

**EVALUACIÓN GEOLOGICA, GEOMORFOLOGICA Y CARACTERIZACIÓN
GEOTECNICA DEL DESLIZAMIENTO EL CAIRO EN EL MUNICIPIO DE SAN
LUIS DE GACENO EN LA JURISDICCIÓN DE LA CORPORACIÓN AUTONOMA
REGIONAL DE CHIVOR (CORPOCHIVOR).**

OMAR EDUARDO FAJARDO FONSECA

**UNIVERSIDAD PEDAGOGICA Y TECNOLOGICA DE COLOMBIA
U.P.T.C.
FACULTAD SECCIONAL SOGAMOSO
ESCUELA DE INGENIERIA GEOLOGICA
SOGAMOSO
2016**

**EVALUACIÓN GEOLOGICA, GEOMORFOLOGICA Y CARACTERIZACIÓN
GEOTECNICA DEL DESLIZAMIENTO EL CAIRO EN EL MUNICIPIO DE SAN
LUIS DE GACENO EN LA JURISDICCIÓN DE LA CORPORACIÓN AUTONOMA
REGIONAL DE CHIVOR (CORPOCHIVOR).**

OMAR EDUARDO FAJARDO FONSECA

Proyecto de grado para obtener el título de ingeniero geólogo

Modalidad de proyecto de investigación

**Director
RORY RENE FORERO
Ingeniero Geólogo, Candidato Msc.**

**UNIVERSIDAD PEDAGOGICA Y TECNOLOGICA DE COLOMBIA
U.P.T.C.
FACULTAD SECCIONAL SOGAMOSO
ESCUELA DE INGENIERIA GEOLOGICA
SOGAMOSO
2016**

Nota de Aceptación

Presidente del Jurado

Jurado

Jurado

Sogamoso, 26 de Abril de 2016

Dedicatoria

A Dios por permitirme concluir esta etapa.

A mi madre por su esfuerzo, dedicación, compañía y cariño.

A mi familia por su apoyo y consejos.

A todos aquellos que no creyeron en mí, todos aquellos que esperaron mi fracaso en cada una de las etapas de mis estudios, a todos aquellos que supusieron que no lo lograría.

A Cristian Alberto Hernández Salazar (Q.E.P.D), por su amistad incondicional, por permitirme compartir grandes momentos y especialmente por su compañía en gran parte de este camino.

A mis profesores, amigos, y todo aquel que de diferentes maneras contribuyó en mi formación.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC) por la formación y la calidad de profesionales brindando sus conocimientos y apoyo.

Al Convenio interadministrativo específico n° 1610 de 2015: Investigación aplicada a la modelación del territorio a partir del análisis geomorfológico del departamento de Boyacá, por permitirme hacer parte de su grupo de trabajo y compartirme conocimiento y experiencia.

Al Ingeniero Héctor Antonio Fonseca Peralta por la oportunidad brindada y apoyo en esta etapa.

Al Ingeniero Rory Forero por su guía como director del proyecto.

A la Ingeniera Andrea Ceballos, por su compañía en este proyecto y asesoría.

Al Ingeniero Kristian N. Rodríguez por su amistad y conocimientos compartidos en el área de la geotecnia.

Al Ingeniero Omar Pérez por su amistad y brindarme sus conocimientos y asesoría.

Al Ingeniero Ernesto Gutiérrez y al Ingeniero Rafael Pérez por el apoyo técnico, conocimientos y asesoría.

A mi primo Fabián Fonseca por su compañía y apoyo en el desarrollo del proyecto.

A mis tíos, primos, y demás familiares quienes de diferentes maneras contribuyeron en esta etapa.

A mis amigos quienes me acompañan en el día a día.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCION	21
1. GENERALIDADES	22
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	22
1.2 OBJETIVOS	22
1.2.1 Objetivo general	22
1.2.2 Objetivos específicos.....	22
1.3 LOCALIZACIÓN	23
1.4 ALCANCES Y LIMITACIONES	25
1.4.1 Alcances.....	25
1.4.2 Limitaciones	25
1.5 JUSTIFICACIÓN	25
1.6 ASPECTOS METODOLOGICOS	26
1.7 ESTADO DEL ARTE	28
1.7.1 Información Base	29
1.7.2 Contexto teórico acerca del desarrollo de proyectos geomorfológicos y zonificación de susceptibilidad y amenazas por movimientos en masa	30
1.7.3 Estudios realizados en el Municipio de San Luis De Gaceno	30
1.7.4 Contexto teórico acerca del desarrollo de proyectos geotécnicos y geomecánicos.	30
1.8 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	31
1.9 TRABAJO DE CAMPO	31
2. GEOLOGIA	32
2.1. GEOLOGIA REGIONAL	32
2.2. GEOLOGIA LOCAL	34
2.2.1 Formación Dura y Plaenners (Ksgdp)	34
2.2.2 Formación Arcillas Del Limbo (Teal)	34

2.2.3 Formación Areniscas Del Limbo (Tearl).....	35
2.2.4 Depósitos Coluviales (Qc).....	36
2.3 GEOLOGIA ESTRUCTURAL.....	37
2.3.1 Falla de Tesalia.....	37
3. ANALISIS HIDROLOGICO.....	39
3.1 CARACTERIZACION HIDROLOGICA	39
3.1.1 Precipitación.....	40
3.1.1.1 Calculo de la precipitación media multianual	40
3.1.1.2 Precipitación media por método de las isoyetas	41
3.1.2 Temperatura.....	41
3.1.3 Humedad Relativa	42
3.1.4 Evaporación.....	42
3.1.5 Evapotranspiración Potencial (ETP).....	43
3.1.6 Escorrentía (Q)	45
3.1.7 Balance Hídrico	48
4. HIDROGEOLOGIA	49
4.1 ACUÍFERO	49
4.1.1 Acuíferos Libres	49
4.1.2 Acuíferos Confinados	49
4.1.3 Acuíferos Semi-confinados	50
4.2 ACUITARDO Y/O ACUICIERRE.....	50
4.3 ACUIFUGO	50
4.4 UNIDADES HIDROGEOLOGICAS	51
4.4.1 Acuíferos.....	51
4.4.2 Acuitardos.....	51
4.4.3 Acuicierres.....	52

