



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA – SECCIÓN DE GEOTECNIA
MAESTRÍA EN GEOTECNIA**

**ESTUDIO DEL TERRENO Y OBRAS CORRECTIVAS EN EL SITIO DE EL CUNE
MUNICIPIO DE VILLETÁ CUNDINAMARCA, CON APLICACIÓN DEL MÉTODO
OBSERVACIONAL**

Ing. César A. Palomino S.

Bogotá, Mayo de 2011



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA – SECCIÓN DE GEOTECNIA
MAESTRÍA EN GEOTECNIA**

**ESTUDIO DEL TERRENO Y OBRAS CORRECTIVAS EN EL SITIO DE EL CUNE
MUNICIPIO DE VILLETA CUNDINAMARCA, CON APLICACIÓN DEL MÉTODO
OBSERVACIONAL**

**TRABAJO FINAL MAESTRÍA EN GEOTECNIA-PROFUNDIZACIÓN
Presentado por: Ing. César A. Palomino S.**

Director de Tesis: Geól. Juan Montero O., Profesor Asociado UNAL

Bogotá, Mayo de 2011



*A lo mejor de mi vida
...Juan Camilo Palomino Lesmes...*



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA – SECCIÓN DE GEOTECNIA
MAESTRÍA EN GEOTECNIA**

**ESTUDIO DEL TERRENO Y OBRAS CORRECTIVAS EN EL SITIO DE EL CUNE MUNICIPIO DE
VILLETA CUNDINAMARCA, CON APLICACIÓN DEL MÉTODO OBSERVACIONAL**

**STUDY OF TERRAIN AND CORRECTIVE WORKS AT THE CUNE LANDSLIDE AT VILLETA
CITY CUNDINAMARCA WITH APPLICATION OF THE OBSERVATIONAL METHOD**

DIRECTOR: Geólogo Juan Montero Olarte

PROYECTANTE: Ing. César A. Palomino S.

RESUMEN

En esta tesis se presentan los resultados obtenidos de la investigación académica realizada en la vía Bogotá-Medellín, tramo PR 64+600 a PR 65+850 en el sector El Cune, municipio de Villeta Cundinamarca. El tema está enmarcado dentro del comportamiento geotécnico de las rocas lodosas (lutitas) y coluviones. Como aporte se destacan los principales factores que intervienen en los procesos de inestabilidad en rocas lodosas, el comportamiento del deslizamiento y de las obras correctivas aplicadas como solución. Se realiza una caracterización geológica-geotécnica detallada de los materiales desde el punto de vista mineralógico y mecánico, resaltando aspectos importantes de estas propiedades en el deslizamiento. Igualmente se da importancia al aporte del drenaje en la estabilidad del terreno y de las obras construidas en el periodo 2009 a 2011.

Palabras clave: Rocas lodosas, Deslizamiento, Discontinuidades, Desplazamiento, Precipitación, Estabilidad

ABSTRACT

This thesis presents the results of an academic research carried out from the PR 64 +600 to the PR 65 +850 of the Bogota-Medellin highway, at the “El Cune” sector at Villeta Cundinamarca. The research topic is framed within the geotechnical behaviour of mudrocks (shales) and colluviums. As a contribution it highlights the main factors involved in the process of instability of mudrocks, the behaviour of slip and remedial works implemented as a solution. The study characterizes geologically and geotechnically the materials from the mineralogical and mechanical point of view, highlighting important aspects of these properties on the landslide. Equally importance is given to the contribution of drainage on the stability of the terrain and the works carried out in the period 2009 to 2011.

Keywords: mudrocks, Landslide, discontinuities, displacement, precipitation, stability.

TABLA DE CONTENIDO

1	ALCANCE	¡Error! Marcador no definido.
2	JUSTIFICACIÓN	2
3	MARCO DE REFERENCIA DE LA ESTABILIDAD DE TALUDES EN ROCAS LODOSAS	3
3.1	Marco de referencia Nacional	3
3.2	Marco de referencia Internacional	3
4	INTRODUCCIÓN	5
5	OBJETIVOS	7
6	ACTIVIDADES	8
7	MÉTODO DE TRABAJO	9
8	MARCO GEOLÓGICO REGIONAL	12
8.1	Localización geológica	12
8.2	Estratigrafía y Litología	13
8.2.1	Formación Murca (Kim).....	13
8.2.2	Formación areniscas de Útica (Kiut).....	13
8.2.3	Formación Trincheras (Kit).....	14
8.2.4	Coluviones y Conos de deyección antiguos (Qc/Qcd)	14
8.2.5	Conos de deyección recientes y aluviones (Qfl/Qal)	15
8.2.6	Depósitos Antrópicos (Qan)	15
8.2.7	Depósitos de Deslizamiento (Qdd)	15
8.2.8	Depósitos de Talus (Qta)	15
8.2.9	Suelo Residual (Qsr).....	15

8.3	Geología Estructural	16
8.3.1	Anclinorio de Villeta.....	16
8.3.2	Sistemas de falla de Quebradanegra	16
8.3.3	Sistema de fallas del río Villeta	17
8.3.4	Bloques Tectónicos identificados	19
8.3.5	Modelo Estructural y Geológico.....	19
9	FACTORES EN LA ESTABILIDAD DE TALUDES EN ROCAS LODOSAS - DESLIZAMIENTO EL CUNE	21
9.1	Tipos de Deslizamientos	21
9.2	Ablandamiento progresivo	23
9.3	Rebote de las paredes y el fondo en excavaciones en rocas lodosas.....	24
9.4	Susceptibilidad al desleimiento	24
9.5	Características esfuerzo-deformación-falla progresiva	24
10	ASPECTOS GEOTÉCNICOS DEL DESLIZAMIENTO EL CUNE	26
10.1	Zona de estudio.....	26
10.2	Materiales	26
10.2.1	Rellenos Heterogeneos.....	26
10.2.2	Depósitos coluviales	26
10.2.3	Roca lodosa	27
10.2.4	Niveles de agua	27
11	CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA MACROSCÓPICA DE LOS MATERIALES DEL DESLIZAMIENTO	28
11.1	Descripción de las muestras.....	29
12	CARACTERIZACIÓN MICROSCÓPICA DEL SUSTRATO ROCOSO - ROCAS LODOSAS DE LA FORMACIÓN TRINCHERAS	40
12.1	Composición y estructura de la Roca Lodosa Subyacente	40
12.2	Planos de Discontinuidad de la roca-Superficies de falla potenciales	46
12.2.1	Espejos de falla.....	46

12.2.2	Discontinuidades rellenas de calcita.....	46
12.3	Ensayos de difracción rayos X (XRD).....	47
12.4	Conclusiones relacionadas con la caracterización de los materiales.....	48
13	OBRAS DISEÑADAS PARA EL CONTROL DEL DESLIZAMIENTO.....	49
13.1	Descripción general de las obras correctivas.....	49
13.2	Localización del túnel falso.....	49
13.3	Proceso constructivo.....	50
13.3.1	Movimiento de tierras-estabilización de masas	50
13.3.2	Drenaje profundo	50
13.3.3	Pozos de abatimiento-caissons drenantes	50
13.3.4	Galería de drenaje	50
13.4	Construcción de túnel falso de 200 m de longitud	51
13.4.1	Construcción de elementos verticales	51
13.4.2	Excavación y construcción de Losa Superior	51
13.4.3	Construcción de bóvedas superiores	51
13.4.4	Relleno sobre bóvedas superiores	51
13.4.5	Excavación frontal e instalación de puntal.....	51
13.4.6	Mejoramiento de suelo bajo bóveda inferior	51
13.4.7	Construcción de bóveda inferior	51
13.4.8	Relleno final	51
14	INSTRUMENTACIÓN DEL DESLIZAMIENTO.....	54
14.1	Tipos de instrumentos instalados	54
14.1.1	Mojones de control topográfico	54
14.1.2	Inclinómetros.....	54
14.1.3	Piezómetros de hilo vibrátil.....	55
14.1.4	Extensómetros	56
14.2	Variables medidas en el terreno.....	57
14.2.1	Desplazamientos.....	57
14.2.2	Presiones de poros	57

14.2.3 Niveles piezométricos	57
14.2.4 Asentamientos	57
14.2.5 Esfuerzos en estructuras rígidas	57
14.3 Resultados de la instrumentación período marzo/2010 a octubre/2010	58
14.3.1 Tendencia de movimiento del terreno – Vectores principales.....	58
14.3.2 Magnitud acumulada de los desplazamientos del terreno en el período marzo/10 a octubre/10.....	59
14.3.3 Resumen gráfico de desplazamiento acumulado del terreno	60
14.3.4 Tasas de desplazamiento registradas en el terreno en el período marzo/10 a octubre/10	63
14.3.5 Escala de tasas de movimiento según D. J. Varnes, 1978	63
14.4 Comportamiento de las lluvias Vs. desplazamiento del terreno.....	64
14.5 Magnitud de presiones de poros medidas en el terreno	65
14.6 Factores relacionados con la magnitud de las tasas de desplazamiento del terreno	68
14.7 Evaluación de los umbrales de precipitación (Grafica de Aboshi).....	69
15 INSTRUMENTACION ESPECIAL CON INCLINÓMETROS EN LAS PANTALLAS DE PILOTES-TUNEL FALSO.....	71
15.1 Comportamiento de la pantalla de pilotes del eje 1	71
15.2 Comportamiento de la pantalla de pilotes del eje 2 (sin apuntalamiento) ...	71
15.3 Comportamiento de la pantalla de pilotes del eje 3 (sin apuntalamiento) ...	72
15.4 Comportamiento de la pantalla de pilotes del eje 4 (sin apuntalamiento) ...	73
16 MECANISMO DE FALLA DEL TERRENO	74
16.1 Antecedentes de la inestabilidad y obras propuestas en el periodo 1998- 2010.....	74
16.2 Aspectos relacionados con mecanismos de falla en rocas lodosas.....	76
16.2.1 Efecto de levantamiento de la banca deslizamiento El Cune.....	77
16.2.2 Estudios de casos similares en cortes viales en rocas lodosas	79
16.2.3 Causas principales del levantamiento de la banca – deslizamiento El Cune	81

