	597.4	325.8	301.5	31.5	428.5
1992	94.1	49.7	254.9	265.4	548.4	585.8	597.8	529.6	474	451.2	250.5	143.8	353.8
1993	257.2	69.3	389.7	666.7	584.6	679	774.4	385.5	556.8	482.4	163.8	191	433.4
1994	74.1	103.3	95.2	382.5	1031	896	886	621	464	518.2	267.6	205	462.0
1995	236.8	25.5	190.5	397	713.4	582.5	397.4	261.7	676.4	288.8	297.5	142.4	390.8
1996	43.3	493.7	158	476.5	731.1	487.4	734.7	517	559.2	261.7	320.3	313.1	424.7
1997	64.1	288.3	169.2	619.3	877.6	594.5	653	665.7	460.9	535.3	192.4	52.1	431.0
1998	23.2	268.4	256	547	635.9	948.4	885.4	499.9	368.5	442.5	312.2	163	445.9
1999	182	215	184	600.8	538	618.8	577.2	480.2	477.3	483.5	376.2	167.1	409.2
2000	46	137.2	165.2	336.4	967.7	467.8	524.3	659.1	573.7	553.7	292.8	324.2	420.7
2001	35.5	64.9	222.1	407.3	748.6	705	471.6	577.7	636.9	328.8	427.1	235.8	405.1
2002	51.6	23.2	311.3	444.1	752	836	679.6	686.7	476.2	626	306.8	218.7	451.0
2003	1.5	37.2	194.2	414.7	594	612.2	605.9	664.7	469.8	287.1	263.7	277.9	369.4
2004	71	304.5	225.1	502.5	836.1	1052	842.8	561	579.2	427	462	67	494.2
2005	83	167	168	608	813.2	750.5	706.6	472.8	686.5	349.6	369	169	445.3
2006	288.7	80.1	421.8	483.9	542.2	568.9	509.6	766.4	599.7	404.5	325	112.7	425.3
2007	50.4	29.3	235.5	523.5	438.5	726.2	512.9	629.9	466.6	323.2	448	163.1	378.9
2008	19	71	111.6	211.1	818		766.6	526.2	485.4	432.9	290.5		373.2
2009	156.9	74	368.5	525.3	338.8		493.2	604.4	454.4	278	190.4	101.9	326.0
2010	0	214.5	398.1	522.2	622.7	595	706.5	363.7	338.9	277.2	341.3	388.1	397.4
2011	86.3	41.3	215.4	456.7	690.7	471.1	510.9	403	423.7	235.5	346.6	159	336.7
2012	7	127	338	551	612	596	588	560	371	349	278	322	391.6
2013	6	150	328	488	622	484	710.6	402.7	413	358	166.3	190	359.9
2014	91	95	191	656	468	859	767	577	326	265	199	191	390.4
2015	215	65	196	469	633.4	550	717	511	354.8	310.4	392.8	216	385.9
2016	2.2	49.7	171.3	715.9	668.5	470.6	506	948	575.5	361	453.4	368.6	440.9
2017	133.8	74.8	544.2	395.3	1096.8	857	610.5	575	597.2	458	363.1	210	493.0
2018	170.5	11.2	216.5	435.7	1083	837.4	674.3	897	643	335	207	72	465.2
2019	102	35.6	437.9	327.1	662.45								313.0
PROM	95.7	146.1	244.6	486.7	694.9	719.2	665.3	573.2	491.6	422.4	326.6	211.2	

Nota. Tomado de E.D.L. SAS & Coviandes, (2019)

Tabla 7. Precipitación mensual (mm) Estación Galeria T3A – Oro Perdido

Año	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Precip. Promedio
2009	61,2	29,3	137,7	190,8	137,5	221,7	223,9	256,4	136,2	111,2	61,8	31,8	133,3
2010	3,5	65,3	158,4	271	266,1	199	279,5	127,5	147,6	192,8	179,6	211,6	169,7
2011	25,4	65,8	148	225,9	283,3	162,8	210,7	152,5	149,4	177,4	175,6	80,7	154,8
2012	16,4	76,3	207,4	271,9	244,9	261,1	286,1	327,8	208,2	205,7	126,4	141	197,8
2013	4,2	79,6	109,4	173,3	317,9	172,2	307,4	184,1	174,1	144,7	121,7	68,1	154,7
2014	29,4	48,1	76,3	314,1	253,9	326,5	282,9	357,7	138,6	113,6	77,8	73,1	173,4
2015	65,1	42,5	95	246,4	215,7	323,7	341,4	229,3	159,8	136	133	65,6	171,1
2016	2,9	55,6	69,9	225,2	215,8	248,5	249,8	406,1	248,6	95,7	169,2	66	171,1
2017	58,2	59,1	72	109,9	133,2	211,8	140,4	110,1	152,1	83,4	57,9	30,6	101,6
2018	25,9	6,9	8,4	89,4	148,8	187,8		179,4	82,2	61,8			87,8
PROM	28,6	52,4	108,3	211,8	221,7	231,5	258,0	233,1	159,7	126,2	121,9	85,4	

Nota. Tomado de E.D.L. SAS & Coviandes, (2019)

Tabla 8. Precipitación mensual (mm) Estación Zona servicio- Puente Quetame

Año	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Precip. Promedio
2009	92,8	98,4	178,4	248,1	178,9	396,6	299,5	361,4	219,2	189,4	78,8	51,7	184,4
2010	3,6	91,2	247,2	347,8	317,6	296,3	449,6	213,3	216,4	170,9	175,2	220	228,6
2011	34,5	63,4	178,6	241	377	210,6	318,2	210,2	221,2	221,5	199,7	108,4	198,7
2012	19,3	86,1	250,6	322	345,6	371,3	396,8	365,4	241,3	222,6	135,5	148,3	242,1
2013	6,7	115,9	145,8	229	395,5	237	426,2	241,7	194,2	177,7	121,3	98,3	198,8
2014	31,2	68,2	103,5	353	278,4	444,7	401,4	409,3	181,9	153,2	91,5	94,9	217,6
2015	92,4	57,8	122,8	292,9	426,6	697,5	518,7	292,6	199,6	167,8	161,8	84,1	259,6
2016	3,5	67,5	135	268,5	282,6	273,6	273,3	446,7	262,2	144,9	157,8	95,8	201,0
2017	24,9	18,9	28,2	85,9	166,8	167,7	405,6	165	156,9	699,3	118,8	32,7	172,5
2018	76,7	0						179,4	90	68,1			82,8
2019		2,4	0										1,2
PROM	38,5	55,3	138,3	264,7	307,7	337,3	387,0	288,5	198,3	216,5	137,8	103,8	

Nota. Tomado de E.D.L. SAS & Coviandes, (2019)