5. GEOMORFOLOGIA	53
5.1 METODOLOGIA.....	53
5.1.1 Insumos básicos	54
5.1.1.1 Modelo Digital De Elevación.	54
5.2 MORFOMETRÍA.....	55
5.2.1 Mapa de Pendientes	55
5.3 MORFOGÉNESIS	56
5.3.1 Ambiente Denudacional.....	57
5.3.1.1 Cono y Lóbulo Coluvial y de Solifluxión (Dco).....	57
5.3.1.2 Deslizamiento Translacional (Ddt)	57
5.3.1.3 Deslizamiento Rotacional Inactivo (Ddri).....	58
5.3.1.4 Escarpe de Erosión Menor (Deeme).....	58
5.3.1.5 Ladera Denudada (Dld).....	59
5.3.1.6 Ladera Ondulada (Dlo).....	59
5.3.2 Ambiente Fluvial.....	60
5.3.2.1 Cauce Aluvial (Fca).....	61
5.3.2.2 Planos y Llanuras de Inundación (Fpi).....	61
5.3.3 Ambiente Estructural	62
5.3.3.1 Escarpe de línea de falla (Sife)	62
5.3.3.2 Ladera de Contra Pendiente Estructural (Slcp).....	63
5.3.3.3 Ladera Estructural (Sle)	63
5.4 MORFODINAMICA	63
6. ZONIFICACION DE LA SUSCEPTIBILIDAD POR MOVIMIENTOS EN MASA	64
6.1 METODO HEURISTICO	65
6.1.1 método de proceso de análisis jerárquico (AHP).....	65
6.2 MAPAS E INSUMOS TEMATICOS.....	66
6.2.1 Modelo Digital de Elevación (DEM).....	66
6.3 INSUMOS TEMATICOS.....	66

6.3.1 Geología	66
6.3.1.1 Densidad de Fracturamiento	66
6.3.1.2 Fabrica y/o Estructura	67
6.3.1.3 Resistencia.....	68
6.3.1.4 Susceptibilidad geológica.....	71
6.3.2 Geomorfología	72
6.3.2.1 Morfometría.....	73
6.3.2.2 Morfogénesis.....	76
6.3.2.3 Morfodinámica.....	77
6.3.2.4 Susceptibilidad Geomorfológica Total.....	80
6.3.3 Suelos	81
6.3.3.1 Textura.....	82
6.3.3.2 Drenaje natural.....	83
6.3.3.3 Taxonomía	83
6.3.3.4 Profundidad.....	84
6.3.3.5 Tipo de arcilla.....	84
6.3.3.6 Susceptibilidad de suelos total	85
6.3.4 Cobertura de la tierra	86
6.3.4.1 Profundidad radicular	87
6.3.4.2 Drenaje profundo	87
6.3.4.3 Numero de estratos.....	88
6.3.4.4 Evapotranspiración	88
6.3.4.4 Calculo total del atributo cobertura de la tierra.....	89
6.4 ZONIFICACION DE LA SUSCEPTIBILIDAD	90
6.4.1 Proceso Analítico Jerárquico (AHP)	91
7. ZONIFICACION DE AMENAZAS	93
7.1 METODOLOGIA UTILIZADA	93
7.2 EVALUACION DE DETONANTES	95
7.2.1 Condiciones climáticas	95

7.2.1.1 Precipitación media anual y temperatura media anual.....	96
7.2.1.2 Precipitación máxima diaria	96
7.3.1.3 Cobertura del detonante climático.....	96
7.2.2 Detonante sísmico	97
7.3 CALIBRACION DEL MAPA DE AMENAZA RELATIVA TOTAL	98
8. ANALISIS GEOTECNICO Y GEOMECANICO	105
8.1 CARACTERIZACION GEOTECNICA Y GEOMECANICA	106
8.1.1 Antecedentes.....	106
8.1.2 Trabajo de campo.....	109
8.1.3 Trabajo de laboratorio.....	109
8.1.4 Análisis de discontinuidades	116
8.1.5 Clasificación del macizo rocoso	119
8.1.5.1 Obtención del RQD	119
8.1.5.2 Clasificación RMR	120
8.1.5.4 Estimacion del Geological Strength Index GSI.....	123
8.2 OBTENCION DE PARAMETROS DE MODELACION	125
8.2.1 Obtención de parámetros de modelación en roca mediante Roclab	126
8.2.1.1 Criterio de Hoek & Brown Generalizado	126
8.2.1.2 Criterio de Mhor – Coulomb	127
8.2.1.3 Análisis en RocLab	127
8.3 ANALISIS DE ESTABILIDAD	130
8.3.1 Análisis cinemático	130
8.3.2 Análisis estructuralmente no controlado.....	139
8.3.2.1 Modelamiento geológico	139
8.3.2.2 Análisis de estabilidad.....	143
8.3.2.3 Resultados	144
9. PLAN DE MONITOREO	147

9.1 EQUIPOS INSTALADOS	147
9.1.1 Equipos de medición de desplazamiento	147
9.1.2 Equipos de medición de niveles freáticos	147
9.2 ANALISIS Y PROCESAMIENTO DE LA INFORMACION DE MONITOREO	148
9.3 PROPUESTA DE PLAN DE MONITOREO.....	151
9.3.1 Control topográfico de los movimientos.....	151
9.3.2 Control piezométrico.....	153
10. METODOLOGIA DE SISTEMA DE ALERTA TEMPRANA POR DESLIZAMIENTOS	155
10.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	155
10.2 DESCRIPION DEL METODO	155
10.3 APLICACIÓN AL AREA DE ESTUDIO.....	157
10.4 CALIBRACION DEL METODO.....	158
CONCLUSIONES	159
RECOMENDACIONES.....	161
BIBLIOGRAFIA.....	163