16.3	Mecanismo de falla del terreno planteado en 2004 U. Nacional	82
16.4	Mecanismo de falla del terreno propuesto en el estudio geotécnico de Geotecnia y Cimentaciones años 2008 - 2009.....	84
16.4.1	Exploración e investigación del subsuelo	84
16.4.2	Definición de Movimientos principales del terreno.....	86
16.4.3	Mecanismos de falla	87
16.4.4	Condición de estabilidad etapa de diseño marzo 2009.....	88
16.4.5	Conclusiones relacionadas con el mecanismo de falla periodo 2001-2010	89
16.5	Localización de superficies de falla del deslizamiento.	89
16.5.1	Aspectos relacionados con los procesos de inestabilidad	89
16.5.2	Superficie de falla en el contacto coluvión /roca.....	90
16.5.3	Superficies de falla en el macizo rocoso-rocas lodosas de Fm. Trincheras	91
16.5.4	Análisis de resultados basados en los estudios de 2009 (G&C).....	91
17	RESISTENCIA AL CORTE EN PLANOS DE DISCONTINUIDADES DE ROCA LODOSA EN EL DESLIZAMIENTO EL CUNE.....	93
17.1	Parámetros de resistencia al corte obtenidos	93
17.2	Presiones de poros medidas en el terreno en el periodo enero – octubre 2010.....	94
17.3	Efecto de la humedad en la resistencia al corte de las rocas lodosas.....	94
17.4	Resistencia al corte considerando ciclos de humedecimiento y secado	95
18	MECANISMO DE FALLA PROGRESIVA EN EL DESLIZAMIENTO EL CUNE	97
18.1	Mecanismo de falla progresiva en el deslizamiento El Cune.....	99
19	OBSERVACIONES GEOTÉCNICAS EN EL SITIO DE ESTUDIO	101
19.1	Reconocimientos de campo.....	101
19.2	Alteración de los materiales Vs. condiciones ambientales del sitio	102
19.3	Registro geotécnico de excavaciones.....	104
19.3.1	Excavaciones para caissons (pozos) de drenaje.....	104
19.3.2	Registro de excavación pozos de drenaje 1, 2, 3.	106

20 SEGUIMIENTO GEOTÉCNICO EN OBRA Y SUGERENCIAS TÉCNICAS DADAS DURANTE EL PROCESO CONSTRUCTIVO	107
21 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	116
21.1 Aplicación del método observacional en el seguimiento geotécnico	116
21.2 Conocimiento del comportamiento de los materiales	116
21.2.1 Características geológicas de las rocas lodosas del deslizamiento	116
21.2.2 Estados de alteración de la roca producidos por condiciones climáticas	117
21.3 Verificación del mecanismo de falla y profundidad de superficies de falla	117
21.3.1 Aspectos relacionados con el mecanismo de falla y condiciones de flujo	117
21.3.2 Mecanismo de falla progresiva	118
21.4 Condiciones de resistencia al corte de los materiales y su relación de los valores de con la presión de poros medidos	119
21.5 Comportamiento de las obras correctivas	119
21.5.1 Proceso constructivo y seguimiento geotécnico	119
21.5.2 Aporte del Drenaje profundo en la estabilidad del deslizamiento	120
21.6 Factores de seguridad durante el proceso Constructivo de las Obras.....	121
21.7 Aplicaciones al manejo del riesgo	121
21.7.1 Umbrales de precipitación	121
21.7.2 Meses en los que se presentaron las mayores tasas de desplazamiento del terreno.....	122
21.8 Aporte al conocimiento de deslizamientos en rocas lodosas	122
21.9 Recomendaciones para realizar seguimiento geotécnico después de construcción.....	123
22 AGRADECIMIENTOS	125
23 REFERENCIAS.....	127

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1	Clasificación de rocas Wentworth 1992	28
Tabla 2	Localización de los mojones de control	58
Tabla 3	Registro de la dirección preferencial del movimiento del terreno	58
Tabla 4	Magnitud acumulada de mojones de control periodo marzo – octubre de 2010	60
Tabla 5	Análisis de tasas máximas en el periodo marzo – octubre de 2010	63
Tabla 6	Presiones de poros registradas. Fuente de datos G & C 2010	65
Tabla 7	Análisis de tasas de desplazamiento del terreno Vs. precipitación 2010	68
Tabla 8	Análisis de lluvias con base en lluvias precedentes, año 2010	70
Tabla 9	Análisis de relleno mínimo, intermedio, seguro Vs. presión de poros	82
Tabla 10	Planos de discontinuidad definidos en el trabajo de grado U.N. (Castro – Montero 2004)	82
Tabla 11	Exploración del subsuelo G & C 2008/09	84
Tabla 12	Parámetros de resistencia al corte de planos de discontinuidad	94
Tabla 13	Descripción de información de campo visitas al sitio El Cune	96
Tabla 14	Estados de alteración de la roca lodosa después de las excavaciones 2010	101
Tabla 15	Localización y características de los caissons (pozos) drenantes, año 2010	102
Tabla 16	Factores de seguridad durante el procesos constructivo de las obras correctivas	105
Tabla 17	Umbrales de precipitación – manifestaciones en el terreno	121
Tabla 18	Periodo de máximas tasas de desplazamiento vs. Lluvias máximas, año 2010	121

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1	Localización de la zona de estudio	5
Figura 2	Geología regional del sector de Villeta	12
Figura 3	Sistemas de fallas localizadas en la zona de influencia del sitio El Cune	18
Figura 4	Topografía típica de zonas de rocas lodosas	21
Figura 5	Perfil de meteorización y problemas de inestabilidad típicos en rocas lodosas	22
Figuras 6	Imagen microscópicas de la roca lodosa, estructura laminar con contenido importante de oxígeno	40
Figura 7	Imagen microscópica de la roca lodosa. Contenido de silicio, aluminio y hierro	40
Figura 8	Imagen microscópica de la roca lodosa. Contenido de silicio, aluminio Calcio y hierro	41
Figura 9	Imagen microscópica de la roca lodosa, estructura cúbica. Predominio de Hierro y oxígeno	41
Figura 10	Imagen microscópica de la roca lodosa, estructura laminar con predominio de calcio y oxígeno	42
Figura 11	Imagen microscópica de la roca lodosa, estructura laminar con predominio de silicio y oxígeno	42
Figura 12	Imagen microscópica de la roca lodosa, estructura laminar con predominio de calcio y oxígeno	43
Figura 13	Imagen microscópica de la roca lodosa, estructura laminar con predominio de carbono y oxígeno	43
Figura 14	Imagen microscópica de la roca lodosa, estructura cúbica con predominio de hierro y oxígeno	44
Figura 15	Imagen microscópica una vena de calcita de la roca lodosa, predominan calcio, azufre ,oxígeno y hierro	44
Figura 16	Imagen microscópica, estructura cúbica. Predominio de importante de carbono, hierro y oxígeno	45

Figura 17	Imagen microscópica, estructura cúbica. Predominio de importante de carbono, hierro y oxígeno	45
Figura 18	Presencia de planos estriados (“slikenside”), planos que hacen parte de la estructura secundaria de la roca lodosa	46
Figura 19	Aspecto microscópico de las venas de calcita presentes en las discontinuidades del sustrato rocoso (Fm. Trincheras).	47
Figura 20	Composición mineralógica en la masa rocosa y en planos de discontinuidades (a) masa rocosa y (b) plano estriado. Ensayos XRD Universidad Nacional	47
Figura 21	Localización de obras correctivas. Fotografía: G y C 2008	49
Figura 22	Localización del túnel Falso. Fuente: G y C 2008	50
Figura 23	Localización eje de la galería y conexión con los pozos (caissons) de abatimiento. Fuente: G y C 2008	51
Figura 24	Etapas inicial de rellenos de compensación de masas. Fuente G y C 2008	52
Figura 25	Etapas intermedia, construcción de elementos verticales y bóvedas superiores. Fuente G y C 2008	52
Figura 26	Etapas Final, construcción de las secciones completas del túnel y posterior relleno de contrapeso en la zona superior de las bóvedas. Fuente G y C 2008	53
Figura 27	Desplazamiento acumulado sección 440. Datos fuente G y C 2008	61
Figura 28	Desplazamiento acumulado sección 540 (superiores). Datos Fuente: G y C, 2010.	61
Figura 29	Desplazamiento acumulado sección 540. Datos Fuente: G y C, 2010	62
Figura 30	Desplazamiento acumulado sección- caissons drenantes . Datos Fuente: G y C, 2010	62
Figura 31	Comportamiento de las lluvias período año 2010. Datos Fuente: G y C, 2010	64
Figura 32	Comportamiento de las presiones de poros, periodo Nov. 2009-Oct. de 2010. Datos Fuente: G y C, 2010	67

Figura 33	Comportamiento del nivel freático, periodo Nov. 2009- Oct. de 2010. Datos Fuente: G y C, 2010	68
Figura 34	Grafico de Aboshi - Nivel de riesgo alcanzado en el año 2010	69
Figura 35	Comportamiento de las desplazamiento de la pantalla eje 1, Datos fuente G y C año 2010	71
Figura 36	Comportamiento de las desplazamiento de la pantalla eje 2, Datos fuente G y C año 2010	72
Figura 37	Comportamiento de las desplazamiento de la pantalla eje 3, Datos fuente G y C año 2010	72
Figura 38	Comportamiento de las desplazamiento de la pantalla eje 4, Datos fuente G y C año 2010	73
Figura 39	Forma típica de los deslizamientos en roca lodosa Pierre (Bruce y Scully, 1966)	76
Figura 40	Esquema del mecanismo de falla K4+400, carretera Bogotá-Villavicencio. Fuente: Coviandes S.A.-IGL, 2004	80
Figura 41	Mecanismo de falla propuesto por U. Nacional (Castro-Montero año 2004).	83
Figura 42	Localización de exploración del subsuelo periodo 2001-2008	85
Figura 43	Secciones de Análisis Movimiento 1 (sección 440) Movimiento 2 (Sección 540). Figura tomada de Acuaterra 2001 y modificada C. Palomino S, 2010.	86
Figura 44	Mecanismo de falla Movimiento 1-Sección 440. Fuente. G y C 2008/09	87
Figura 45	Mecanismo de falla Movimiento 2 - Sección 540. Fuente: G y C 2008/09	87
Figura 46	Análisis inicial - Modelo geotécnico definido G & C 2008/09	88
Figura 47	Análisis inicial - Modelo geotécnico definido G & C 2008/09.	88
Figura 48	Localización de la superficie de falla sección 440 Movimiento 1. G y C 2008/09.	90
Figura 49	Localización de la superficie de falla del Deslizamiento Sección 440-Movimiento 1(G&C 2008/09)	91

Figura 50	Curva de esfuerzo cortante Vs. Desplazamiento obtenida del ensayo de corte directo para Pamplona Marl (Tomado de Alonso y Pineda, 2006).	95
Figura 51	Ensayo de Corte Directo	96
Figura 52	Mecanismo de falla progresiva Bjerrum (1966)	97
Figura 53	Sección transversal SW (Flanco derecho), NE (Flanco Izquierdo)- Perfil estratigráfico de campo, C. Palomino S	106
Figura 54	Efectos producidos por una excavación. Fuente: AJGG/91	114

LISTADO DE PLANOS

Plano 1	GEOMETRIA DEL DESLIZAMIENTO
Plano 2	LOCALIZACIÓN DE LA INSTRUMENTACIÓN
Plano 3	COMPORTAMIENTO DEL DESLIZAMIENTO
Plano 4	OBRAS CORRECTIVAS EN EL DESLIZAMIENTO

1 ALCANCE

Basados en lo establecido en la resolución 170 de 2010 (artículo 8), en la tesis de maestría de profundización se debe plantear y argumentar un problema geotécnico, con objetivos, descripción de la metodología y análisis de resultados obtenidos dentro de los alcances planteados.