Tabla 9. Precipitación mensual (mm) Estación Quebrada Blanca

Año	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Precip. Promedio
2009	27,8	40,9	181,7	255,1	180,8	396,6	323,3	397,9	246	145,8	81,9	58,4	195,5
2010	9	98,2	279,2	378,6	327,7	324,8	501,1	243,5	240,9	183,6	169,5	265,5	251,4
2011	32,8	63,7	190,3	238,3	406	221,3	356,9	227,8	243,8	239,5	204,8	118	212,0
2012	21,7	93,7	265,5	335	398,1	408,9	436,6	378,1	256,7	224,6	129,9	138,4	257,4
2013	7,9	127	151,7	242,7	419,7	255,6	466,2	239,7	191,1	184,6	117,7	107,8	211,0
2014	32,4	77,8	111,7	357,5	280,9	479,3	439,2	436,2	195	166	95,6	100,9	230,9
2015	99,2	63,6	139,7	315,4	272,7	447,6	464,8	325,8	179,3	181,3	164,2	87,3	228,4
2016	4,9	64,4	119,5	304						197,7	172,2	188,1	130,1
2017	39	76	100,9	65,4	219,3	267,6	342,9	231	225,3	165	79,2	23,4	152,9
2018	52,8	3	23,4	139,8	336,9	310,8	482,7	269,7	136,8	104,4	70,2	0	160,3
PROM	32,8	70,8	156,4	262,7	316,9	345,9	423,7	307,7	212,8	179,3	128,3	108,8	

Nota. Tomado de E.D.L. SAS & Coviandes, (2019)

Tabla 10. Precipitación mensual (mm) Estación Chirajara

Año	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Precip. Promedio
2009	133,9	60,3	291,8	414,4	277,5	154,7	421,8	516,7	367	223,7	146	83,5	257,6
2010	1,7	166,5	346,5	459,2	501,9	482,5	617,3	311,8	296,6	237,8	272,2	65,9	313,3
2011	66,3	49,7	204,2	370,1	574,3	370,6	445,5	331,4	349,7	235	289,6	141,7	285,7
2012	12,4	113,3	307,6	463,6	517,8	517,8	523,5	487,2	324,9	299,5	219,1	249,1	336,3
2013	6,6	139,5	257	388,9	559	391,1	609,1	343,9	324,5	288,3	147,1	156,3	299,3
2014	67,4	87,1	158,6	536,7	393,4	704,2	632,4	520	272,5	224,2	156,8	154,5	325,7
2015	168,2	63,9	173,5	408,5	492,5	508,6	617,4	497,7	286,5	259,7	303,6	165,7	323,8
2016	3,1	54,5	146,2	543,5						343,8	518,4	297	272,4
2017	193,5	100,5	129,6	33,6	470,1	20,4	190,8	341,1	443,7	243,6	182,1	138,9	207,3
2018	52,2			240,6	129,9	233,1	315,9	704,7	337,8	196,5	116,7	40,2	236,8
2019	57,3	17,1	7,2										27,2
PROM	69,3	85,2	202,2	385,9	432,9	375,9	486,0	443,8	333,7	255,2	235,2	149,3	

Nota. Tomado de E.D.L. SAS & Coviandes, (2019)

La información obtenida de las estaciones cercana a Mesa Grande demuestra, En los promedios mensuales de las siete estaciones pluviométricas (Chirajara, Quebrada Blanca, Puente Quetame, Oro Perdido, Susumaco, Búnker Tablón y Monterredondo) muestra un patrón climático con un primer pico de lluvias bien definido entre mayo y julio y un segundo incremento, menos intenso, hacia septiembre y noviembre.

10. Resultados

10.1. Línea de tiempo

En esta línea del tiempo se va a exponer brevemente los sucesos más relevantes ocurridos en el sector de Mesa Grande k58 vía Bogotá-Villavicencio.

10.1.1 1950-2007

Imágenes aéreas obtenidas por el IGAC entre 1950 y 2007, junto con el sobrevuelo realizado ese mismo año, evidenciaban que los taludes de las terrazas en la zona no presentaban signos de derrumbes ni de erosión superficial. Coviandes, (2019)

Figura 23. Fotografías aéreas del sector km 58



Nota. Tomado de Coviandes, (2019)

10.1.2 28 junio 1974

Deslizamiento catastrófico en Quebrada Blanca: en esta fecha se presentó un Movimiento en masa masivo de aproximadamente 750Mil m³ de tierra al sur del actual km 58, con aproximadamente 500 víctimas y un cierre prolongado de la vía por más de un año (Coviandes S.A.S., 2019).

Figura 24. Deslizamiento de quebrada blanca



Nota. Tomado de Noticias de Villavicencio, (2021)

10.1.3 2013

En el año 2013, las laderas ubicadas en la meseta de Mesa Grande presentaban condiciones de estabilidad aceptables, sin evidencias significativas de procesos de erosión activa o movimientos en masa de gran magnitud.

Figura 25. Laderas de la meseta en buenas condiciones

Nota. Tomado de Coviandes, (2019)

10.1.4 2016

En agosto del 2016 se identifican indicios iniciales de deterioro en las laderas ocasionados por procesos de erosión y flujo de detritos, posiblemente asociados a surgencias de agua provenientes del interior de la terraza. Algunos cierres viales fueron necesarios (Geoandina SAS, 2019).

Figura 26. Evidencias iniciales de erosión en laderas de la meseta

Nota. Tomado de Coviande, (2019)

Figura 27. Proceso erosivo superficie de la parte alta del talud por agua de escorrentía y a media ladera por afloramiento de agua de infiltración



Nota. Tomado de Coviandes, (2019)

Figura 28. Erosion a media ladera



Nota. Tomado de Coviandes, (2019)

Figura 29. Flujo de detritos que afecta la vía



Nota. Tomado de Coviandes, (2019)

10.1.5 2017

En octubre de 2017 se registró un deslizamiento de gran magnitud en la ladera sobre el Portal 26 del Túnel 13, el cual bloqueó los sistemas de drenaje y posiblemente ocasionó represamientos en la Quebrada Seca. Esta situación incrementó la saturación de la terraza, comprometiendo la estabilidad del túnel y de la ladera, y provocando desprendimientos de material en la zona aguas arriba del portal (Geoandina S.A.S., 2019).

Figura 30. Aparición de grietas importantes arriba del Portal 26



Nota. Tomado de Geoandina SAS, (2018)

Figura 31. Deslizamiento portal 26 y 27



Nota. Tomado de Geoandina SAS, (2018)

Figura 32. Erosión y deslizamiento en los taludes de Quebrada Seca

Nota. Tomado de Coviandes, (2019)

Figura 33. los procesos erosivos iniciados en periodos previos se intensificaron, provocando deslizamientos en la vía y derivando en eventos de remoción en masa

Nota. Tomado de Coviandes, (2019)

10.1.6 2018

En agosto de 2018 se registraron episodios de lluvias intensas (especialmente entre mayo y septiembre), con precipitaciones extremas, con hasta 270 mm de lluvia en solo 8 horas, las cuales incrementaron la saturación de las laderas en el sector de Mesa Grande, provocando numerosos deslizamientos a lo largo de la vía Bogotá–Villavicencio. Estos eventos generaron represamientos en la Quebrada Seca y altos niveles de infiltración en el Túnel 13. También se

registraron deslizamientos adicionales en la zona superior del portal 26 y 27, (Geandina SAS, 2018).