LISTA DE TABLAS

	Pag.
Tabla 1: Coordenadas de localización del área de estudio.....	24
Tabla 2: Estaciones hidrometereológicas utilizadas.	39
Tabla 3: Precipitación media del área de estudio por método de isoyetas.	41
Tabla 4: Estaciones utilizadas para el análisis de temperatura	42
Tabla 5: Estaciones interpoladas para el parámetro ETP media.	44
Tabla 6: Cálculo de ETP Media del área de estudio.	44
Tabla 7: Determinación de Valores de CN en suelos.	46
Tabla 8: Valores de CN para las diferentes coberturas del área de estudio.	47
Tabla 9: Valores de precipitación determinados en el área de estudio.....	47
Tabla 10: Balance Hídrico de la zona de estudio.....	48
Tabla 11: Áreas de las diferentes unidades hidrogeológicas.	52
Tabla 12: Clasificación de pendientes según la metodología utilizada.	56
Tabla 13: Áreas y porcentajes de los ambientes y geoformas encontrados en el área de estudio.	56
Tabla 14: Relación entre Métodos, Niveles y Tipos de Zonificación de acuerdo con la escala y el propósito del proyecto.	64
Tabla 15: Rangos de Line Density y Calificación para Zonificación de Susceptibilidad.....	67
Tabla 16: Textura/Fabrica de las rocas.....	67
Tabla 17: Calificación propuesta para Fabrica/Estructura.	68
Tabla 18: Clasificación Fabrica/Estructura de las unidades geológicas de la zona de estudio.	68
Tabla 19: Categorías de resistencia a la compresión simple de las rocas, según Hoke 1996.	69
Tabla 20: Calificación de resistencia geológica de depósitos.	70
Tabla 21: Calificación de resistencia de las unidades del área de estudio.	70
Tabla 22: Clasificación de susceptibilidad de las pendientes.	73
Tabla 23: Rangos de clasificación y calificación de susceptibilidad del parámetro rugosidad.	74
Tabla 24: Rangos de clasificación del atributo Acuenca.....	75
Tabla 25: Clasificación y calificación de las unidades morfogénicas.	76
Tabla 26: Calificación de las unidades geomorfológicas del área de estudio.	77
Tabla 27: Calificación de la inclinación de ladera.	79
Tabla 28: Calificación de suelos para el parámetro morfodinámico.....	80
Tabla 29: Clasificación textural de suelos.....	82
Tabla 30: Calificación del drenaje natural del suelo.....	83
Tabla 31: Calificación de la taxonomía de suelos según orden.	84

Tabla 32: Calificación de profundidad total.	84
Tabla 33: Calificación de tipo de arcillas.	85
Tabla 34: Calificación de susceptibilidad de suelos.	85
Tabla 35: Categorización y calificación de la profundidad efectiva.	87
Tabla 36: Categorización y clasificación del atributo drenaje profundo.	88
Tabla 37: Categorización y calificación del atributo número de estratos.	88
Tabla 38: Coeficientes de cultivos adaptados de FAO	89
Tabla 39: Categorización y calificación del atributo Evapotranspiración.	89
Tabla 40: Calificación de susceptibilidad de cobertura de la tierra.	90
Tabla 41: porcentajes de susceptibilidad del área de estudio.	92
Tabla 42: Calificación del detonante por factores climáticos a partir de la zonificación climática nacional de las lluvias máximas diarias, de acuerdo con su contribución a los movimientos en masa.	97
Tabla 43: Calificación del detonante sismo según su contribución a movimientos en masa.	98
Tabla 44: Estudios realizados previamente por Corpochivor.	106
Tabla 45: Ensayos de laboratorio realizados previamente por Corpochivor.	106
Tabla 47: Zonas de toma de datos y muestras.	109
Tabla 48: Resultados del ensayo del ángulo de reposo.	110
Tabla 49: Resultados del ensayo de propiedades físicas.	111
Tabla 50: Resultados del ensayo de compresión simple.	112
Tabla 51: Resultados del ensayo de Tilt Test.	114
Tabla 53: Descripción de las filtraciones en discontinuidades.	119
Tabla 54: Calidad de la roca según índice RQD.	120
Tabla 55: Obtención de J_v promedio.	120
Tabla 57: Corrección por orientación de las discontinuidades.	123
Tabla 58: Clasificación final y calidad de macizos rocosos en relación al índice RMR.	123
Tabla 59: Características geotécnicas.	123
Tabla 60: Parámetros de modelación determinados mediante ensayos.	126
Tabla 61: Parámetros de modelación determinados mediante RocLab.	130
Tabla 62: Datos de análisis.	131
Tabla 63: Perfiles geotécnicos planteados	139
Tabla 64: Coeficientes de reducción de aceleración sísmica.	144
Tabla 65: Resultados del análisis de estabilidad en el corte A-A'.	144
Tabla 66: Resultados del análisis de estabilidad en el corte B-B'.	145
Tabla 67: Factores de seguridad del corte C-C'.	146
Tabla 68: Descripción de mojones en el área de estudio.	147
Tabla 69: Control de mojones en San Luis De Gaceno.	148

Tabla 70: Comparación de precipitación acumulada y N.F.....	150
Tabla 71: Estaciones de origen de coordenadas permanentes y tiempo de rastreo sugerido.	152
Tabla 72: Formato de captura de datos propuesta.	153

LISTA DE GRÁFICOS

	Pág.
Grafico 1: Valores de precipitación media multianual.	40
Grafico 3: Balance Hídrico del área de estudio.	48
Grafico 4: Porcentajes de susceptibilidad relativa por movimientos en masa en el área de estudio.	99
Grafico 5: Porcentajes de amenazas relativas por movimientos en masa en el área de estudio.	100
Grafico 6: Porcentajes de amenaza con disminución de detonantes a 80%.	101
Grafico 7: Porcentajes de amenaza con disminución de detonantes a 70%.	102
Grafico 8: Porcentajes de amenaza con disminución de detonantes a 60%.	103
Grafico 9: Curvas esfuerzo vs deformación de las muestras sometidas a compresión simple.	113
Grafico 10: Variación del factor de seguridad con el cambio de la presión de poros.	138
Grafico 11: Aproximación teórica de nivel de alerta.	156