La resolución 170 de 2010 textualmente establece: *“El proyecto Final es la actividad que integra y aplica los conocimientos de una o diferentes áreas, estimulando el desarrollo de actividades relacionadas con un proyecto experimental o teórico, un diseño o rediseño que busque la solución de un problema, e implica la elaboración de un documento escrito”*

En el caso específico del presente trabajo se ha tomado el tema del Estudio de un deslizamiento complejo en rocas Lodosas, con manifestaciones de Inestabilidad durante un periodo de 10 años. El deslizamiento se localiza en la carretera Bogotá-Medellín PR64+600-PR 65+850.

La tesis se titula: **Estudio del terreno y obras correctivas en el sitio de El Cune, municipio de Villeta, Cundinamarca, con aplicación del método Observacional.** Como aporte se destacarán los principales factores que intervienen en los procesos de Inestabilidad en rocas Lodosas, el comportamiento del deslizamiento y la descripción de las obras correctivas aplicadas como solución a la inestabilidad.

2 JUSTIFICACIÓN

En este trabajo se presentan los resultados obtenidos de la investigación Académica realizada en el sector de El Cune, zona de interés Geotécnico localizada en el tramo PR 64+600 a PR 65+850 de la vía Honda – Bogotá.

El tema está enmarcado dentro del comportamiento geotécnico de las rocas lodosas (lutitas) y de los depósitos de gravedad (coluviones, talus) generados de estas rocas de formaciones geológicas en el trópico, el comportamiento geotécnico está ligado a su origen y a factores del como el clima y la sismicidad. El comportamiento de estas rocas varía en el rango del de los suelos duros a las de las rocas blandas con características variables de resistencia, deformabilidad, permeabilidad y durabilidad.

El tema se considera de alto interés Geotécnico ya que está relacionado con la ocurrencia de un deslizamiento complejo que afecta actualmente la infraestructura vial nacional en un tramo importante de la carretera Bogotá-Medellín entre las abscisas PR 64+600 a PR 65+850. Debido a la complejidad del deslizamiento se ha tenido un periodo de más de 10 años de estudios y diseños relacionados con soluciones geotécnicas que no han controlado el problema de Inestabilidad, con grandes esfuerzos económicos instituciones del gobierno, especialmente el INCO e INVIAS.

El tipo de solución a construir requiere de un seguimiento especial dada la complejidad geológica y geotécnica del área a intervenir. El seguimiento geotécnico servirá de registro y apoyo durante el proceso constructivo de la solución, con aplicaciones al manejo del riesgo.

3 MARCO DE REFERENCIA DE LA ESTABILIDAD DE TALUDES EN ROCAS LODOSAS

3.1 Marco de referencia Nacional

Las rocas lodosas conforman una franja débil en la cordillera de los Andes incluyendo la cordillera Oriental de Colombia, donde son particularmente inestables, dadas las condiciones desfavorables del clima.

Según lo describe Montero (2010), entre los proyectos o poblaciones localizados en terrenos de rocas lodosas en la Cordillera Oriental de Colombia que deben afrontar situaciones adversas de inestabilidad se pueden citar los siguientes tramos de carretera:

- (1) El Boquerón de Chipaque-Cáqueza en la carretera Bogotá-Villavicencio.
- (2) El sector Puente Nacional-Barbosa-Oiba en la carretera Bogotá-Bucaramanga.
- (3) El sector La Renta Río Sogamoso, en la carretera Bucaramanga-Barancabermeja.
- (4) La carretera Vélez-Landázuri-Cimitarra.
- (5) El sector La Vega-Villeta-Guaduas en la carretera Bogotá-Honda.
- (6) La carretera Chusacá-Mesitas del Colegio.
- (7) El sector Mosquera-Tena en la carretera Bogotá-Mosquera-La Mesa.
- (8) La carretera Los Alpes-Chuguacal-Cambao.

“Algunos **proyectos hidroeléctricos** construidos en el norte de Bogotá con problemas de inestabilidad de laderas o sedimentación de los embalses, como los Proyectos (9) Mesitas (Central Darío Valencia); (10) Chivor (tubería de carga y casa de máquinas); Proyecto Guavio y Chingaza. **Importantes zonas urbanas** en Bogotá (sur-oriente) Cáqueza, Útica, Tena y Mesitas en Cundinamarca; Suaita, Molagavita y Landázuri en Santander. Montero J. (2001).

3.2 Marco de referencia Internacional

En el artículo “Rocas lodosas en la cordillera oriental de Colombia” (Montero et al, 2010) se menciona que problemas similares se han presentado en otros países como las conocidas fallas de taludes en el corte Galliard (Cucaracha Shale) del Canal de Panamá ocurridas desde el inicio de su construcción en Octubre de 1907; los asesores internacionales de ese proyecto habían previsto construir cortes estables con taludes 1:1.5 y altura superior a 70 m pero la roca comenzó a colapsar antes de que los cortes hubieran superado 20 metros de altura; las fallas se atribuyeron entonces a oxidación de capas ferrosas lo cual debilitó considerablemente los materiales. (Rogers J. D. y Rogers J. R).

A finales de junio de 1998, una serie de lluvias torrenciales de 165 mm en 72 horas desencadenaron en Ohio (USA) más de sesenta deslizamientos a lo largo de una carretera estatal, los cuales provocaron la muerte de seis personas y causaron 179 millones de dólares de pérdidas en propiedades y en el sistema vial. Según se investigó la mayoría de los deslizamientos fueron de tipo traslacional, y las fallas ocurrieron a lo largo del contacto roca (shales, arcillolitas, lodolitas) - coluvión arcilloso húmedo. Con base en datos de ensayos de campo, laboratorio y análisis se estableció además la relación entre los parámetros de resistencia, la geometría de los taludes y los espesores de las masas coluviales. También se determinó que los movimientos ocurrieron cuando las masas coluviales alcanzaron 90% 100% de saturación (Shakoor et al).

Al considerar que las rocas lodosas constituyen un objetivo muy importante de investigación de nuestra región, en el presente trabajo se estudia el comportamiento del terreno en la zona inestable El Cune (tramo de carretera Bogotá- Villeta) estableciendo los factores de inestabilidad y realizando un seguimiento geotécnico a la solución y las obras correctivas iniciadas desde septiembre de 2009.

4 INTRODUCCIÓN

En la zona de estudio del presente trabajo de grado, se presentó un deslizamiento complejo asociado con materiales de baja resistencia, principalmente coluviones arcillosos y rocas lodosas meteorizadas. El deslizamiento ha evolucionado en el tiempo, generando inestabilidad importante tanto a la infraestructura vial como riesgo hacia la población de Villeta, Cundinamarca (**Figura 1**).

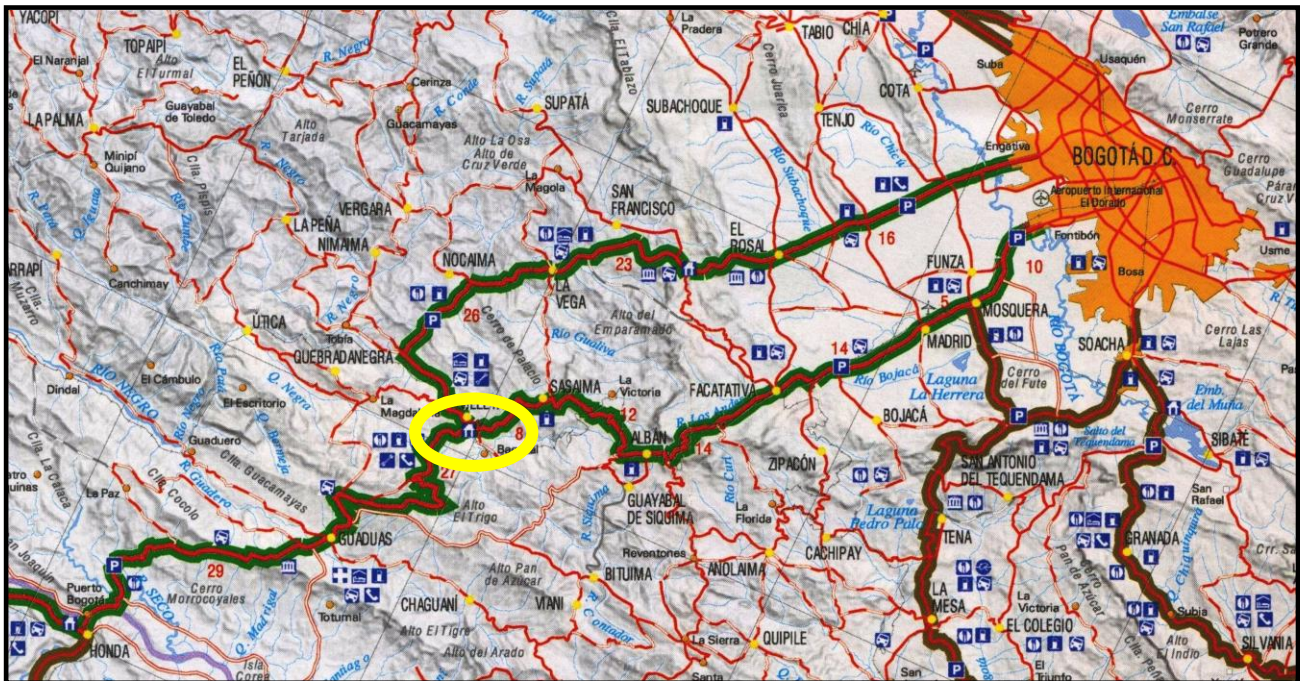


Figura 1 Localización de la zona de estudio

Se presentan descripciones, características geotécnicas y comportamiento de las rocas lodosas que conforman el deslizamiento, relacionadas con el origen de este tipo de rocas en la cordillera Oriental de Colombia, destacando a través del estudio del terreno y de las obras correctivas (2009-2010) los factores composicionales de la roca que aportan a la inestabilidad del terreno, igualmente conocer acerca del desempeño de obras correctivas en este tipo de deslizamientos, que en este caso corresponden a obras complejas y no convencionales, lo anterior con el fin de contribuir al conocimiento de estas rocas en nuestro medio. Simultáneamente con las rocas lodosas se consideran los coluviones arcillosos estrechamente asociados tanto por su génesis como por su ocurrencia.