Figura 34. Proceso de remoción en masa que involucra todos los taludes perimetrales de Mesa Grande, impactando tanto la vía existente como la nueva calzada.



Nota. Tomado de Coviandes, (2019)

Figura 35. Remoción en masa que genera afectaciones sobre la nueva calzada.



Nota. Tomado de Coviandes, (2019)

También se registraron deslizamientos adicionales en la zona superior del portal 26 y 27, lo que afectó parte del puente que conecta los túneles 13 y 14.

Figura 36. portal 26 y 27

Nota. Tomado de Dávila et al., (2021)

Entre septiembre y octubre del 2018 tras los eventos anteriores, se produjo un desplazamiento generalizado en el hastial derecho del Túnel 13, así como fisuras y agrietamientos diagonales al eje del túnel en su interior (Dávila et al., 2021).

Figura 37. Desplazamiento hastial derecho

Nota. Tomado de Dávila et al., (2021)

Figura 38. Grietas diagonales con filtración de agua

Nota. Tomado de Dávila et al., (2021)

10.1.7 2019

En abril del 2019 después de varias semanas del inicio de la nueva época de lluvias, Se reportan al interior del túnel 13 nuevamente humedad, descascaramiento y fisuramiento tanto en el hastial izquierdo como derecho, (IGR SAS, 2019).

Figura 39. Hastial izquierdo

Nota. Tomado de Geoandina SAS, (2019 - Informe 9)

Figura 40. Hastatal Derecho

Nota. Tomado de Geoandina SAS, (2019 - Informe 9)

En el Portal 26 del Túnel 13 persisten las filtraciones de agua, junto con fisuras y la reaparición o ampliación de grietas que previamente habían sido selladas.

Figura 41. Agrietamiento portal 26

Nota. Tomado de Geoandina, (2019-infome 8)

En mayo de 2019, nueve meses después de los deslizamientos de 2018, se observan avances en los procesos de erosión, aunque también se aprecia cierta recuperación de la cobertura vegetal en la ladera izquierda de la Quebrada Seca.

Figura 42. Panorámica mayo 2019



Nota. Tomado de Dávila et al., (2021)

Del 14 al 15 de mayo de 2019, las intensas precipitaciones generaron un deslizamiento de material en el kilómetro 58 de la carretera Bogotá–Villavicencio, lo que ocasionó el cierre total de ambos sentidos de circulación. Para restablecer la movilidad, se desplegó equipo pesado, volquetas y personal operativo, mientras la ANI sugería emplear rutas alternas ante la alta susceptibilidad a nuevos eventos en la zona. (Semana, 2019).

Figura 43. Derrumbe y taponamiento de la vía

Nota. Tomado de Ardila, (2019)

El 8 de junio de 2019 se identificó una mancha blanca en la margen derecha de la Quebrada Seca, asociada a la falla de una pantalla de concreto lanzado. Además, se registró un nuevo deslizamiento en el Portal 26 del Túnel 13.

Figura 44. Panorámica junio 08 del 2019

Nota. Tomado de Ingeniería y Georriesgos, (2019)

Entre el 9 y 11 de junio, hubo diversos desprendimientos de material en la ladera de mesa grande los cuales taponaron la vía, se estima que la acumulación de este deslizamiento fue de 15.000 m³ de material (Burgos, 2019).

Figura 45. Desprendiendo de material 11 de junio 2019

Nota. Tomado de Burgos, (2019)

En la madrugada del **13 de junio de 2019**, un nuevo deslizamiento de gran magnitud se precipitó sobre el material acumulado en el kilómetro 58, incrementando de manera significativa el volumen a remover. Este evento obligó a suspender temporalmente las labores de limpieza por razones de seguridad, mientras se implementaban medidas de monitoreo permanente con radar terrestre, vigías y drones para evaluar la estabilidad de la ladera (ANI, 2019).

Figura 46. Nuevo deslizamiento K58, 13 de junio

Nota. Tomado de Caracol Radio, (2019)

El 15 de junio de 2019, un derrumbe de gran magnitud en el kilómetro 58 provocó el colapso de un puente de aproximadamente 30 metros ubicado entre los túneles 13 y 14 de la doble calzada Bogotá–Villavicencio, infraestructura que aún no había entrado en operación. Este evento agravó la emergencia generada por los deslizamientos de días anteriores, prolongando el cierre total de la vía y aumentando los riesgos en la zona (La República, 2019).

Figura 47. Colapso del puente Quebrada seca



Nota. Tomado de Ardila, (2019)

*"Durante junio de 2019, se estimó que más de **620 000 m³ de tierra** se desprendieron en el kilómetro 58, emergencia que incluyó el colapso del puente en la madrugada del 15 de junio del 2019." (Buitrago, 2025).*

10.2. Evolución de los Problemas de Inestabilidad en 2018 y 2019

Durante 2018 y 2019, la erosión registrada en la terraza Mesa Grande evolucionó hacia flujos de detritos y lodos, fenómeno que se produce cuando el suelo y los fragmentos rocosos se saturan de agua, formando una masa lodosa con capacidad para transportar bloques de gran tamaño provenientes de los diferentes estratos de la terraza. Estos movimientos de masa

impactaron directamente al túnel 13, ubicado bajo la vertiente suroccidental de la meseta, en la margen izquierda del río Negro. En los últimos 200 metros del túnel en dirección a Villavicencio comenzaron a aparecer fisuras y asentamientos, mientras que las filtraciones, inicialmente en forma de goteos, evolucionaron hasta convertirse en chorros de agua que comprometieron la estabilidad estructural. Como consecuencia, este tramo final presentó severos problemas de inestabilidad, a diferencia de los 500 metros restantes, que conservaron su estado original gracias a que mantenían las mismas condiciones geotécnicas y geológicas presentes al momento de su construcción (Dávila et al., 2021).

Figura 48. Localización del sector Q. Blanca a Q. Seca



Nota. Tomado de Geotecnia Andina Consultores S.A.S (2019)

19 de agosto de 2016. Ladera occidental de Mesagrande con los causes 1 a 3, en los cuales ya ocurrían flujos de detritos. Con el numero 4 el sitio del puente entre los túneles 13 y 14, y con el numero 5 un puente veredal construido por COVIANDES sobre el río Negro.