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1: Localización del Municipio de San Luis De Gaceno.	23
Figura 2: Ruta Bogotá – San Luis De Gaceno.	24
Figura 3: Mapa Geológico Regional.....	33
Figura 4: Vista del contacto Teal-Tearl en el área de estudio.....	35
Figura 5: Vista panorámica de la Falla Tesalia W desde la Vereda El Cairo	38
Figura 6: Esquema de jerarquización geomorfológica propuesta para INGEOMINAS.	54
Figura 7: Mapa de sombras sobre el DEM 4 metros generado.	55
Figura 8: Proyección del Escarpe de Erosión Menor (Deeme) al margen oriental de la Quebrada Agua Fría	58
Figura 9: Límite entre las geoformas Ladera Denudada (Dld) y Ladera Estructural (Sle) sobre la vía de la Vereda El Cairo.....	59
Figura 10: Proyección de la geoforma de Ladera Ondulada (Dlo) en el margen oriental de la Quebrada Agua Fría.....	60
Figura 11: Panorámica del curso bajo de la Quebrada Agua Fría en la Vereda El Cairo.	62
Figura 12: Modelo jerárquico Analítico para susceptibilidad por Movimientos en Masa (Método Heurístico).....	65
Figura 13: Esquema de clasificación de las unidades geológicas.	66
Figura 14: Cruce de parámetros geológicos para generar mapa de susceptibilidad geológica.	71
Figura 15: mapas generados del parámetro geológico para cálculo de susceptibilidad de movimientos en masa.....	71
Figura 16: Porcentajes de parámetros geomorfológicos para el cálculo de susceptibilidad por movimientos en masa.	72
Figura 17: Porcentajes de los parámetros que componen la morfometría.....	73
Figura 18: Diagrama de flujo de generación del parámetro Acuenca.	75
Figura 19: Calculo de la susceptibilidad morfométrica.....	76
Figura 20: Proceso metodológico en la construcción del atributo morfodinámico.	77
Figura 21: Determinación del parámetro Relieve Relativo para el área de estudio.	78
Figura 22: Variables y Mapa de susceptibilidad Geomorfológica total.....	81
Figura 23: diagrama de atributos del variable suelo con sus porcentajes.....	82
Figura 24: Mapa de susceptibilidad de suelos.	86
Figura 25: Atributos de la variable cobertura de la tierra.	87
Figura 26: Variables y Mapa de susceptibilidad cobertura de la tierra total.	90
Figura 27: Diagrama de susceptibilidad total con porcentajes.....	91

Figura 28: Mapa de Susceptibilidad total por movimientos en masa.	92
Figura 29: Clasificación de mapa de zonificación de amenaza relativa por movimientos en masa.	95
Figura 30: Calificación de la zonificación climática con base en su contribución a los movimientos en masa.	96
Figura 31: valor de Aceleración máxima horizontal a nivel de roca - PGA475 del Municipio de San Luis De Gaceno en el Mapa Nacional de Amenaza Sísmica. ...	98
Figura 32: Rangos de amenaza debido a la calificación de detonantes en el área de estudio.	99
Figura 33: Mapa de amenazas relativas por movimientos en masa en el área de estudio.	100
Figura 34: Mapa de amenazas relativas por movimientos en masa en el área de estudio con disminución de efectos detonantes a 80%.	101
Figura 35: Mapa de amenazas relativas por movimientos en masa en el área de estudio con disminución de efectos detonantes a 70%.	102
Figura 36: Mapa de amenazas relativas por movimientos en masa en el área de estudio con disminución de efectos detonantes a 60%.	103
Figura 37: Zonas de interés geotécnico según zonificación de amenaza por M.M.	105
Figura 38: Perfil geoelectrico.	107
Figura 39: Ensayo de durabilidad y desgaste.	115
Figura 40: Medida de orientación de discontinuidades.	116
Figura 41: Espaciado de discontinuidades.	117
Figura 42: Continuidad de discontinuidades.	117
Figura 43: Perfiles de rugosidad. La longitud de los perfiles está en el rango entre 1 y 10 metros (ISRM, 1981).	118
Figura 44: Abertura de discontinuidades	118
Figura 45: estimación del GSI para macizos heterogéneos como Fisch, adaptada de Hoek (2006).	125
Figura 46: Parámetro Sigci.	128
Figura 47: Parámetro mi.	128
Figura 48: Parámetro GSI.	129
Figura 49: Determinación del parámetro factor de disturbancia D.	129
Figura 50: Familias de diaclasas y sus características medidas mediante Dips 6.0	131
Figura 51: esquema inclinación de talud vs estratos.	132
Figura 52: esquema inclinación de talud vs estratos.	132
Figura 53: Análisis de falla planar.	133
Figura 54: Tipos de cuña posibles.	134

Figura 55: Representación estereográfica de la tolerancia de falla en cuña.....	134
Figura 56: Análisis de falla en cuña.	135
Figura 57: Tipos de rotura por vuelco..	135
Figura 58: determinación de falla por volteo o toppling mediante Dips.....	136
Figura 59: Parámetros de modelación mediante RocTopple.	136
Figura 60: Coeficientes de aceleración sísmica para el departamento de Boyacá.	137
Figura 61: Análisis pseudoestático por toppling o volteo mediante RocTopple. ...	138
Figura 62: Análisis de falla por volteo mediante RocTopple.	139
Figura 63: Ubicación de perfiles, estudios geotécnicos y equipos.	140
Figura 64: Perfil A-A'	141
Figura 65: Interpretación de resistividad mediante estudio tomográfico.	142
Figura 66: Perfil B-B'	142
Figura 67: Perfil C-C'	143
Figura 68: Análisis de estabilidad $R_u=0$ en el corte A-A'	145
Figura 69: Análisis de estabilidad $R_u=0$ en el corte B-B'	145
Figura 70: Determinación del factor de seguridad FS mediante Slide.	146
Figura 71: Control de desplazamiento de mojones.....	149
Figura 72: Precipitación acumulada Julio/2015 y localización de monitoreo.	151
Tabla 73: Formato de captura de datos propuesta.	153
Figura 74: Zonas planteadas para instalación de piezómetros de observación...	154
Figura 75: Análisis de estabilidad del talud Vereda el Cairo, municipio de San Luis de Gaceno.	157
Figura 76: Análisis de estabilidad del talud Vereda el Cairo, municipio de San Luis de Gaceno.	158

LISTA DE FOTOGRAFIAS

Pág.