Con base en la información consultada, se ha registrado inestabilidad en este tramo de vía desde inicios del año 1998, con mayor incremento de deformaciones en la banca en el periodo comprendido entre los años 2000 y 2004, durante este periodo la banca de la carretera estuvo sometida a fuertes empujes del terreno que causaron levantamiento de la estructura de pavimento y colapso de las estructuras de contención. Debido a la complejidad del deslizamiento se ha tenido un periodo de más de 10 años de estudios y diseños relacionados con soluciones geotécnicas que han controlado de forma parcial el problema de Inestabilidad, con grandes esfuerzos económicos por parte de instituciones del gobierno, especialmente el INCO e INVIAS.

Con los estudios realizados en el tiempo de evolución del deslizamiento se obtuvo una caracterización general del deslizamiento y se desarrollaron obras correctivas tendientes a recuperar la transitabilidad del tramo de vía obstruido por el deslizamiento. Sin embargo no fue posible alcanzar un grado de Estabilidad suficiente para garantizar la transitabilidad de la carretera y disminuir el nivel de riesgo. Esta condición llevó a que durante el año 2009 se realizaran estudios geotécnicos detallados, con alcances específicos y con mayor inversión en actividades de exploración e instrumentación del terreno para lograr establecer los mecanismos de falla del terreno y plantear soluciones de Ingeniería que permitan controlar la Inestabilidad en el sector El Cune.

El presente trabajo está basado en el seguimiento geotécnico de las obras correctivas ya iniciadas en Septiembre de 2009, siguiendo los Diseños de Estabilización realizados por la Concesión Sabana de Occidente para el INCO. Partiendo del hecho que en los estudios y Diseños realizados para la solución definitiva, se tuvieron en cuenta las variables y factores que inciden en la inestabilidad del terreno, planteando obras que garantizan un factor de seguridad adecuado desde los puntos de vista geotécnico y geológico. De los estudios anteriores al año 2008 solamente se hará mención, sin entrar a detallar aspectos técnicos relacionados con dichos estudios.

Para el desarrollo del trabajo se aplicó el método observacional (Peck , 1969) como herramienta de verificación de las variables geotécnicas registradas durante el seguimiento del comportamiento del terreno y las obras correctivas realizadas en el sitio El Cune. Mediante esta investigación se darán sugerencias técnicas de apoyo en decisiones técnicas del proyecto.

Con el seguimiento geotécnico en el sitio se pretende extraer conclusiones relacionadas con el comportamiento de los materiales involucrados en el deslizamiento y el comportamiento de la solución adoptada en el periodo de observación.

5 OBJETIVOS

Observar las características y propiedades de los materiales naturales, principalmente las rocas lodosas.

Conocer el enfoque y diseño de las obras proyectadas para el control de la inestabilidad en el sitio El Cune, mediante el estudio de la información geotécnica existente.

Estudiar la evolución del deslizamiento y los estudios previos enmarcándolo la inestabilidad dentro de un contexto regional y local.

Verificar los mecanismos de falla del terreno asumidos en el modelo geotécnico planteado en los estudios previos. En campo se identificarán las superficies de falla mediante observación de las excavaciones que se lleven a cabo para la construcción de elementos drenantes y de contención.

Analizar los datos de instrumentación del deslizamiento durante el proceso constructivo, estableciendo el comportamiento del terreno en el tiempo y la incidencia de las obras en la tendencia de las mediciones en el sitio.

Recomendar un plan de acción geotécnico sobre obras adicionales principalmente de drenaje en el corto mediano plazos. Se darán recomendaciones sobre instrumentación y seguimiento del comportamiento del sitio.

Concretar el aporte al conocimiento de las rocas lodosas, con base en la información recopilada durante el seguimiento geotécnico. Establecer conclusiones y recomendaciones relacionadas con el seguimiento posterior del comportamiento del terreno después de la construcción de la solución.

Generar un documento geotécnico que resuma los aspectos más importantes desde el punto de vista del comportamiento del sitio en el tiempo de ejecución de la solución.

6 ACTIVIDADES

Estudio y análisis de la información existente, identificando las variables geotécnicas a medir durante el proceso constructivo.

Visitas de seguimiento al sitio de la obra para observar y estudiar las condiciones de los materiales durante el proceso constructivo, dando especial énfasis a los tipos de materiales encontrados durante las excavaciones y rellenos. Se tomará información fotográfica para ilustrar la condición de los materiales.

Recopilación y análisis de datos de movimiento del terreno basado en seguimiento topográfico y de aparatos de instrumentación instalados en el terreno.

Establecimiento de rangos y estimados de valores de deformación de los materiales involucrados vs. el comportamiento de las estructuras, verificando el rango permisible de la estructura/terreno.

Elaboración de un documento con un resumen de las observaciones y las conclusiones más relevantes del proceso constructivo haciendo especial énfasis en el comportamiento de los materiales y el efecto de las obras construidas en la estabilización del deslizamiento.

7 MÉTODO DE TRABAJO

Durante el desarrollo de las actividades del proyecto se aplicó el método observacional, partiendo de la información geotécnica de la etapa de diseño y de registros de campo, considerados **Hechos Observacionales** que permiten realizar un **Proceso de verificación**.

El método sirve para calibrar el comportamiento del terreno durante la construcción de las obras, determinando valores umbrales de:

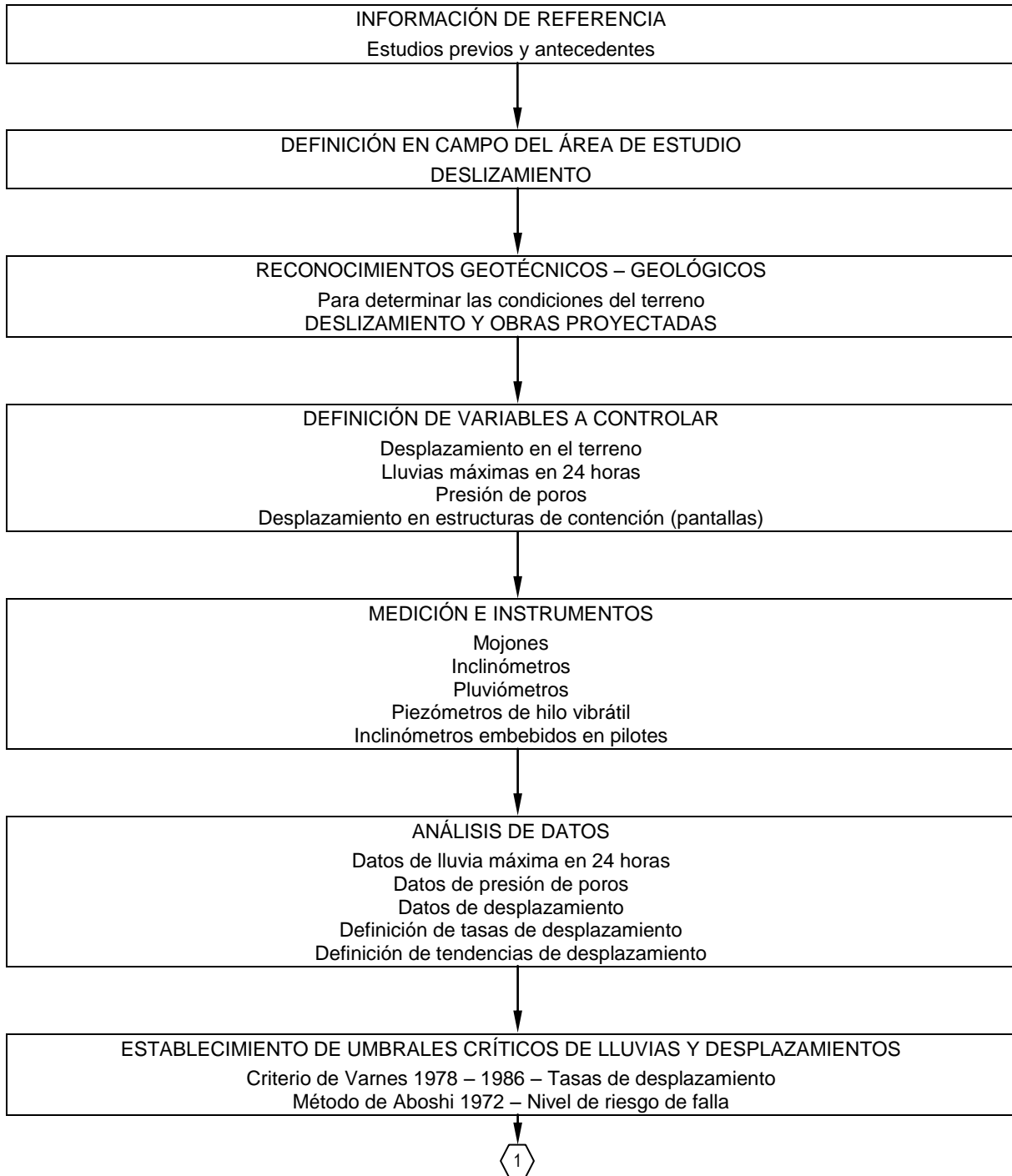
- Tiempos y grados de alteración de los materiales intervenidos.
- Tasas de desplazamiento del terreno Vs. la actividad del deslizamiento.
- Magnitudes y tendencias de los desplazamientos.
- Mediciones de lluvias máximas en el sitio y su incidencia en movimientos durante la construcción (Relación Lluvias Vs. movimientos del terreno).