10.3. Intervención del Grupo Consultor (GCC)

El estudio del Grupo Consultor (GCC) se centró en el análisis y monitoreo de la ladera suroccidental de la meseta Mesa Grande, específicamente en la zona del túnel 13, y en los

problemas asociados al portal de salida de dicho túnel, ubicado cerca de la Quebrada Seca. Este portal estaba conectado con el túnel 14 mediante un puente, el cual fue destruido durante uno de los deslizamientos ocurridos en la zona (Dávila et al., 2021).

Figura 49. Panorámica del sector K58



Nota. Tomado de Geotecnia Andina Consultores S.A.S (2019)

El estudio del Grupo Consultor Coviandes señala que los daños progresivos en el túnel 13 están directamente vinculados con los procesos de inestabilidad que afectan la ladera suroccidental de Mesa Grande, en el kilómetro 58, así como la ladera suroriental asociada a la Quebrada Seca. Dichas inestabilidades se encuentran estrechamente relacionadas con la alta pluviosidad de la zona, que ha registrado episodios significativos de lluvias intensas, especialmente durante los eventos de La Niña ocurridos en 2010, 2011, 2017 y 2018 (Dávila et al., 2021).

Además de las precipitaciones, el análisis resalta la influencia de la actividad sísmica en la generación de inestabilidad. Se han registrado sismos de magnitud moderada, entre 3 y 4 en la escala de Richter, así como algunos eventos de mayor intensidad que podrían haber incidido en la estabilidad de la meseta (Dávila et al., 2021).

Otra causa relevante identificada es la infiltración de agua desde la parte superior de la terraza, originada no solo por la penetración de las lluvias, sino también por el funcionamiento

de la infraestructura avícola ubicada en la zona alta. Estas instalaciones han contribuido de manera significativa a la acumulación de humedad en la ladera, incrementando el riesgo de deslizamientos y agravando los problemas de inestabilidad en el sector (Dávila et al., 2021).

Figura 50. Grietas principales mapeadas desde septiembre de 2018-2019 (Planta).



Nota. Tomado de Geotecnia Andina Consultores S.A.S (2019)

EL deslizamiento del 19 de junio de 2019 finalmente produjo la afectación de la calzada Bogotá - Villavicencio, por el colapso de parte del túnel 13 y del puente que conecta al túnel 13 con el túnel 14

10.4. Comportamiento Hidrogeológico Post-Deslizamientos (2019)

Tras los deslizamientos ocurridos en mayo y junio de 2019, cuando se movilizaron grandes volúmenes de material en la ladera del kilómetro 58, fue posible comprender con mayor detalle el comportamiento hidrogeológico del sector. El estudio permitió identificar afloramientos de agua, tanto estacionales como permanentes, distribuidos a lo largo de la ladera. Desde esta perspectiva, la existencia de estratos con baja permeabilidad resulta determinante para la aparición de manantiales, los cuales favorecen la saturación del terreno y crean condiciones que incrementan la probabilidad de inestabilidad y deslizamientos (Dávila et al., 2021).

Figura 51. Afloramientos de agua en la ladera

Nota. Tomado de Geoandina, (2019)



Nota. Tomado de Geoandina, (2019)

Tanto el SCI como el Grupo Consultor Coviandes (GCC), a través de sus perforaciones, identificaron zonas con capas de materiales finos, como limos y arcillas, los cuales actúan como

barreras o planos preferenciales de flujo. Estas condiciones favorecen la acumulación de agua en ciertos niveles del subsuelo y su posterior afloramiento en forma de manantiales sobre las laderas.

Figura 52. Perforación



Nota. Tomado de coviandes, (2019)

10.5. Modificación de la Recarga por Intervención Antrópica

El Grupo Consultor Coviandes identificó que las modificaciones en el uso del suelo en la parte alta de la terraza alteraron de manera notable el sistema de drenaje superficial, provocando cambios en el subdrenaje por la alteración del patrón natural de recarga de agua. Los análisis técnicos del grupo evidencian que, tras la intervención humana en la meseta en particular con la instalación de infraestructura avícola se incrementaron significativamente los volúmenes de escorrentía y recarga. Este aumento ha incidido de forma directa en la estabilidad del terreno, favoreciendo una mayor infiltración en áreas críticas de la ladera (Dávila et al., 2021).

10.6. Erosión y cárcavamiento en las terrazas de Mesa Grande y Quebrada Blanca

Las terrazas de Quebrada Blanca, del kilómetro 58 conocida como Mesa Grande y otras cercanas han presentado notables problemas de inestabilidad y erosión, lo que incrementa su susceptibilidad a deslizamientos y otros eventos geotécnicos. Desde 2017 se registra un proceso de erosión lineal y formación de cárcavas que se inicia en la parte superior de Mesa Grande,

ubicada aproximadamente a 200 metros sobre la vía. Esta situación ha generado preocupación en la concesionaria y en los equipos consultores, debido a las implicaciones que representa para la estabilidad del terreno y la seguridad de la carretera (Dávila et al., 2021).

11. Análisis de resultados

Los deslizamientos en el kilómetro 58 son consecuencias de un proceso de inestabilidad que se había desarrollado durante varios años, impulsado por la interacción de factores naturales y humanos. Las características geológicas del terreno, combinadas con la acumulación de agua superficial y subterránea, generaron condiciones propicias para la falla, especialmente durante periodos de lluvias intensas. Las intervenciones en la zona, como excavaciones y modificaciones en el manejo de aguas, contribuyeron a acelerar el deterioro de la ladera. El comportamiento de los desplazamientos y las afectaciones estructurales observadas indica que la ladera y el túnel forman parte de un mismo sistema inestable, por lo que su manejo debe abordarse de forma conjunta. La recurrencia de eventos previos y la magnitud del de 2019 confirman que el sector mantiene una alta vulnerabilidad, lo que hace necesario implementar medidas de prevención y monitoreo permanente para reducir el riesgo de nuevos deslizamientos.

11.1. Excavación de túneles en terrenos inestables

La construcción de túneles en materiales no consolidados, como depósitos coluviales o rocas fracturadas, puede alterar el equilibrio de las laderas, debido a la reducción del soporte natural del terreno. Esto incrementa las tensiones de tracción y puede disminuir la resistencia de los suelos. En estos casos, se requieren medidas de estabilización como anclajes, pernos, revestimientos y drenajes profundos. En el caso del Túnel 13, en la vía Bogotá–Villavicencio, gran parte fue construido sobre depósitos de terraza en lugar de roca sólida, lo cual modificó los patrones de esfuerzo y la circulación subterránea del agua, contribuyendo a la desestabilización del terreno y al deslizamiento del km 58 (Ingeniería y Georriesgos IGR SAS, 2019; Sociedad Colombiana de Ingenieros, 2020).