Fotografía 1: Afloramiento de areniscas con intercalación de Lodolitas grises bioturbadas.	34
Fotografía 2: Afloramiento de la Formación Areniscas Del Limbo, Intercalación de arcillolitas grises de poco espesor y conglomerados en matriz arenosa.	36
Fotografía 3: Deposito de tipo coluvial al margen derecho de la Quebrada Agua Fría	37
Fotografía 4: Estrías de falla sobre la Formación Guadalupe (Areniscas Dura). ...	38
Fotografía 5: Proyección del Deslizamiento Translacional al margen oriental de la Quebrada Agua Fría.	57
Fotografía 6: Zona de toma de muestra de roca y diaclasas en talud de la Formacion Areniscas Del Limbo (Tearl).....	109
Fotografía 7: Desarrollo del ensayo ángulo de reposo.	110
Fotografía 8: Ensayo de propiedades físicas.....	111
Fotografía 9: Ensayo de compresión simple.....	113
Fotografía 10: Ensayo de Tilt Test.	114
Fotografía 11: Piezómetro en la Vereda El Cairo,.....	148

LISTA DE ANEXOS

Anexo A. MAPAS TEMATICOS:

- Anexo A-1: Mapa geológico regional
- Anexo A-2: Mapa geológico local
- Anexo A-3: Mapa hidrogeológico
- Anexo A-4: Mapa de pendientes
- Anexo A-5: Mapa geomorfológico
- Anexo A-6: Mapa de susceptibilidad
- Anexo A-7: Mapa de amenazas
- Anexo A-8: Propuesta final de ajuste de amenazas

Anexo B. COLUMNA ESTRATIGRAFICA LOCAL

Anexo C. ANALISIS HIDROLOGICO:

- Anexo C-1: Mapa de ubicación de estaciones
- Anexo C-2: Datos hidrometereologicos
- Anexo C-3: Mapa de isoyetas
- Anexo C-4: Mapa de isotermas
- Anexo C-5: Mapa de humedad relativa
- Anexo C-6: Mapa de evaporación
- Anexo C-7: Mapa de evapotranspiración potencial ETP
- Anexo C-8: Tablas balance hídrico

Anexo D. INVENTARIO DE MOVIMIENTOS EN MASA.

Anexo E. ANALISIS GEOTECNICO Y GEOMECANICO.

- Anexo E-1: Estudios previos
- Anexo E-2: Ensayos de laboratorio
- Anexo E-3: Formato de discontinuidades

INTRODUCCION

El presente estudio “evaluación geológica, geomorfológica y geotécnica para la determinación de amenazas y generación de alertas tempranas del deslizamiento el Cairo en el municipio de San Luis De Gaceno en la jurisdicción de la corporación autónoma regional de Chivor (Corpochivor)” ha sido realizado como propuesta a la formación investigativa del autor, quien pretende con el desarrollo y aprobación de este, la obtención del título de Ingeniero Geólogo, proyecto incluido dentro del “Convenio Interadministrativo Específico 1610 de 2015 UPTC- Gobernación de Boyacá – CAR: Investigación aplicada a la modelación del territorio a partir del análisis geomorfológico del departamento de Boyacá. Código SGI 1637” y pretende contribuir al conocimiento del sector, y al comportamiento del subsuelo ante la ocurrencia de movimientos en masa.

El estudio consiste en la realización del análisis geológico, geomorfológico y geotécnico en una zona de inestabilidad en el Municipio de San Luis De Gaceno en la Vereda El Cairo, para lograr entender los diferentes materiales y factores que intervienen y su comportamiento ante la ocurrencia de movimientos en masa, para generar la zonificación de susceptibilidad y amenazas por movimientos en masa y así poder implementar un plan de monitoreo continuo que lleve a la puesta en funcionamiento con el apoyo de la Corporación Autónoma Regional de Chivor de un plan de alertas tempranas de amenaza por movimientos en masa en la Vereda El Cairo, la cual sea aplicable posteriormente a otros sectores del departamento de Boyacá, dentro de la metodología planteada, para cumplir con los objetivos trazados, se plantean etapas como la recopilación de información geológica, geomorfológica y geotécnica en el municipio de San Luis De Gaceno, y localmente en la Vereda El Cairo si hay disponibilidad de estos estudios. También es necesario realizar la revisión de la cartografía geológica a escala local para posteriores etapas hídricas, hidrogeológicas, geomorfológicas y geotecnias en la zona de estudio.

1. GENERALIDADES

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El municipio de San Luis De Gaceno se encuentra ubicado en el sur del departamento en una zona expuesta a alta variabilidad climática, lo cual es un factor detonante de los diferentes tipos de fenómenos de remoción en masa, puntualmente en el sector denominado El Cairo, este se localiza una zona inestable la cual presenta una afectación directa sobre la población, debido a la magnitud y complejidad del movimiento se afectaron caminos, vías y un puente peatonal que comunica la vereda El Cairo con el casco urbano del Municipio de San Luis De Gaceno. Estos movimientos en masa están poniendo en riesgo de igual manera las viviendas y la población del sector por el posible represamiento de la Quebrada Agua Fría, la cual sigue su curso hacia el casco urbano del Municipio, Por tanto, se crea la necesidad de conocer, caracterizar y realizar el monitoreo de este tipo de fenómenos y generar planes de alerta temprana, aplicables mediante las normas colombianas.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo general

Realizar la evaluación geológica, geomorfológica y geotécnica del deslizamiento El Cairo, en el municipio de San Luis De Gaceno para la determinación de la susceptibilidad y amenaza por fenómenos de remoción en masa con base en la metodología del Servicio Geológico Colombiano (SGC) y así implementar un plan de monitoreo y generación de alertas tempranas.

1.2.2 Objetivos específicos

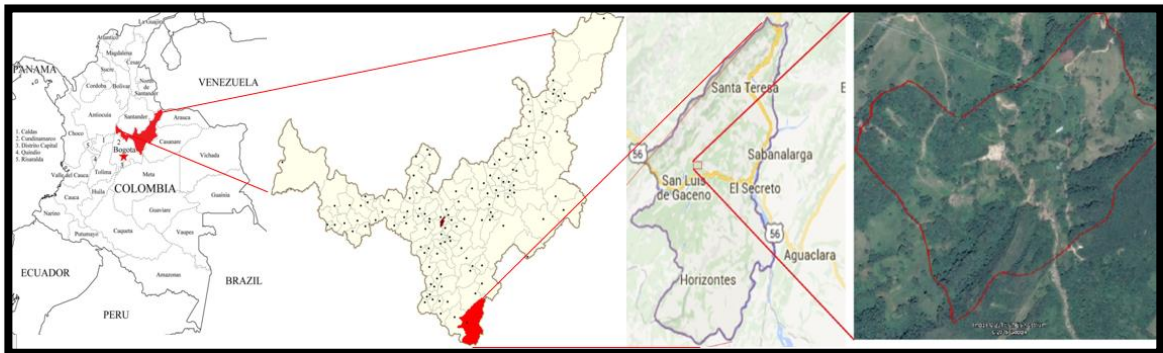
- Recopilar información bibliográfica, evaluación y análisis de la información existente suministrada por CORPOCHIVOR.
- Realizar la evaluación geológica.
- Realizar el análisis hidrológico de la zona de afectación del deslizamiento.
- Realizar la evaluación geomorfológica por la metodología del Servicio Geológico Colombiano (agosto 2003).