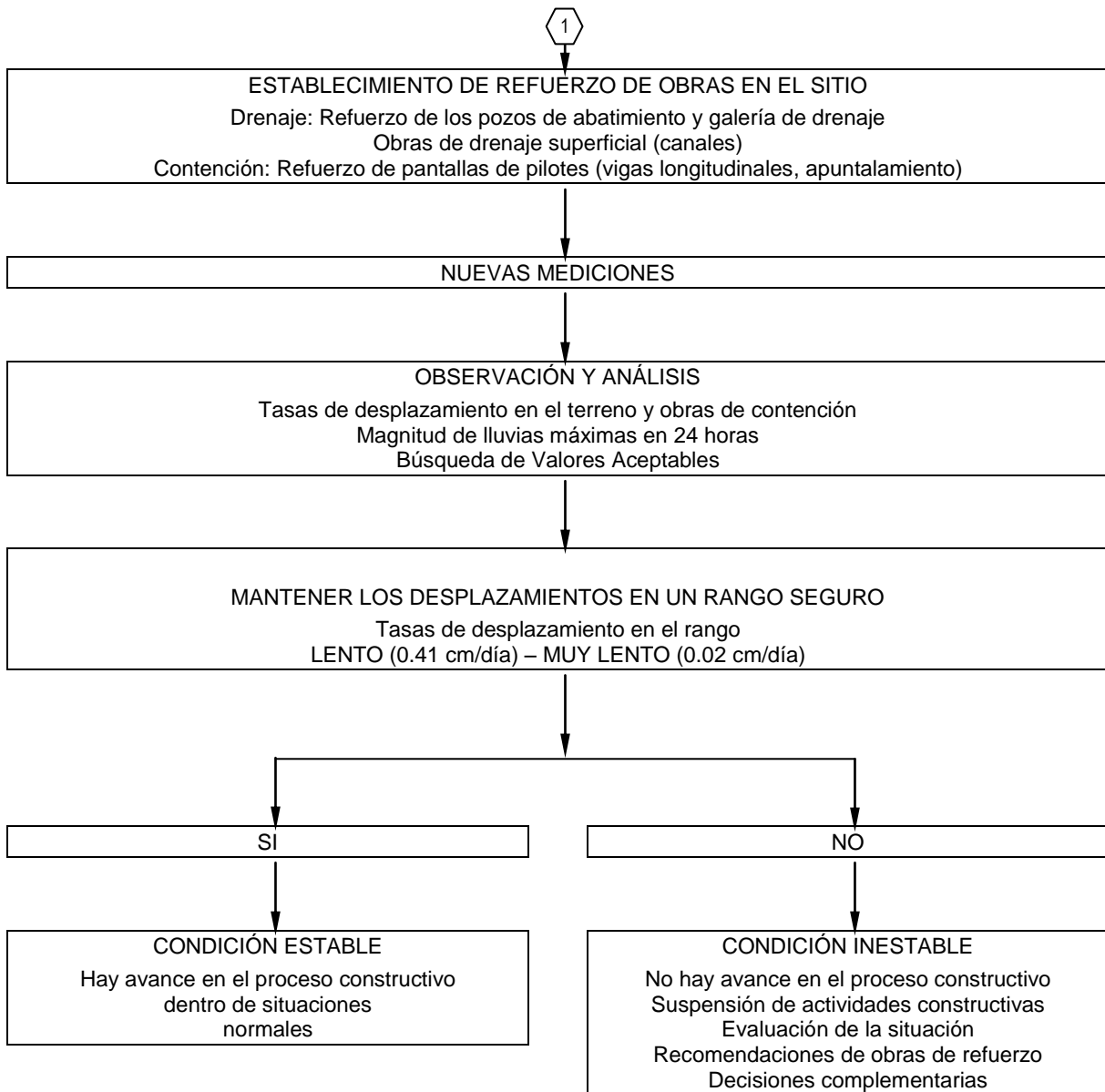
Mediante la observación y toma de registros se puede definir el comportamiento de las obras correctivas en el tiempo y la necesidad de refuerzo. Adicionalmente se definieron parámetros básicos de comportamiento del terreno, tendientes a predecir situaciones futuras.

De manera implícita en todas las actividades se aplicará el método Observacional (Peck, 1969), el cual consiste en una combinación racional de predicciones teóricas y observaciones para tratar con la incertidumbre de la naturaleza. En el proceso de seguimiento se tendrán en cuenta las siguientes premisas del método:

- Observación y seguimiento del diseño con base en la información disponible y la experiencia, estableciendo diferencias posibles entre suposiciones teóricas y el comportamiento real del terreno.
- Selección de variables y cantidades que se medirán durante la construcción.
- Medición de variables y evaluación de condiciones reales.
- Sugerir ajustes en el proceso constructivo, basados en las observaciones y mediciones realizadas en el terreno.
- Comparación de las condiciones de estabilidad obtenidas durante las etapas de construcción de las Obras, estableciendo el grado de estabilidad alcanzado.

ESQUEMA DEL MÉTODO DE TRABAJO





8 MARCO GEOLÓGICO REGIONAL

8.1 Localización geológica

El valle del río Villeta conforma un elemento morfológico regional con dirección NS, y establece el primer lineamiento de esta naturaleza entre el altiplano o parte central de la cordillera Oriental, y una sucesión de cinturones orográficos que continúan con esta disposición hasta el valle del río Magdalena.

Corresponde a la base del denominado Grupo Villeta, compuesto esencialmente por rocas pelíticas con aumento en el contenido calcáreo hacia la base. Hacia el occidente, y hasta la localidad de Guaduro, continúan rocas silíceas tipo chert del cretáceo inferior, y comprenden una secuencia que solo se registra al occidente, inclusive continuando al piedemonte de la cordillera Central.

El estilo estructural regional también se manifiesta y se inicia con el mencionado valle del Río Villeta. Al oriente se identifica una secuencia muy gruesa de lodolitas arcillosas de color negro con intercalaciones de algunos niveles de arenisca, margosas, hasta conformar una sucesión de serranías de anchos variables y moderadamente discontinuos. Al occidente se identifica inicialmente una amplia estructura anticlinal (hacia la hacienda el Trapiche), y luego continúa una serie de fajas angostas de rocas sedimentarias limitadas por fallas tectónicas regionales (**Figura 2**).

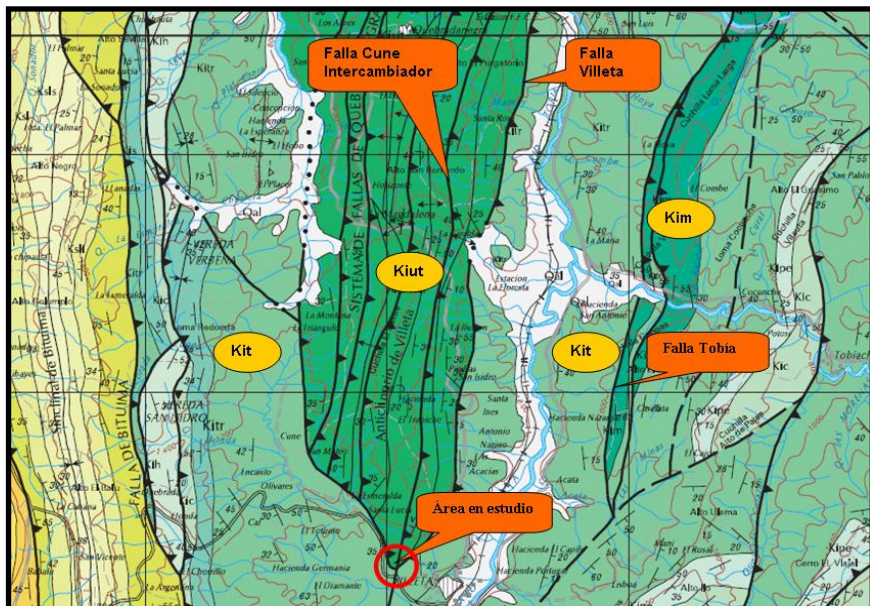


Figura 2. Geología regional del sector de Villeta – Ingeominas Plancha 208-ECP-Geól R. Cortés

8.2 Estratigrafía y Litología

El área en estudio queda comprendida en la Plancha 208 – Villeta, dentro de la cual Ingeominas (2001), considera que existen dos secuencias: (1) Oriental (a la falla de Bituima); y (2) occidental, con prolongación hacia el valle del Río Magdalena. El área de interés, de acuerdo a la fuente indicada, se relacionan las siguientes unidades lito-estratigráficas de la más antigua a la más reciente:

- Formación Murca (Kim).
- Formación Útica (Kiut).
- Grupo Villeta, y en particular la Formación Trincheras (Kit).

Existen depósitos recientes y suelos asociados, unos de tipo transpuestos, transportados y residuales. Todos corresponden a acumulaciones recientes y sub-recientes, involucrados en la evolución del paisaje.

8.2.1 Formación Murca (Kim)

En el área de estudio de la plancha 208 – Villeta, se describe el sitio tipo de esta unidad en el núcleo del anticlinal de Murca-Guayabal- Nimaima, al NNE de la población de Villeta, y en una franja angosta en la carretera entre esta última población y La Vega. En los alrededores de la población de Villeta se localiza también hacia el núcleo de la estructura anticlinal.

La Formación está compuesta por un nivel de rocas pelíticas arcillosas, con un alto contenido de yeso tanto a nivel de cristales laminares intraestratificado como segregado, y conformando frecuentes venas y relleno de diaclasas paralelas, o a manera de un enjambre de venas de espesores variables, asociados a zonas de fracturación intensa

8.2.2 Formación areniscas de Útica (Kiut)

Etayo-Serna, F., 1979, presenta una detallada descripción del Grupo Villeta para el sur-occidente de Cundinamarca. Considera que esta secuencia estratigráfica está compuesta, de base a techo, por las siguientes Formaciones: Trincheras, Areniscas de Útica, Hiló y La Frontera, las cuales Ingeominas en la Plancha 208 – Villeta del año 1993, delimita dentro de las vertientes del río Villeta a la Formación Areniscas de Útica y Trincheras (vertiente occidental, y sitio de interés), y a la Formación Hiló (vertiente oriental).

Posteriormente Ingeominas, según Barreto y Duarte (2004), proponen el nombre de Formación Útica para la misma secuencia que aflora en la vereda de Salitre Blanco. Etayo-Serna (op.cit.), describe a la Formación Areniscas de Útica (en la región de Apulo),

como una secuencia de arenisca bio-clástica cuarcítica - calcárea, color gris, de grano fino hasta medio y grueso, estratificación laminar fina, sub-paralela a ondulosa, y ocasionalmente masiva, compuesta por cuarzo redondeado y fragmentos de conchas de cefalópodos, todo con espesor de unos 40 m. Por encima y debajo describe la presencia de lutita arcillosa gris oscura a negra y de carácter fisible.

La Formación Areniscas de Útica es el nombre asignado informalmente por Moreno (1993) para designar una sucesión de arenitas arcósicas y líticas, con espesor aproximado de unos 450 m según sección levantada en la carretera “Villeta – Útica”, tramo de La Magdalena. Esta unidad está constituida por una sucesión de arenitas sub-arcósicas y sublitoarenitas de grano fino a muy grueso, conglomeráticas, en capas de conglomerados de gránulos y guijos, la secuencia es a menudo grano-decreciente, en capas gruesas frecuentemente cuneiformes. Entre los fragmentos líticos se destacan las provenientes de rocas ígneas. Dentro de esta sección se presentan intercalaciones rítmicas de limolitas y lodolitas negras, estratificadas en capas delgadas y medias. En la sección “Villeta –La Magdalena”, hay intercalaciones de capas de caliza micrítica y biomicríticas nodulares; en la localidad de Útica hay en la parte superior de la formación un nivel de 53 m de caliza arenosa biomicrítica en capas delgadas a medias.

8.2.3 Formación Trincheras (Kit)

Es el nombre dado por Cáceres y Etayo (1969) para designar la sucesión de lodolitas con intercalaciones de caliza y arenitas, que constituyen la parte inferior del Grupo Villeta. Su localidad tipo se encuentra ubicada en la quebrada Trincheras al oriente de la fábrica de Cementos Diamante en el Municipio de Apulo. Estos autores dividieron la Formación en dos segmentos, el inferior calizo-arcilloso, y el superior predominantemente arcilloso.