11.2. Efectos de la deforestación sobre la estabilidad del terreno

La vegetación juega un papel fundamental en la estabilización de taludes. Las raíces refuerzan el suelo, reducen la humedad mediante la evapotranspiración y mejoran la estructura del terreno. Cuando se remueve la cobertura vegetal, el suelo queda más expuesto a la erosión,

aumenta la infiltración de agua y disminuye la resistencia al corte, elevando la probabilidad de deslizamientos (Díaz Martínez, 2020).

En la zona del km 58, se ha señalado que la deforestación, sumada a la actividad de la granja avícola Pollo Olímpico, alteró la escorrentía superficial e incrementó la erosión en la parte alta de la ladera, contribuyendo al deterioro progresivo del terreno (Coviandes SAS, 2019).

11.3. Condiciones climáticas y precipitación en la región

El área de Guayabetal se caracteriza por un régimen climático húmedo, con lluvias intensas que tienden a concentrarse durante la primera mitad del año, en particular entre abril y junio. Durante 2019, los reportes meteorológicos evidenciaron precipitaciones superiores a los promedios históricos, lo que ocasionó una elevada saturación de los suelos y un incremento en la presión de poros en las laderas susceptibles a inestabilidad.

Destaca que estos niveles de precipitación, combinados con la falta de un sistema de drenaje eficiente, aumentan significativamente el riesgo de deslizamientos. La escorrentía superficial no controlada también contribuye a la erosión y al desgaste de los taludes, debilitando aún más el terreno. (Leiva Ruiz, 2020).

En el sector del kilómetro 58, el comportamiento del agua superficial y subterránea está influenciado por la composición estratificada del terreno. La presencia de capas con distintas características, incluyendo niveles poco permeables, favorece que parte del flujo subterráneo se desplace de forma lateral en lugar de infiltrarse verticalmente. Este patrón, sumado al aporte de la escorrentía superficial, contribuye a la erosión y a la generación de condiciones que incrementan la inestabilidad de la zona (Dávila et al., 2021).

11.4. Intervención humana e infraestructura vial

El crecimiento y modernización de la carretera Bogotá–Villavicencio ha implicado obras de gran envergadura, como la construcción de túneles, viaductos y calzadas adicionales. Uno de los elementos más discutidos en relación con el deslizamiento del kilómetro 58 es la excavación del Túnel 13. Según la Sociedad Colombiana de Ingenieros (SCI, 2020), esta obra alteró el

equilibrio natural de la ladera al excavar en suelos poco consolidados, afectando la compactación del terreno y modificando el flujo de aguas subterráneas.

Además, otros factores como la deforestación, la expansión de actividades productivas (como la granja avícola cercana al punto del colapso) y el diseño deficiente de obras de drenaje han contribuido a la inestabilidad progresiva del sector. Las modificaciones en el entorno natural sin un adecuado análisis geotécnico aumentan la vulnerabilidad frente a eventos naturales (Dávila et al., 2021).

11.5. Gestión del riesgo y medidas de mitigación

La gestión del riesgo comprende un conjunto de estrategias encaminadas a reconocer, mitigar y vigilar las amenazas presentes en un territorio específico. En el sector del kilómetro 58 se han aplicado medidas como muros de contención, revestimientos en los taludes y la instalación de sistemas de monitoreo con sensores. No obstante, la recurrencia de los deslizamientos en la zona indica que estas intervenciones han resultado limitadas frente a la magnitud del problema.

El Ministerio de Transporte (2019) ha señalado la necesidad de adoptar estrategias más sostenibles, como la construcción de viaductos que permitan evitar los tramos más inestables. Además, es fundamental fortalecer los sistemas de alerta temprana y el monitoreo geotécnico constante, así como la planificación territorial basada en estudios técnicos rigurosos (Dávila et al., 2021).

12. Conclusiones

- Como resultado de la investigación hecha sobre los sucesos de mesa grande en el kilómetro 58 se puede concluir que los factores principales que influyen en la inestabilidad de la meseta son principalmente: factores topográficos, condiciones geológicas y geomorfológicas, Escorrentía tanto superficial como subsuperficial y la sismicidad.
- Con base en la información recopilada de las diferentes estaciones meteorológicas cercanas al sector, se establece que el Macizo de Quetame presenta un régimen de precipitaciones intensas, especialmente concentradas en los meses de mayo, junio y julio. Esta alta pluviosidad genera una saturación progresiva de las laderas, reduciendo la resistencia de los materiales y favoreciendo la ocurrencia de deslizamientos. La evidencia histórica confirma que estos factores han incidido de manera recurrente en eventos de inestabilidad, como los registrados en el km 58 de la vía Bogotá–Villavicencio, afectando la infraestructura vial y la seguridad del corredor.
- El deslizamiento del 2019 afectó de forma significativa la operación del corredor vial, generando cierres prolongados y altos costos de rehabilitación. Esto evidencia que la vulnerabilidad de la vía en este punto no se limita al evento puntual, sino que responde a una condición de riesgo permanente que requiere intervención y monitoreo constante para garantizar la seguridad de los usuarios.
- Los estudios de estabilidad global indican que la ladera presenta un deterioro continuo, evidenciado por erosión superficial, pérdida de vegetación en sectores críticos, incremento de infiltraciones y reactivación de grietas previamente selladas. Este proceso no es reciente, sino acumulativo, y se ha visto acelerado por la combinación de lluvias intensas y filtraciones subterráneas, algunas con indicios de contaminación antrópica.
- El sector de Mesa Grande, en el km 58 de la vía Bogotá–Villavicencio, se encuentra dentro del Macizo de Quetame, compuesto principalmente por filitas, cuarcitas y otras

rocas metamórficas altamente fracturadas. La presencia de fallas y discontinuidades, sumada a un alto grado de meteorización, genera materiales con baja resistencia al corte y alta susceptibilidad a procesos de inestabilidad. Estos rasgos estructurales condicionan la formación de superficies de deslizamiento y la pérdida progresiva de soporte en los taludes.

- En los primeros tres años analizados, el talud se mantuvo sin cambios relevantes. A partir de 2016 comenzaron a presentarse pequeños movimientos de tierra que, con el tiempo, se intensificaron hasta desencadenar en 2019 un derrumbe de gran magnitud. En la actualidad, estos deslizamientos continúan ocurriendo en el sector, lo que demuestra que el problema no ha sido resuelto.

13. Recomendaciones

13.1. Fortalecimiento del monitoreo geotécnico e hidrometeorológico

Instalar instrumentación permanente (inclinómetros, piezómetros, estaciones meteorológicas) para registrar variaciones en la presión intersticial, movimientos de la ladera y acumulación de lluvias. Estos datos deben integrarse en un sistema de gestión que permita activar alertas tempranas y tomar decisiones informadas para evitar cierres o emergencias mayores.