- Realizar la evaluación geotécnica y modelamiento del deslizamiento con base en los estudios previos realizados por CORPOCHIVOR.
- Implementar un plan de monitoreo del deslizamiento.
- Determinación de la susceptibilidad y amenaza por fenómenos de remoción en masa con base en la metodología del Servicio Geológico Colombiano.
- Aplicar la metodología propuesta por CORPOCHIVOR para la generación de alerta temprana con base en factores de seguridad y parámetros del suelo.

1.3 LOCALIZACIÓN

El municipio de San Luis de Gaceno está ubicado en la parte suroriental del Departamento de Boyacá, provincia de Neira, sobre las estribaciones de la cordillera Oriental en el sector denominado Piedemonte Llanero; a una altura de 400 metros sobre el nivel del mar. Su topografía se caracteriza por ser quebrada, ligeramente montañosa e irrigada por un gran número de quebradas y ríos que descienden de la cordillera oriental. La cabecera municipal está situada a 04° 49' 28" de latitud norte y 73° 10' 15" de longitud oeste, cuenta con una temperatura promedio de 24°C, su área aproximada es de 458.5 Km², y dista de la capital del Departamento a 135 Km.¹

Figura 1: Localización del Municipio de San Luis De Gaceno.



Fuente: El estudio.

¹ Citado el 23/09/2015 en: http://www.sanluisdegaceno-boyaca.gov.co/informacion_general.shtml#geografia

La zona de estudio se ubica en la Vereda El Cairo en la zona centro del Municipio, a 3,3 Kilómetros hacia el noroccidente del casco urbano, limitado dentro de las coordenadas de la Tabla 1

Tabla 1: Coordenadas de localización del área de estudio.

N°	ESTE	NORTE
1	1'098.700,00	1'027.500,00
2	1'099.800,00	1'027.500,00
3	1'098.700,00	1'028.400,00
4	1'099.800,00	1'028.400,00

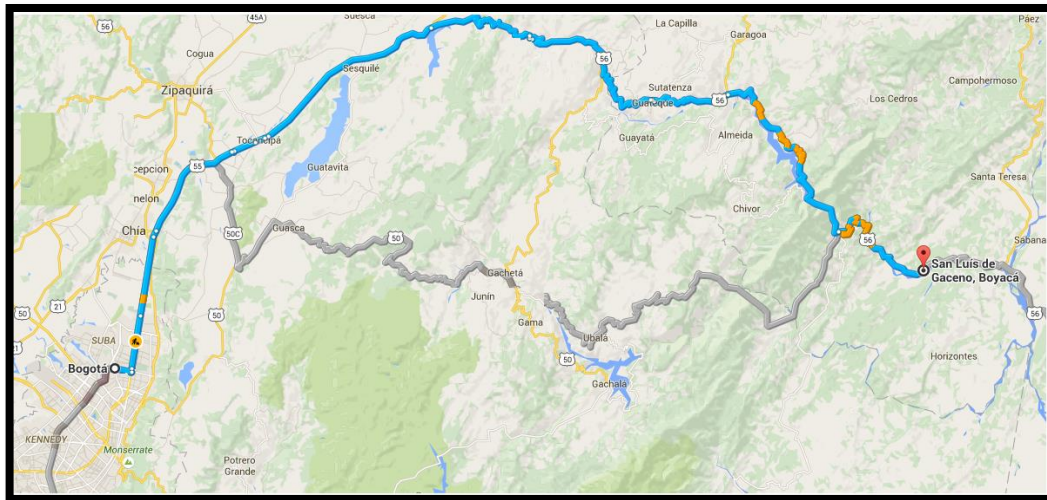
Fuente: El estudio.

*Sistema de origen: MAGNA - SIRGAS
Falso Este: 1000000.0
Falso Norte: 1000000.0
Meridiano central: -74.07750791666666
Factor de escala: 1,0
Latitud de origen: 4,596200416666666*

Vías de acceso:

El municipio de San Luis De Gaceno dista de la Capital Bogotá a 196 Kms siguiendo la vía que conduce a la capital del Departamento de Boyacá, Tunja hasta la altura de la Represa El Sisga donde se desvía al oriente hacia el Municipio de Guateque, siguiendo la ruta 56 pasando por los municipios de Macanal y Santa María.

Figura 2: Ruta Bogotá – San Luis De Gaceno.



Fuente: Google Maps.

1.4 ALCANCES Y LIMITACIONES

1.4.1 Alcances

El alcance del presente estudio busca determinar la susceptibilidad y amenaza actual por movimientos en masa, diseñar un plan de monitoreo e implementar un plan de alerta temprana con el fin de reducir la afectación del movimiento.

1.4.2 Limitaciones

- Acceso a la zona de interés.
- Disponibilidad de recursos físicos, además de la posibilidad de hechos y circunstancias ajenas al estudiante, que impiden el desarrollo de las actividades propuestas.

1.5 JUSTIFICACIÓN

Mediante el decreto 1807 de 2014 se reglamenta en Colombia las condiciones y escalas de detalle para la delimitación y zonificación de las áreas de amenaza y de las áreas con condiciones de riesgo, además de la determinación de las medidas específicas para su mitigación teniendo en cuenta la denominación de los planes de ordenamiento territorial, prevista en el artículo 9 de la Ley 388 de 1997.