Está constituida por una sucesión de lodolitas y limolitas calcáreas negras, estratificadas en capas delgadas, medias a gruesas, planas a ligeramente onduladas, con laminación plano paralela. En los taludes de la carretera Villeta-Honda en el sitio denominado como el sector de Cune, y en el flanco derecho del río, afloran lodolitas arcillosas de color negro mate, con estratificación delgada a laminar, e intercalaciones de algunos niveles delgados de caliza micrítica y margas también de color negro. Es frecuente la presencia de venas de calcita blanca en espesores variables, normalmente asociadas a fracturas y diaclasas con frecuencias sistemáticas y existencia de pirita.

8.2.4 Coluviones y Conos de deyección antiguos (Qc/Qcd)

Serie de acumulaciones locales derivadas de las Formaciones litológicas antes mencionadas. En el caso de la Formación Areniscas de Útica, ésta aporta grandes bloques de arenisca bio-clástica cuarcítica-calcárea, matriz soportados en material arcilloso rojizo a amarillo y naranja. Los bloques son sub-angulares, y algunos presentan diámetros hasta de 2 m. Se han observado principalmente en la divisoria de aguas entre los mencionados sitios de Cune y del Intercambiador. Su fuente principal se localiza en la secuencia que conforma una cuchilla topográfica por el costado occidental de los sitios de

interés, el cual parece representar el ápice de un antiguo cono de deyección que se prolonga hacia el oriente, y conforma el terreno escalonado o aterrazado donde se asienta el casco urbano de Villeta.

Dada la ubicación de estos coluviones, parecen corresponder a un antiguo cono de deyección del río Cune, cuando éste se encontraba a una mayor cota, y su curso podría ser aproximadamente la ladera donde actualmente se localiza el deslizamiento El Cune.

8.2.5 Conos de deyección recientes y aluviones (Qfl/Qal)

Corresponden a una serie de acumulaciones aluvio torrenciales y de flujos de lodo (Qfl) y detritos, localizados a lo largo de los canales secundarios que drenan el costado oriental del Anticlinal de Villeta principalmente hacia el valle del río Villeta.

Consisten de intercalaciones lenticulares, angostas a manera tubular, y depositados en el fondo de los valles angostos, que al aproximarse a la llanura del río Villeta, se dispersan de manera sub-radial.

Hacia el centro del valle, aguas abajo de la confluencia los ríos Villeta, Bituima, Dulce y se identifican una serie de terrazas escalonadas hasta de cuatro niveles.

8.2.6 Depósitos Antrópicos (Qan)

Acumulaciones dispuestas recientemente como escombreras y disposición de material sobre la ladera inestable de Cune.

8.2.7 Depósitos de Deslizamiento (Qdd)

Acumulaciones de suelos transpuestos, es decir generados a partir de movimientos en masa sub-recientes. Se localizan principalmente hacia la parte alta del sitio denominado como el “Intercambiador”. Compuestos por bloques de arenisca y matriz areno –arcillosa.

8.2.8 Depósitos de Talus (Qta)

Acumulaciones generadas por procesos de desprendimiento, caídas y acomodaciones al pie de laderas escarpadas.

8.2.9 Suelo Residual (Qsr)

Corresponde al horizonte VI del perfil de meteorización de las rocas que conforman el sitio de interés. Se trata de material arcilloso, colores rojo y naranja. El espesor es variable entre 2 a 4 m.

8.3 Geología Estructural

8.3.1 Anclinorio de Villeta

Comprende la mayor estructura de la zona de estudio. Se trata de una estructura asimétrica de unos 15 km de longitud y 4 km de ancho, localizada entre la población de Villeta y el oriente de la localidad de Útica. El flanco oriental está delimitado y resaltado principalmente por la Formación Areniscas de Útica hacia el núcleo y la Formación Trincheras en la parte periclinal. La estructura presenta una serie de plegamientos y rupturas locales, resalta regionalmente entre los valles del Río Villeta y el lineamiento producido por los valles del Alto Cune y de la Quebrada Negra.

El “boquerón” topográfico que presenta la serranía lo establece la Formación Areniscas de Útica, a la altura de la localidad de La Magdalena, donde se registran una serie de repliegues menores, localizados en el núcleo de la estructura de interés.

Ingeominas, en las diferentes planchas geológicas que se han editado hasta la fecha, traza una serie de fallas, interpretadas como de cabalgamiento, y pliegues menores o secundarios asociados al pliegue principal. Esta disposición estructural sugiere la configuración de una estructura “positiva”, tipo “Horst”.

En la mayoría de los afloramientos de la Formación Arenisca de Útica, dado su carácter quebradizo y cristalino, se presenta una fracturación de tipo distensivo y abierto, con frecuencia y persistencia sistemática; seguramente en el caso de un estilo compresivo o de corrimiento, la fracturación sería un tanto desordenada o imbricada.

En la fotointerpretación con imágenes altas, en el flanco occidental del pliegue se alcanza a identificar el desarrollo de un trazo sub-anular, con disposición errática en algunos de los elementos estructurales identificados. Desde ese trazo se observa el desprendimiento de acumulaciones de tipo coluvial o de flujos, que invaden el cauce del río Cune en su parte alta.

8.3.2 Sistemas de falla de Quebradanegra

En la Plancha 208, Ingeominas delimita al anticlinorio de Villeta, en su flanco occidental, por una serie de fallas inversas y sub-paralelas entre sí. De acuerdo a la cartografía mencionada, sugiere un estilo estructural en escamas y de traslape o de corrimiento. Este conjunto de fracturas las denomina como Sistema de Fallas de Quebrada Negra, debido seguramente, a que se localizan a lo largo del valle de dicha corriente. En el terreno se observan gruesos coluviones arcillosos de color negro, derivados de la Formación Trincheras, afectada por un intenso brechamiento.

El valle de la Quebrada Negra, tiene expresión regional, y es evidente el lineamiento de carácter regional que se aprecia su continuidad al sur y norte. Ingeominas (1998) delimita al valle del Río Villeta, por las fallas de: “Cune-Intercambiador”, Tobia y Villeta al Occidente. Éstas han sido clasificadas también, como de tipo inverso (Ingeominas,

2001), con buzamiento hacia el Este. El trazo de las primeras dos se aprecia de manera regular al norte de la población de Villeta. La tercera, parece corresponder a un sistema imbricado de fracturas que se relevan en el rumbo, y se prolongan hacia la vertiente oriental del Río Villeta.

En conjunto con el denominado Sistema de Fallas de Quebrada Negra, establecen la denominada estructura del Anticlinorio de Villeta, la cual pareciera representar un bloque de tipo Horst.

8.3.3 Sistema de fallas del río Villeta

Por el flanco oriental del Anticlinorio de Villeta, se identifican tres fallas principales denominadas como: Falla de Cune – Intercambiador, Falla de Villeta, y Falla de Tobia. De acuerdo a la cartografía de Ingeominas (2001), también son de tipo inversas. Sus trazos resaltan al colocar en contacto a la Formación Trincheras (Kitr) contra rocas duras de la Formación Areniscas de Utica al occidente, y de la Formación Hiló (Kih), al oriente y fuera de la zona en estudio. Es evidente la asociación o presencia de flujos de lodo y detritos, algunos asociados con movimientos en masa, y erosión hídrica concentrada a lo largo de una serie de canales menores, con orientaciones rectilíneas.

La Falla de Cune – Intercambiador, esta falla cruza el sitio de interés entre los sitios denominados como del Intercambiador y El Cune, con dirección NNE. Produce la repetición de parte de la Formación Areniscas de Útica a ambos lados, y con diferencia en altura de unos 100 m.

La zona de falla o de efectos cataclásticos es de unos 150 m de ancho, y además establece la mineralización de yeso y eventualmente carbonatos a manera de venas de hasta 5 cm. de ancho, y sin ninguna orientación preferencial. Igualmente coincide con el desarrollo del sitio inestable en estudio, denominado como el Intercambiador, sobre la carretera que de Villeta, conduce a la población de Guaduas.

La Falla de Villeta, también denominada **falla Oeste** para efectos de la investigación de movimientos en masa en los alrededores de Villeta, y coloca en contacto a la formación Trincheras (Kitr), localizada hacia el tercio inferior de la vertiente izquierda del río, contra la Formación Areniscas de Útica (Kiut), la cual conforma una elevada serranía.

El contacto entre estas dos unidades es neto y se produce el resalte de una serie de lomas o filos topográficos menores, a pesar de lo frágil ante los elementos meteóricos que representa la Formación Trincheras. A lo largo del trazo de esta falla se identifican flujos de detritos y lodo, y la presencia de una serie de cárcavas y nidos de erosión, hacia la parte baja y en el canal del Río Villeta. A lo largo de este trazo, se registra la mineralización de carbonatos en venas y venillas, dentro de un material brechado. En las fotografías aéreas, se puede seguir el trazo rectilíneo y el truncamiento de un patrón de drenaje plumoso – paralelo.

La Falla de Tobia denominada como la **falla Este** del valle del río Villeta, y se dispone hacia el tercio inferior de la vertiente en el costado oriental (derecha). Aquí parece colocar en contacto a rocas de la Formación Trincheras (Kitr) que entonces conforma la parte central y baja del valle, contra la Formación Hiló (Kih), compuesta por una secuencia de lodolitas carbonosas, y muy untuosas. Hacia el occidente, continúa el flanco oriental del Anticlinal o Anticlinorio de Villeta.

Fallas Transversales y Menores. Se identifican una serie de fracturas locales al eje del Anticlinal de Villeta. Se logra su identificación mediante el resalte que se aprecia en los niveles duros. La Formación Areniscas de Útica, de mayor resalte morfológico, expone de manera escalonada una serie de desplazamientos transversales desde el norte hacia el sur.

En el flanco occidental del Anticlinal de Villeta el estilo estructural varía. Aunque se identificaron algunas fracturas también transversales al pliegue regional hacia el NW, las condiciones estructurales no son tan evidentes; tan solo se reconocen amplios depósitos de tipo coluvial y de conos de deyección relacionados a un patrón de drenaje de geometría anular a sub-anular. La fracturación menor que expone esta Formación es sistemática y con disposición ortogonal entre sí (**Figura 3**).