13.2. Optimización y mantenimiento de los sistemas de drenaje

El control de las aguas superficiales y subterráneas es una prioridad para reducir la presión intersticial y evitar la pérdida de resistencia en la masa inestable. Se recomienda:

- Construir cunetas revestidas de concreto en la coronación y en los pies de talud para conducir el agua fuera de la zona inestable.
- Instalar drenes horizontales profundos en las zonas de mayor saturación detectadas por los piezómetros
- Implementar zanjas de coronación y filtros en áreas donde el agua tiende a concentrarse.
- Programar mantenimientos antes y durante la temporada de lluvias para evitar que el material vegetal o sedimentos obstruyan el flujo del agua. Esta medida ataca directamente el factor condicionante más crítico identificado: la saturación del terreno.

13.3. Ampliación y actualización de los planes de gestión en otros puntos críticos.

Con base en la experiencia del km 58, se recomienda identificar y priorizar otros tramos del corredor con alta susceptibilidad a movimientos en masa. Para cada sector, se deben elaborar PGRD específicos sustentados en estudios geotécnicos, hidrológicos y de uso del suelo recientes,

asegurando la coherencia entre las medidas técnicas y las disposiciones de ordenamiento territorial.

13.4. Control y manejo de aguas superficiales

- **Construcción y mantenimiento de obras hidráulicas:** Ejecutar canales de coronación en la parte alta del talud, cunetas revestidas en las bermas intermedias y drenes transversales en las zonas de acumulación de agua, con el fin de interceptar y conducir la esorrentía hacia puntos de descarga seguros, evitando su infiltración directa en el macizo inestable.
- **Disipadores de energía y transiciones hidráulicas:** Instalar estructuras disipadoras de energía (cajas de caída, trampas de sedimento, escaleras hidráulicas) en puntos de descarga para disminuir la velocidad del flujo y prevenir erosión regresiva.

13.5. Mantenimiento y revisión post-intervención

- **Inspecciones periódicas:** Realizar revisiones trimestrales de todas las obras y sistemas de drenaje para verificar su funcionalidad y estado estructural.
- **Revisiones extraordinarias:** Efectuar inspecciones inmediatas después de lluvias intensas, eventos sísmicos o reportes de movimientos, implementando correcciones oportunas.

13.6. Recomendación para el desarrollo de estudios previos a futuras construcciones

Se sugiere realizar estudios geotécnicos, geológicos e hidrológicos detallados antes de ejecutar cualquier obra en el sector de Mesa Grande, con el fin de identificar las condiciones reales del terreno y los riesgos asociados. Estos estudios deben incluir análisis de estabilidad de taludes, comportamiento de aguas superficiales y subterráneas, así como la influencia de eventos climáticos extremos. La información obtenida permitirá diseñar obras con criterios de seguridad adecuados y minimizar la probabilidad de afectaciones por deslizamientos en el futuro.

14. Referencias bibliográficas

- Arunkumar, S. (2021). Soil water movement: saturated and unsaturated flow. *Agricos. E-Newsletter*. 1(11). 29-33.
https://www.researchgate.net/publication/360426760_Soil_Water_Movement_-_Saturated_and_Unsaturated_flow
- Ardila Arias, N. A. (2019, 13 de junio). Continúa desmoronándose la montaña en el km 58 de la vía al Llano. *Diario El Tiempo*.
<https://www.eltiempo.com/colombia/otrasciudades/actualidad-de-la-via-al-llano-por-derrumbes-en-kilometro-58-375020>
- Ardila, N. A. (2019, 14 de mayo). Impresionante derrumbe genera nuevo cierre de la vía al Llano. *Diario El Tiempo*. <https://www.eltiempo.com/colombia/otras-ciudades/cierre-dela-via-al-llano-14-de-mayo-del-2019-361354>
- Ayala Romero, N. E. (2018). La construcción de túneles en terrenos difíciles: Doble calzada Bogotá–Villavicencio [Tesis de maestría, Universidad Santo Tomás]. Repositorio. <https://repository.usta.edu.co/handle/11634/15320>
- Buitrago, M. (2025, 29 de enero). ¿Qué pasó con el viaducto del km 58 en la Vía al Llano? Falta poco para que viajeros de Bogotá y Villavicencio lo usen. *Redmás*. <https://redmas.com.co/colombia/Que-paso-con-el-viaducto-del-km-58-en-la-Via-al-Llano-Falta-poco-para-que-viajeros-de-Bogota-y-Villavicencio-lo-usen-202501290039.html>
- Burgos, G. (2019, 11 de junio). Nuevo derrumbe en el kilómetro 58 demorará apertura de vía Bogotá–Villavicencio. *Canal 1*. <https://canal1.com.co/noticias/nacional/nuevo-derrumbeen-el-kilometro-58-demorara-apertura-de-via-bogota-villavicencio/>
- Calcaterra, D., Parise, M., & Palma, B. (2012). Monitoring and mitigation of slope movements: A review of practical experiences. *Landslides*, 9(1), 1–13. <https://doi.org/10.1007/s10346-011-0285-3>
- Caracol Radio. (2019). Derrumbe en la vía al Llano [Video]. YouTube. https://www.youtube.com/watch?v=JROds4c_CCK
- Congreso de la República de Colombia. (2012). Ley 1523 de 2012. Por la cual se adopta la política nacional de gestión del riesgo de desastres y se establece el Sistema Nacional de Gestión

- del Riesgo de Desastres y se dictan otras disposiciones. Diario Oficial No. 48.411. <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=47141>
- Coviandes (2019). Estudio de hidrología e hidráulica y diseño de obras de drenaje de la meseta Mesa Grande, en la vía Bogotá - Villavicencio, alrededor de la abscisa k58+ 100. Contingencia en el sector sur occidental de la meseta de Mesa Grande desde agosto de 2018, [Documento técnico]. Coviandes SAS, Hidroconsulta SAS.
- Coviandes S.A.S. (2019). Plan de gestión de riesgo de desastres – Ladera Mesa Grande K58+000: Construcción de la segunda calzada tramo El Tablón (PR34) – Chirajara (PR63) de la carretera Bogotá–Villavicencio, dentro del marco Ley 1523 de 2012 y Decreto 2157 de 2017 (Versión 03, Código PGRD-KM58+000-03). Coviandes.
- Coviandes S.A.S. (2019). Plan de Gestión del Riesgo de Desastres – Ladera Mesa Grande km 58+000. Concesión Vial Bogotá–Villavicencio. Coviandes.
- Coviandes. (2019). Diagnóstico de sitios críticos. Emergencia invernal agosto de 2018. Carretera Bogotá–Villavicencio (Rev. 2). Coviandes. Coviandes.
- Cruden, D.M., Varnes D. J. (1996). “Landslide Types and Processes”. Landslides: Investigation and Mitigation. Special Report 247, National Academy Press, <http://www.erosion.com.co/deslizamientos-y-estabilidad-de-taludes-en-zonastropicales.html>.
- Cuéllar, J. V., Vallejo, E., & Pescador, J. P. (2018). Interpretación geológica de 14 sondeos de magnetotelúrica y 2 tomografías eléctricas para definir espesores en la terraza del Túnel 13 – Tercio Medio – Sector 3A en el corredor vial Bogotá–Villavicencio. Informe técnico. Octubre 31 de 2018.
- Dávila, J. M., Salazar, B. H., Restrepo, V. H., García, L. M. (2021). Investigaciones sobre los procesos de inestabilidad en el K58 de la vía Bogotá - Villavicencio. [Video]. Youtube. Programa Jueves con los Egresados UN, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Colombia, https://www.youtube.com/watch?v=rg7PxY9prhw&ab_channel=Facultaddeingenier%C3/
- Delgado Gómez, P. (2020, 30 de junio). Derrumbe del kilómetro 58 en la vía al Llano no fue culpa de la granja avícola. El Espectador. <https://www.elespectador.com/economia/derrumbe-del-kilometro-58-en-la-via-al-llanono-fue-culpa-de-la-granja-avicola-article/>