Es así como en el artículo 3 de este decreto se especifica que “se deben elaborar estudios en los suelos urbanos, de expansión urbana y rural para los fenómenos de inundación, avenidas torrenciales y movimientos en masa, que contienen:

- a) La delimitación y zonificación de las áreas de amenaza.
- b) La delimitación y zonificación de las áreas con condición de amenaza en las que se requiere adelantar los estudios detallados.
- c) La delimitación y zonificación de las áreas con condición de riesgo en las que se requiere adelantar los estudios detallados.
- d) La determinación de las medidas de intervención, orientadas a establecer restricciones y condicionamientos mediante la determinación de normas urbanísticas.”²

² Citado el 23 de septiembre de 2015 en:

<https://www.funcionpublica.gov.co/documents/418537/604808/2330.pdf/0fef04b8-3159-499a-99bd-e0c85e467755>

De acuerdo con lo anterior, de los movimientos en masa, el más representativo y de mayor riesgo en la zona de estudio, es el deslizamiento del Cairo delimitado previamente por la Corporación Autónoma Regional De Chivor CORPOCHIVOR. Del cual se requiere un análisis de la información existente y el procesamiento de la misma por la Corporación, ya que este proceso tiene gran afectación principalmente en la población aledaña. Se requiere clasificar y generar un sistema de alertas tempranas, enfocado principalmente a los efectos de los detonantes, las precipitaciones, las actividades antrópicas y sísmicas mediante la metodología implantada por CORPOCHIVOR, por lo que igualmente se realizará una revisión de aspectos físicos y geotécnicos del área de estudio.

1.6 ASPECTOS METODOLOGICOS

ETAPA 1: Recolección y análisis de información topográfica, geológica, geomorfológica, geotécnica, e hidrológica del municipio de San Luis De Gaceno.

En esta etapa se recolecto toda la información correspondiente a bases topográficas, planchas geológicas y topográficas del municipio al igual que mapas temáticos e información de estudios previos realizados en el municipio por parte de la Corporación Autónoma De Chivor (CORPOCHIVOR), estudios realizados por el municipio y estudios externos a estas entidades en la zona.

ETAPA 2: Reconocimiento en campo y caracterización del deslizamiento.

Se realizó una visita para el reconocimiento puntual de cada uno de los movimientos que se encuentran ubicados en la zona inestable del Cairo, y el levantamiento de inventarios los mismos, analizando de igual manera el curso de la Quebrada Agua Fría y su posible afectación y aporte a la inestabilidad de la zona.

ETAPA 3: Corroboración de la información cartográfica y evaluación geológica.

Por parte de la Corporación Autónoma Regional De Chivor en convenio con la Universidad Pedagógica Y Tecnológica De Colombia se realizó la cartografía geológica y el levantamiento geomorfológico detallado de la zona de inestabilidad, por tanto se realizó una visita para la toma de datos estructurales, toma de muestras corroboración de las unidades geológicas planteadas en el estudio anteriormente mencionado y el reconocimiento geomorfológico de la zona.

ETAPA 4: Realización del análisis hidrológico de la zona del deslizamiento

Se realiza con el fin de dar una estimación de las reservas de aguas subterráneas dentro del área, evaluando la magnitud de recarga potencial por medio del análisis de la precipitación con datos tomados de estaciones pluviométricas en periodos de precipitación media mensual multianual, teniendo en cuenta la esorrentía y la evapotranspiración y así generar el análisis puntual de la zona con el fin de determinar la acción hídrica y la oferta total del agua superficial y subterránea como posible factor detonante ante la ocurrencia de un movimiento en masa en el sector.

ETAPA 5: Realizar el análisis hidrogeológico de la zona de estudio.

Se requiere conocer las diferentes unidades geológicas y su comportamiento potencial para clasificarlas por sus características en las diferentes unidades hidrogeológicas para la realización de los mapas hidrogeológicos detallados correspondientes al área.

ETAPA 6: Realizar el levantamiento y la evaluación geomorfológica.

Se requiere identificar las formas del relieve al igual que todos aquellos procesos de formación y evolución del entorno, de igual manera su comportamiento ante la ocurrencia de un movimiento en masa, estudio el cual se realiza por medio de la metodología del Servicio Geológico Colombiano para el levantamiento escala 1:100.000 haciendo un ajuste de dicha metodología para la escala de estudios detallados.

ETAPA 7: Realización de la zonificación por susceptibilidad y amenazas por fenómenos de remoción en masa.

En esta etapa se realiza la evaluación de los parámetros geológicos, geomorfológicos, hídricos, geotécnicos, topográficos y climáticos, para determinar la susceptibilidad, donde posteriormente se agregan los efectos de los factores que influyen como detonantes para llegar finalmente a la zonificación de amenazas detallada, con base en los parámetros propuestos por la metodología del Servicio Geológico Colombiano para la zonificación de susceptibilidad y amenazas escala 1:100.000, ajustada al nivel de detalle.

ETAPA 8: Realización de la evaluación geotécnica, modelamiento del deslizamiento y determinación de los factores de seguridad.

Se disponen en la zona de estudios geotécnicos como análisis de laboratorio y ensayos In Situ, como la realización de un Test de Penetración Estándar en el flanco oriental de la Quebrada Agua Fría, determinándose parámetros de resistencia al corte y posibles planos de falla, de igual manera se tienen controles de desplazamientos topográficos por medio de mojones y control topográfico haciendo posible el modelamiento de los taludes con base en los parámetros de los diferentes tipos de suelos que intervienen, la variación del nivel freático, información pluviométrica y control de desplazamiento generando así los diferentes factores de seguridad en los diferentes escenarios.

ETAPA 9: Implementar un plan de monitoreo del deslizamiento.

La Corporación Autónoma Regional De Chivor dentro de su plan de trabajo del presente año 2015 tiene vigente un seguimiento de las zonas inestables al igual que el monitoreo de los niveles freáticos en las zonas donde se encuentran instalados piezómetros y también verificación de desplazamiento de mojones por medio de topografía, por tanto es necesario realizar un plan de monitoreo continuo por lapsos de tiempo representativos donde se especifique las necesidades del sistema y los pasos que este requiere para la adecuada recolección de información piezométrica, topográfica y pluviométrica, el cual siga en funcionamiento aun después de la terminación de este proyecto, compromiso que adquiere la corporación.

ETAPA 10: Aplicación de la metodología propuesta por CORPOCHIVOR para la generación de alerta temprana.

Se realiza generando una relación directa con base en los factores de seguridad determinados previamente, los parámetros del suelo y los registros climáticos de la zona de afectación.

1.7 ESTADO DEL ARTE

La recopilación de datos se encamino a la obtención de información existente acerca del estado de arte de los diferentes métodos de análisis realizados dentro de la zona de afectación y en el municipio de San Luis De Gaceno, información de análisis directo como aquella que es utilizada para la correlación de información. En el presente capítulo se enunciaran los principales documentos recopilados y se explicara su utilización y su aprovechamiento en este proyecto.