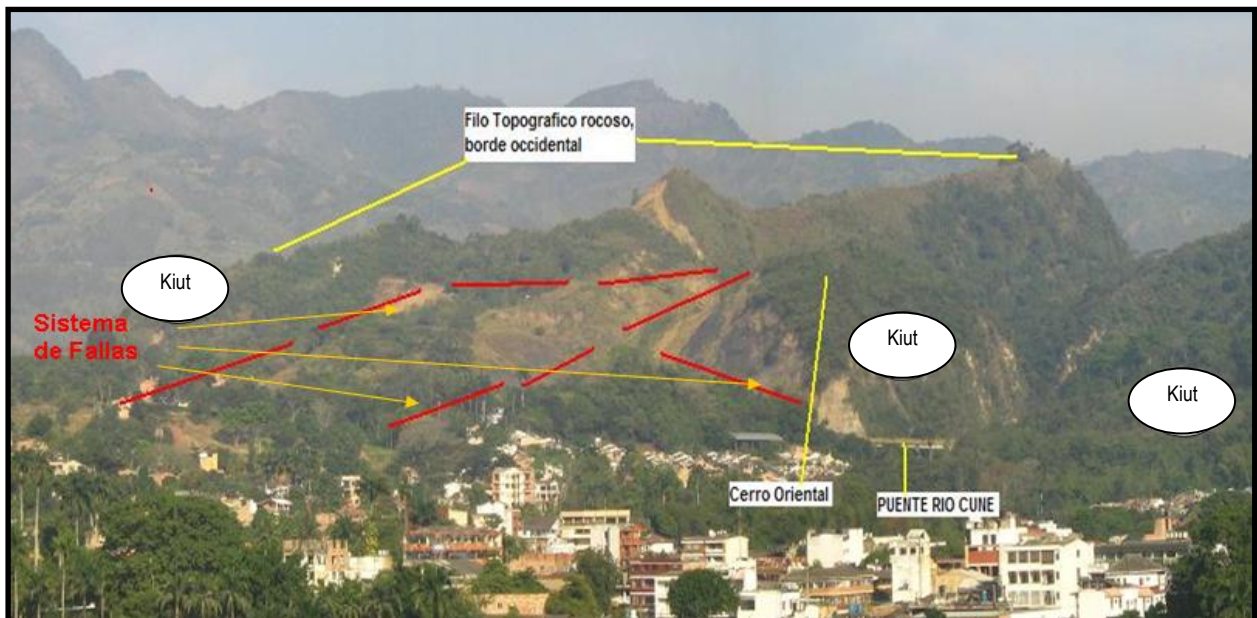


Figura 3. Sistemas de fallas localizadas en la zona de influencia del sitio El Cune.
(Fuente: Consorcio Villeta 2007 - Geól. R. Cortés del Valle)

8.3.4 Bloques Tectónicos identificados

Se tienen entonces por lo menos tres bloques tectónicos. Uno al norte del Río Cune, y que incluye la mayor parte del pliegue regional. Un segundo bloque limitado por una falla EW y que coincide con el trazo del flanco norte del movimiento de “El Cune”, y por la falla Cune – Intercambiador (NNE), y que delimita el flanco oriental del pliegue. El tercer bloque consiste en el filo rocoso que delimita las zonas inestables contra la vía que continúa hacia Guaduas. Cada uno de estos bloques presenta secuencias con orientaciones diferentes y contrastantes, en la parte central se localiza la zona inestable, comprometida por los movimientos de El Cune.

8.3.5 Modelo Estructural y Geológico.

Las secuencias de rocas duras o de mayor cementación no ofrecen mayor afectación o deterioro, mientras las secuencias de lodolitas arcillosas presentan una intensa deformación a lo largo de las fallas geológicas. Es posible que las rocas lodolíticas presenten una mayor condición de esfuerzos residuales asociados con los siguientes factores:

- Fracturas regionales;
- La posición con relación al pliegue anticlinal
- El desarrollo y presencia de anhidrita y de yeso (contenido de sulfatos) en la faja de materiales afectados por fracturación tectónica.

También es importante recordar que la secuencia que se propone corresponde a la Formación Murca, debido a su posición infrayacente a las areniscas, que tienen un alto contenido de yeso, ofrece una alteración y modificación a su comportamiento mecánico, bien sea por rápida disolución, por su posible hidratación o por el paso de anhidrita a yeso.

Las rocas con contenido de yeso presentan una fácil y rápida disgregación en fragmentos aciculares y planares. De hecho también es evidente que la misma secuencia, al no estar comprometida por tectonismo, manifiesta una mejor condición de estabilidad que se aprecia en algunos taludes ligeramente degradados.

En síntesis, el modelo geológico propuesto corresponde a un corredor de unos 400 m de ancho compuesto por la Formación Trincheras y delimitada en sus bordes por la Formación Areniscas de Útica (Kiut). La primera de condición lodosa, la segunda de carácter detrítico calcáreo – bioclástico, muy bien cementada y dura. La fase lodosa además se encuentra afectada por procesos tectónicos, y a su vez afectada de manera severa por venas de yeso secundario, seguramente proveniente de la anhidrita que se aprecia en cantidad sobre los planos de estratificación de la formación lodosa. Cubriendo a la misma Formación Trincheras, se encuentra un grueso depósito coluvial – torrencial – cono de deyección, compuesto por bloques de la Formación Arenisca de Útica (Kiut).

Todo parece indicar que la roca con alto contenido en yeso denota la mayor inestabilidad al exponerse en superficie.

Como sitio de aporte de agua al sistema donde se ubican los dos sitios inestables, se deben considerar los dos cerros compuestos por la Formación Arenisca de Útica (Kiut), en los que la permeabilidad es de tipo secundario. Al occidente, el mencionado filo topográfico se prolonga por unos 600 m al norte; al oriente, la misma secuencia presenta buzamientos hacia la zona deprimida, por lo tanto el área aferente es amplia. Cabe recordar que la extensión de la misma Formación Areniscas de Útica (Kiut) se prolonga hacia el valle medio y alto de la cuenca del Río Cune, de donde seguramente se establece líneas de flujo hacia las zonas inestables, las cuales están ubicadas a menor cota. (*Referencia del marco geológico regional Consorcio Villeta 2007, Estudio Geotécnico realizado para Ecopetrol*).

9 FACTORES EN LA ESTABILIDAD DE TALUDES EN ROCAS LODOSAS - DESLIZAMIENTO EL CUNE

En este capítulo se describen los principales factores que intervienen en la estabilidad de los taludes de corte en este tipo de materiales, realizando un paralelo de los factores y condiciones estabilidad de las rocas lodosas con la zona estudiada en el presente proyecto. Se subrayarán los aspectos relevantes que se relacionan con las condiciones encontradas en el deslizamiento El Cune.

Al hablar de fenómenos de inestabilidad de taludes en rocas lodosas, es necesario abarcar consideraciones sobre el perfil de meteorización, la influencia de agentes naturales, los procesos, mecanismos y tipos de falla más frecuentes y la relación con el origen y estructura de la roca. Además, deben tenerse en cuenta para su análisis los conceptos recientes de resistencia residual, falla progresiva y las condiciones que impone el medio geológico, como la interestratificación con materiales diferentes; especialmente areniscas y calizas.

9.1 Tipos de Deslizamientos

El poco espesor, que generalmente presentan los perfiles de meteorización desarrollados en las rocas lodosas, determina que se llegue a los taludes naturales de equilibrio, mediante deslizamientos intermitentes. Las huellas dejadas por estos deslizamientos dan a los taludes naturales la apariencia de colinas suaves y onduladas, topografía característica de las zonas de rocas lodosas, y conocida como topografía de deslizamientos, la cual se describe en el esquema de la **Figura 4**.

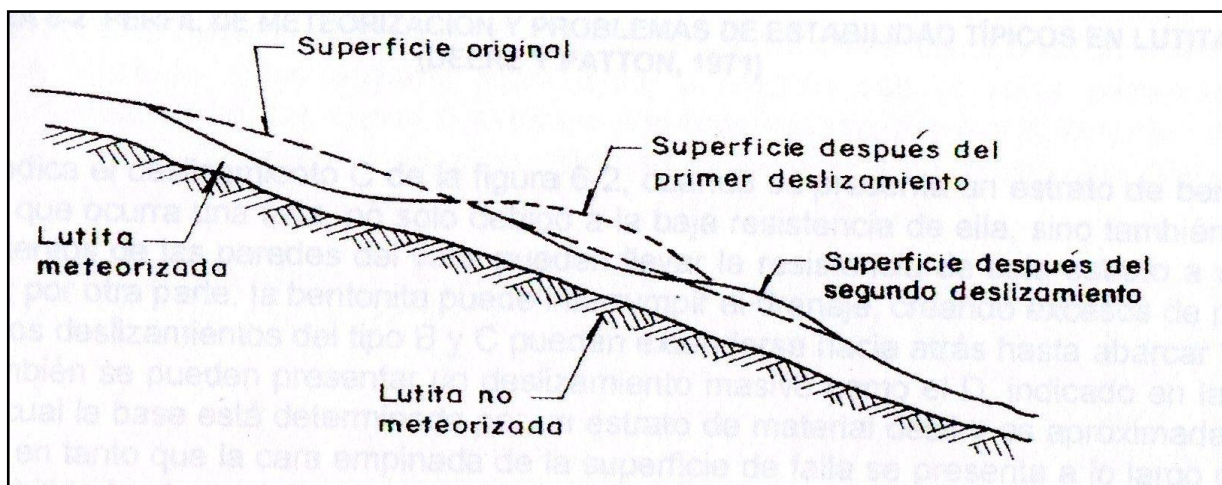


Figura 4. Topografía típica de las zonas de rocas lodosas (Patton y Deere, 1971, Terzaghi y Peck, 1973)

Para Patton y Deere (1971), probablemente el deslizamiento más frecuente en rocas lodosas, sea este de tipo superficial pequeño, que involucra la zona completamente alterada (Horizonte I - b) del perfil de meteorización, como el deslizamiento A de la figura 5, frecuentemente asociado con un nivel freático más alto que el normal.

Aunque los deslizamientos en rocas lodosas son aparentemente simples, algunos pueden llegar a ser bastante complejos, a medida que se involucran en el mismo diferentes tipos de materiales; los taludes en roca lodosas son raras veces uniformes, ya que pueden presentar intercalaciones de arenisca, roca lodosa silíceo, limolita, bentonita. Un deslizamiento como el B, de la figura 5, podría ocurrir si estuviera presente un estrato permeable (zonas de limonita, diaclasas inclinadas o fisuras pulidas), en el cual se presenten excesos de presión en los poros, que pueden originar una falla a lo largo de dicho estrato (Figura 5).