- Diario El Tiempo. (2019, 26 de junio). Vía al Llano: más gremios piden declarar emergencia económica. <https://www.eltiempo.com/economia/sectores/via-al-llano-mas-gremiospiden-declarar-emergencia-economica-379806>
- Diario la República. (2019, 15 de junio). Nuevo derrumbe en el kilómetro 58 de la vía al Llano hizo desplomar un puente. <https://www.larepublica.co/economia/nuevo-derrumbe-en-elkilometro-58-de-la-via-al-llano-hizo-desplomar-un-puente-2874490>
- Díaz Martínez, J. (2020). Análisis de la vulnerabilidad institucional por el fenómeno de remoción en masa en Guayabetal, Cundinamarca ante la gestión del riesgo de desastres enfocada en los procesos del conocimiento del riesgo, reducción del riesgo y manejo de desastres. [Trabajo de grado, Universidad Católica de Manizales]. Repositorio <https://repositorio.ucm.edu.co/handle/10839/2930>.
- El Tiempo. (2019, 18 de junio). ¿Cuánto tiempo estará cerrada la vía al Llano? <https://www.eltiempo.com/colombia/otras-ciudades/cuanto-tiempo-estara-cerrada-la-viaal-llano-376668>
- Estabilidad de Taludes. (2013). Marco teórico. <https://estabilidad-de-taludes7.webnode.es/news/marco-teorico/>
- Fredlund, D. G., & Rahardjo, H. (1993). Soil mechanics for unsaturated soils. John Wiley & Sons.
- Geotecnia Andina Consultores SAS. (2018). Complemento a recomendaciones con información reportada del 15 de septiembre 2018 al 4 de octubre del Túnel 13 y Portal 26 (Informe 2, Mesa Grande y Túnel 13_V0).
- Geotecnia Andina Consultores SAS. (2019). Informe de visita a la ladera suroccidental de la Meseta de Mesa Grande, al Portal 26 y al Túnel 13 el 16 de mayo de 2019 y análisis geotécnico de su comportamiento al 16 de mayo de 2019.
- Geotecnia y Mecánica Suelos ABC. (s.f.). Estabilidad de taludes y drenaje. <https://www.geotecniaymecanicasuelosabc.com/estabilidad-taludesdrenaje>
- González de Vallejo, L. I., Ferrer, M., Ortuño, L., & Oteo, C. (2002). Ingeniería geológica. Pearson Educación.
- Ingeniería y Georriesgos (2019), concepto sobre el informe preliminar de Coviandes, concepto final a- igrs - 75 - 19, ingeniería y georriesgos IGR. SAS, consorcio interconcesiones, Documento técnico.

- Ingeniería y Georriesgos IGR S.A.S. (2019). Informe técnico sobre la estabilidad del kilómetro 58 en la vía Bogotá–Villavicencio. [Documento técnico interno]. IGR.
- Ingeniería y Georriesgos IGR SAS. (2019). Revisión del estudio de estabilidad global km 58+000: Ladera Mesa Grande. Agencia Nacional de Infraestructura – ANI.
- Instituto Colombiano de Geología y Minería. (Ingeominas). (2011). Contexto geológico, geomorfológico y amenazas geológicas km 58 vía Bogotá - Villavicencio. Ingeominas.
- Leiva Ruiz, E. A. (2020). Tendencia de la precipitación: Kilómetro 58+00 vía Bogotá Villavicencio. [Trabajo de grado, Universidad Antonio Nariño]. Repositorio <https://repositorio.uan.edu.co/items/4b5fef20-28c8-41c6-b342-40f25b670596>.
- Luza Huillca, C., & Sosa Senticala, N. (2016). Caída de rocas en el sector de Huamatambo: Distrito Huamatambo, provincia Castrovirreyna, departamento Huancavelica (Informe Técnico N.º A6702). Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico – Ingemmet. https://sigrid.cenepred.gob.pe/sigridv3/storage/biblioteca/4549_informetecnico-n0-a6702-caida-de-rocas-en-el-sector-de-huamatambo-distrito-dehuamatambo-provincia-castrovirreyna-departamento-huancavelica.pdf
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible & Ministerio de Transporte. (2022). Lineamientos de infraestructura verde vial para Colombia. <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2022/07/24.-Lineamientos-deinfraestructura-verde-vial-para-Colombia.pdf>
- Ministerio de Transporte de Colombia. (2019, junio 19). Inestabilidad geológica en el kilómetro 58 de la vía Bogotá – Villavicencio <https://mintransporte.gov.co/publicaciones/7484/inestabilidad/>
- Navarro, S., Hernandez, A., García, J., Reyes, A., Ruiz, G., Dionicio, V., Arcila, R, M. M., Martínez, E. A., Garzón, F., Lizarazo, M., Pedraza, P., Sarabia, G., A. M., Barbosa, C, D. R., Díaz, P, F. J., Perico, García, N. D., Montejo, E, J. S., Valcárcel, T, J. A., Mora, M. (2019). Contexto geológico, geomorfológico, susceptibilidad y amenaza por movimientos en masa km 58 vía Bogotá - Villavicencio. Servicio Geológico Colombiano, Dirección de Geoamenazas.
- Navarro, S., Hernández, A., García, J., Reyes, A., Ruiz, G., Dionicio, V., Arcila, M., Martínez, E., Garzón, F., Lizarazo, M., Pedraza, P., Sarabia, A., Barbosa, D., Díaz, F., Perico, N., Montejo, J., Valcárcel, J., & Mora, M. (2019). Contexto geológico, geomorfológico,

- susceptibilidad y amenaza por movimientos en masa km 58 vía Bogotá - Villavicencio. Servicio Geológico Colombiano.
- Noticias de Villavicencio. (2021, 19 de agosto). 47 años y una tragedia que sigue latente. <https://noticiasdevillavicencio.com/47-anos-y-una-tragedia-que-sigue-latente/>
- Organización Panamericana de la Salud. (1997). Amenazas naturales y desastres: Una guía para el docente – Capítulo 5: Movimientos en masa. <http://cidbimena.bvs.hn/docum/ops/publicaciones/h0206s/h0206s.5.htm>
- Park, H. J., Lee, J. H., & Kim, Y. (2017). Application of IoT-based real-time slope safety monitoring system. *Sensors*, 17(12), 2813. <https://doi.org/10.3390/s17122813>
- Presidencia de la República de Colombia. (2014). Decreto 1807 de 2014. Por el cual se reglamentan los artículos 189, 190 y 191 de la Ley 1450 de 2011 en relación con estudios de amenaza por fenómenos de remoción en masa. *Diario Oficial* No. 49.220. <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=59488>
- Presidencia de la República de Colombia. (2017). Decreto 2157 de 2017: por medio del cual se adoptan directrices generales para la elaboración del Plan de Gestión del Riesgo de Desastres de las entidades públicas y privadas en el marco del artículo 42 de la Ley 1523 de 2012. <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=199583>
- Presidencia de la República de Colombia. (2017). Decreto 602 de 2017. Por el cual se reglamenta el uso del Fondo Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres para atender emergencias viales y otras disposiciones. *Diario Oficial* No. 50.228. <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=80835>
- Presidencia de la República de Colombia. (2022). Decreto 1478 de 2022: por medio del cual se adopta la actualización del Plan Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres y se modifica el Artículo 2.3.1.2.2.4.3 de la Subsección 4, Sección 2, Capítulo 2, Título 1, Libro 2 del Decreto Único Reglamentario 1081 de 2015. <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=191411>
- Proyecto Multinacional Andino PMA: GCA); Geociencias para las Comunidades Andinas. (2007). Movimientos en masa en la región andina: una guía para la evaluación de amenazas. Servicio Nacional de Geología y Minería, Publicación Geológica Multinacional, No.4. 432 p. (1 CD-ROM).

- <https://repositorio.segemar.gov.ar/handle/308849217/2792;jsessionid=B9DFC020D8B19486829FAF3608F76D62>
- Ramos Cañón, A. M., Reyes Merchán, A. A., Muñévar Peña, M. A., Ruiz Peña, G. L., Machuca Castellanos, S. V., Rangel Flórez, M. S., Prada Sarmiento, L. F., Cabrera, M. Á., Rodríguez Pineda, C. E., Escobar Castañeda, N., Quintero Ortiz, C. A., Escobar Vargas, J. A., Giraldo Osorio, J. D., Medina Orjuela, M. S., Durán Santana, L., Trujillo Osorio, D. E., Medina Ávila, D. F., Capachero Martínez, C. A., Delgado, D. L., Ramírez Hernández, K. C., González Rojas, E. E., Rincón Chisino, S. L., Solarte Blandón, P. A., Castro Malaver, L. C., López Marín, C., Navarro Alarcón, S. del R., & Pérez Moreno, M. A. (2021). Guía metodológica para zonificación de amenaza por avenidas torrenciales. Servicio Geológico Colombiano.
- Revista Semana. (2019, 15 de mayo). Nuevo derrumbe en vía al Llano golpea a la economía. Semana. <https://www.semana.com/economia/articulo/cierre-de-via-al-llano-porderrumbes-2019/272085/>
- Servicio Geológico Colombiano (SGC). (2018). Actualización del estudio de zonificación de amenaza por movimientos en masa a escala 1:25.000 y la zonificación de amenaza por movimientos en masa tipo avenida torrencial escala 1:25.000 en el municipio Villavicencio – departamento del meta - convenio SGC-IGAC 02/2018.
- Servicio Geológico Colombiano (SGC); Universidad Pedagógica y tecnológica de Colombia (UPTC). (2018). Memoria explicativa del mapa geomorfológico aplicado a movimientos en masa escala 1:100.000 plancha 266 –Villavicencio.
- Servicio Geológico Colombiano. (1998). Geología de la Plancha 266 Villavicencio (O. Pulido G., L. S. Gómez V., & P. Marín R., autores; escala 1:100.000; transformada a Datum MAGNA SIRGAS 2014). Ingeominas.
- Servicio Geológico Colombiano. (2012). Propuesta metodológica sistemática para la generación de mapas geomorfológicos analíticos aplicados a la zonificación de amenaza por movimientos en masa escala 1:100.000.
- Setiawan, A., Irawan, D. E., & Syarief, R. (2021). Design of a landslide early warning system using wireless sensor networks. *International Journal of Engineering and Technology*, 10(2), 123–132. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enggeo.2012.07.017>

- Sociedad Colombiana de Ingenieros (SCI). (2020, julio 6). Excavación de un túnel en la vía al Llano sí tuvo impacto en la ladera. <https://sci.org.co/excavacion-de-un-tunel-en-la-via-alllano-si-tuvo-impacto-en-la-ladera/>
- Sociedad Colombiana de Ingenieros. (2020, julio 6). Excavación de un túnel en la vía al Llano sí tuvo impacto en la ladera. <https://sci.org.co/excavacion-de-un-tunel-en-la-via-al-llano-si-tuvo-impacto-en-la-ladera/>
- Suarez, J., (1998), Deslizamientos y estabilidad de Taludes en zonas tropicales. Recuperado de <https://www.erosion.com.co/category/conferencias/estabilidad-de-taludes/>
- Universidad de los Andes. (2025, 14 de febrero). Guayabetal: la zona más susceptible a deslizamientos en la vía al Llano. <https://www.uniandes.edu.co/es/noticias/ingenieria/guayabetal-la-zona-mas-susceptiblea-deslizamientos-en-la-via-al-llano>
- Vargas Cortés, M., López Fernández, J., & Jiménez Manjarrez, E. (2022). Concepto KM 58: Vía Bogotá D.C. – Villavicencio. Escuela de Ingenieros Militares, Especialización en Diseño y Construcción de Vías y Aeropistas. <https://es.scribd.com/document/583187541/CONCEPTO-VIA-BTA-VLLVCIO-JIMENEZ-LOPEZ-VARGAS>
- Varnes, D. J. (1978). Slope movement types and processes. En R. L. Schuster & R. J. Krizek (Eds.), *Landslides: Analysis and Control* (pp. 11–33). National Academy of Sciences. <https://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/sr/sr176/176.pdf>
- Varnes, D. J. (1996). Landslide types and processes. En A. K. Turner & R. L. Schuster (Eds.), *Landslides: Investigation and Mitigation* (pp. 36–75). Transportation Research Board, Special Report 247. National Academy Press.