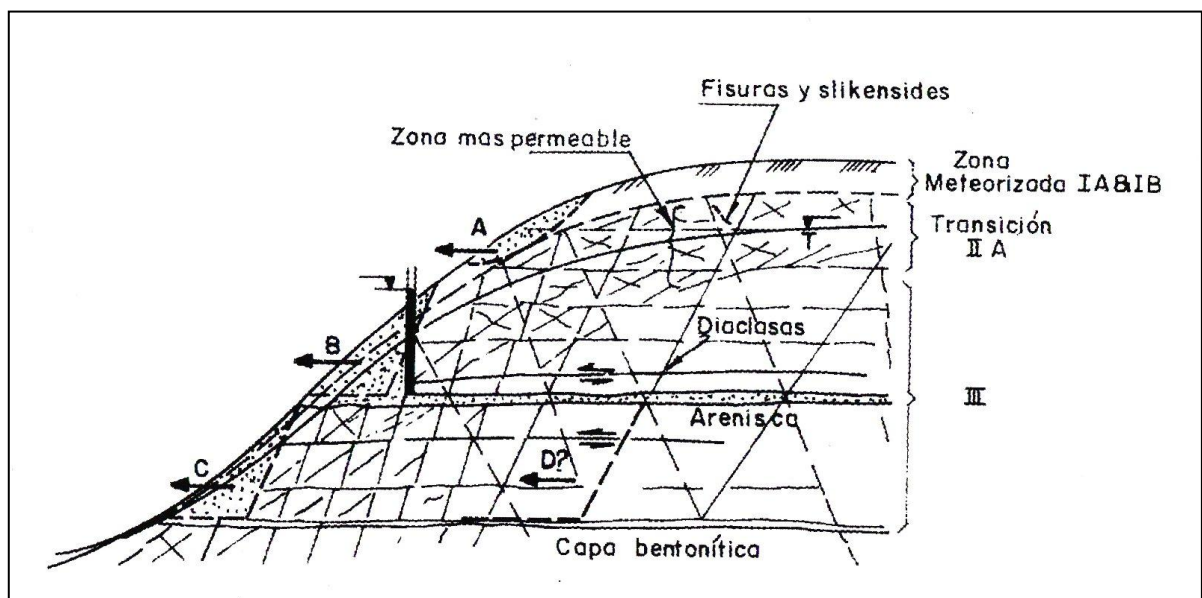


Figura 5. Perfil de Meteorización y Problemas de Estabilidad Típicos en Rocas Lodosas (Deere y Patton, 1971).

Como lo indica el deslizamiento C de la figura, cuando se presenta un estrato de bentonita, es posible que ocurra una falla, no solo debido a la baja resistencia de ella, sino también a que los movimientos de las paredes del valle pueden llevar la resistencia de este estrato a valores residuales; por otra parte, la bentonita puede interrumpir el drenaje, creando excesos de presión de poros; los deslizamientos del tipo B y C pueden extenderse hacia atrás hasta abarcar todo el talud. También se puede presentar un deslizamiento masivo como el D, indicado en la figura, en el cual la base está determinada por un estrato de material débil y es aproximadamente horizontal, en tanto que la cara empinada de la superficie de falla se presenta a lo largo de una zona de debilidad o de un estrato permeable o impermeable; al presentarse un deslizamiento de

este tipo, pueden ocurrir pequeños movimientos dentro de la masa que incrementan su permeabilidad y la infiltración puede llegar a ser mayor; sin embargo, las condiciones de salida del agua subterránea pueden dificultarse, ya que la meteorización o hundimientos superficiales o acumulación de material desleído, reducen la permeabilidad de la zona cercana a la superficie; como consecuencia de las altas presiones de poros así originadas, el talud puede ser cubierto por un sinnúmero de deslizamientos superficiales (tipo A, B y C), que no dejan apreciar el deslizamiento profundo (tipo D); a menos que este deslizamiento esté en movimiento, es difícil establecer su existencia mediante sondeos, puesto que la posición relativa de los bloques de roca lodosa, dentro de la masa deslizada, puede ser la misma que tenían antes que este ocurriera (Patton y Deere 1971). Condiciones naturales que aplican en el comportamiento del deslizamiento El Cune, caracterizado por la presencia de continuos flujos de detritos manifestados en la superficie de la ladera que dan la impresión de una topografía asociada a espesores de deslizamientos locales que dificultan entender el mecanismo de falla general del terreno.

9.2 Ablandamiento progresivo

Terzaghi y Peck (1973) consideran que el comportamiento de las rocas lodosas en los taludes naturales o en cortes depende principalmente del grado de cementación alcanzado durante la formación de los depósitos y Terzaghi (1936) atribuye la falla de taludes en arcillas duras y rocas lodosas, a un ablandamiento progresivo, como consecuencia de las grietas y fisuras asociadas con su estructura secundaria. Según ellos, los cortes a media ladera con taludes empinados, en rocas lodosas bien cementadas, pueden permanecer estables durante muchos años, en este caso, la zona potencial de deslizamiento está constituida por bloques de roca determinados por las grietas y fisuras, las cuales se amplían más debido a la acción de la gravedad; durante las épocas lluviosas, los espacios vacíos se llenan de agua, aumentando temporalmente las presiones en los poros, con lo cual se presenta una disminución en la resistencia al corte a lo largo de la superficie potencial de deslizamiento, pudiendo ocurrir una falla; sin embargo, debido a la alta permeabilidad del material fragmentado en movimiento, el talud puede estabilizarse fácilmente, ya sea porque el exceso de presión de poros se disipa rápidamente o porque se utilicen medios mecánicos simples como construcción de drenaje subsuperficial y profundo.

En el estudio del mecanismo de falla del terreno en el deslizamiento de El Cune consideramos la influencia importante de la estructura secundaria de la roca, representada en planos de fractura, venas de calcita y superficies pulidas asociadas a factores geológicos. En dichos planos se ha infiltrado agua subsuperficial y profunda que ha generado procesos de ablandamiento y altas presiones de poros que contribuyen a la inestabilidad de las laderas en la zona de estudio.

9.3 Rebote de las paredes y el fondo en excavaciones en rocas lodosas

Otro factor importante asociado con procesos de descarga en rocas lodosas, es el rebote de los taludes y el fondo de las excavaciones; esto se atribuye generalmente a los altos esfuerzos horizontales almacenados cuando se inicia un corte, las capas donde los esfuerzos horizontales en un lado han sido reducidos a cero, tenderán a moverse hacia la excavación a lo largo de los planos de estratificación o el talud se moverá con respecto a los estratos más bajos; a medida que el corte profundiza, por excavación o socavación, las capas o estratos inferiores se irán moviendo también; si estos movimientos ocurren, se formarán zonas de milonitas en los planos de movimiento diferencial o en las diaclasas más pendientes (Underwood 1967, Patton y Deere 1971).

Se destaca este factor de influencia en el estudio del comportamiento del deslizamiento El Cune ya que en 1998 se llevó a cabo un corte en cajón de altura promedio de 20 a 30 m para la construcción de la variante de la vía; en el periodo de tiempo posterior se registraron deformaciones relacionadas con levantamiento de la banca manifestadas entre los años 1999 y 2000.

9.4 Susceptibilidad al desleimiento

La susceptibilidad de las rocas lodosas al desleimiento también puede ser significativa en la falla de cortes; aunque un corte pueda ser estable contra fallas mayores, está sujeto a un deterioro permanente en su cara, debido al continuo secado y humedecimiento de las capas de roca lodosa, por efecto de los cambios climáticos; la presencia de minerales arcillosos, que son particularmente susceptibles de expansión y contracción, incrementa la tasa de desleimiento; sin embargo este desleimiento puede conducir a fallas más serias especialmente si a los detritos o restos de roca, provenientes de la cara del corte, se le permite acumularse y perturbar el drenaje de la pata, pudiendo causar un estancamiento. (Deere y Patton 1971).

En la zona de estudio existieron diferentes eventos de inestabilidad asociados con el desleimiento de la roca lodosa, principalmente por procesos de humedecimiento y secado de los materiales. Se resalta que existen cambios bruscos tanto en la temperatura como en el régimen de lluvias en el sitio, características climáticas que han producido deslizamientos en taludes compuestos por rocas lodosas.

9.5 Características esfuerzo-deformación-falla progresiva

Finalmente, en la estabilidad de taludes naturales o cortes en rocas lodosas, juega un papel importante, las características esfuerzo - deformación (pérdida de resistencia y rigidez con la deformación), especialmente en lo referente al desarrollo de fallas progresivas.

Como se puede apreciar, son muchos los factores que determinan la estabilidad de los taludes en rocas lodosas; no todos tienen que estar presentes al mismo tiempo, para crear una situación de inestabilidad, sin embargo, es necesario que cada factor sea analizado y considerada su influencia en las condiciones de inestabilidad, pues a menudo, los análisis fallan por no considerar todos los factores que pueden conducir a una falla.

Para el caso específico de esta investigación consideramos de mucha importancia los siguientes factores:

- Factores asociados con la geología regional y local.
- Procesos de Ablandamiento progresivo en planos de discontinuidades relacionados con incremento de presiones de poros y disminución de resistencia en dichos planos.
- Desarrollo de falla Progresiva en los materiales presentes. Este Proceso se considera asociado con el tiempo durante el cual la ladera sufrió las mayores deformaciones después de intervención antrópica (cortes viales).

Los factores antes mencionados han contribuido en la formación y evolución del deslizamiento El Cune, actualmente en tratamiento correctivo.

10 ASPECTOS GEOTÉCNICOS DEL DESLIZAMIENTO EL CUNE

10.1 Zona de estudio

El área donde se localiza el deslizamiento El Cune presenta componentes geológicos regionales y locales que hacen que la zona sea muy susceptible a procesos de inestabilidad bajo cambios menores en el estado de esfuerzos. Como se menciona en los capítulos anteriores las laderas están compuestas por materiales de baja resistencia al corte, estos materiales fluyen con facilidad ante procesos de alivio o incremento de cargas. (Procesos de carga y descarga)

Las rocas lodosas de la Formación Trincheras presentan baja resistencia y alta degradabilidad ante procesos de humedecimiento y secado. Se destaca que en la zona se presentan cambios de temperatura drásticos y un régimen de lluvias importante (del orden de 200 mm a 400 mm mensuales); condiciones que hacen que los materiales se degraden en corto tiempo con cambios en su estructura principalmente en los minerales arcillosos.

10.2 Materiales

10.2.1 Rellenos Heterogeneos

Asociados con antiguas reconfiguraciones de la ladera en los sitios explorados el espesor de estos materiales varía entre 1,0 m y 4,0 m.

10.2.2 Depósitos coluviales

Existen depósitos coluviales compuestos por bloques de arenisca embebidos en una matriz arcillosa blanda y húmeda el espesor del depósito varía entre 16 y 23 m (**Fotografías 1 a 3**).



Fotografías 1 a 3. Aspecto de la matriz y bloques del depósito coluvial. Marzo de 2010.

10.2.3 Roca lodosa

El estrato rocoso se registra a una profundidad de 6,0 m en el flanco derecho del deslizamiento. En la zona central el estrato rocoso se localiza a una profundidad de 23 m. y en el flanco izquierdo se encuentra a 15 m de profundidad, delimitando una cubeta – depresión, en la que se han depositado los coluviones presentes en la actualidad (**Fotografías 4 a 5**).



Fotografías 4 y 5. Aspecto de la roca lodosa excavada en los pozos de abatimiento. Marzo de 2010.

10.2.4 Niveles de agua

El nivel freático regional en el sitio del deslizamiento se localiza en el contacto depósito coluvial arcilloso/roca a una profundidad promedio entre 12,0 y 15,0 m. En el depósito se destaca la presencia de bloques de roca compuestos por areniscas de la Formación Utica.