Dentro del convenio interadministrativo Específico 1610 de 2015 UPTC- Gobernación de Boyacá – CAR: Investigación aplicada a la modelación del territorio a partir del análisis geomorfológico del departamento de Boyacá. Código SGI 1637 se obtuvo información por parte de la Corporación Autónoma Regional Del Chivor (CORPOCHIVOR), la cual se hace partícipe del proyecto anteriormente mencionado, de igual manera se recopilaron datos meteorológicos por parte del IDEAM y metodologías para el desarrollo de las etapas que comprenden la realización de la Geomorfología y el análisis de la susceptibilidad y amenaza por movimientos en masa, datos que se obtuvieron de metodologías estándar para estos estudios a escalas 1:100.000, las cuales se ajustan a una escala menor para el análisis detallado del área de estudio.

1.7.1 Información Base

Se tuvo en cuenta toda aquella información básica para lograr un reconocimiento a nivel general de la zona, interpretación y desarrollo de este proyecto.

- Datos meteorológicos - IDEAM: Corresponde a datos históricos de valores totales mensuales de precipitación, valores históricos medios mensuales de temperatura, valores históricos medios mensuales de humedad relativa y valores totales mensuales de brillo solar de aquellas estaciones que registran este valor en zonas cercanas al área de estudio, dentro de las cuales se obtuvieron valores de las estaciones ubicadas en los municipios de San Luis de Gaceno, Macanal, Campo Hermoso, Paez, Santa Maria, Villanueva y Paratebueno.
- mapa topográfico en el área de estudio, con curvas de nivel cada 2 metros, siendo el valor altimétrico más bajo 642 m.s.n.m. y el más alto 942 m.s.n.m. cubriendo un área total de 451.110,1202 metros cuadrados
- mapa topográfico corresponde a un área menor ubicada dentro del área de estudio, topografía con curvas de nivel cada 0,5 metros la cual detalla movimientos en masa locales a los cuales se controlan mediante corroboración topográfica por medio de mojones instalados en la zona.
- Decreto 1807 de septiembre de 2014, Por el cual se reglamenta el artículo 189 del Decreto Ley 019 de 2012 en lo relativo a la incorporación de la gestión del riesgo en los planes de ordenamiento territorial y se dictan otras disposiciones, haciendo especial énfasis al capítulo II, artículo 5. donde se reglamentan las condiciones técnicas para la elaboración de estudios detallados de amenazas por movimientos en masa.

1.7.2 Contexto teórico acerca del desarrollo de proyectos geomorfológicos y zonificación de susceptibilidad y amenazas por movimientos en masa

- Propuesta metodológica sistemática para la generación de mapas geomorfológicos analíticos aplicados a la zonificación de amenaza por movimientos en masa escala 1:100.000 – servicio geológico colombiano.
- Documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza por movimientos en masa escala 1:100.000 del servicio geológico colombiano.
- Metodología Corine Land Cover adaptada para Colombia, escala 1:100.000, IDEAM, IGAC, Cormagdalena. 2007.

1.7.3 Estudios realizados en el Municipio de San Luis De Gaceno

- Elaboración de estudio de riesgo (amenaza y vulnerabilidad) y diseño de obras de estabilización en la vereda el Carmen, Municipio de San Luis De Gaceno, jurisdicción de la corporación autónoma regional de Chivor (Corpochivor). – convenio nº 038 del 2012, UPTC – Corpochivor.
- Esquema de ordenamiento territorial del Municipio de San Luis De Gaceno, Departamento de Boyacá – Municipio de San Luis de Gaceno.

1.7.4 Contexto teórico acerca del desarrollo de proyectos geotécnicos y geomecánicos.

- El criterio de rotura de Hoek & Brown. E.Hoek, C.Carranza-Torres, B. Corkun. Consulting Engineer, University of Minnesota, RocScience Inc.
- Mecánica de Rocas: Fundamentos e Ingeniería de Taludes. R. O. Pedro, A. M. Leandro. E.T.S.I. Minas (UPM). Madrid. 2004.
- Análisis comparativo de los criterios de rotura de Hoek&Brown y Mohr Coulomb en el estudio de estabilidad en macizos rocosos. J. Ros Avila. Etseccpb. Barcelona. 2008.
- INGENIERIA GEOLOGICA. L. I. Gonzales de Vallejo, M. Ferrer, L. Ortuño, C. Oteo. Madrid, 2002.
- Métodos sugeridos para la determinación del contenido de humedad, la porosidad, la densidad, la absorción, y propiedades relacionadas y las

propiedades índice de expansión y desleimiento - durabilidad. Universidad Nacional - Sociedad Colombiana de Geotecnia.

- Apuntes de Geotecnia básica, O. Ramírez. 2000.

1.8 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

En la Vereda El Cairo en la zona noroccidental del municipio de San Luis De Gaceno, se han producido diversos deslizamientos localizados en una zona puntual, limitada por la Quebrada Agua Fría, cuya afectación es de gran importancia, ya que al avanzar estos movimientos pueden producir el represamiento de la Quebrada, la cual sigue su curso hasta llegar al casco urbano del Municipio, dichos movimientos anteriormente afectaron vías carretables y caminos veredales en la zona, al igual que un puente peatonal construido sobre la Quebrada.

1.9 TRABAJO DE CAMPO

El trabajo de campo realizado del día 7 al 19 de octubre de 2015 consistió en el levantamiento geológico, geotécnico y reconocimiento de unidades geomorfológicas y procesos morfodinámicos en el área de estudio.

El levantamiento geológico se realizó con el fin de verificar las diferentes unidades geológicas, su grado de degradación, alteración. De igual manera hacer el reconocimiento litológico y su orientación mediante la toma de datos estructurales. Trabajo de campo realizado para obtener un detalle del modelo geológico local escala 1:1.000

En cuanto a la parte geotécnica, se analizaron las condiciones del terreno para conocer a grandes rasgos la naturaleza del subsuelo y se tomaron muestras de roca para realizar ensayos físicos y mecánicos. También se reconocieron movimientos en masa en el sector para realizar el inventario local de los movimientos.

2. GEOLOGIA

En el municipio de San Luis De Gaceno se encuentran aflorando formaciones desde el Cretácico Inferior siguiendo la secuencia estratigráfica hasta formaciones del Terciario, en una zona sometida preferencialmente a esfuerzos compresionales los cuales han generado fallas transversales y paralelas a la distribución de las unidades geológicas.

2.1. GEOLOGIA REGIONAL

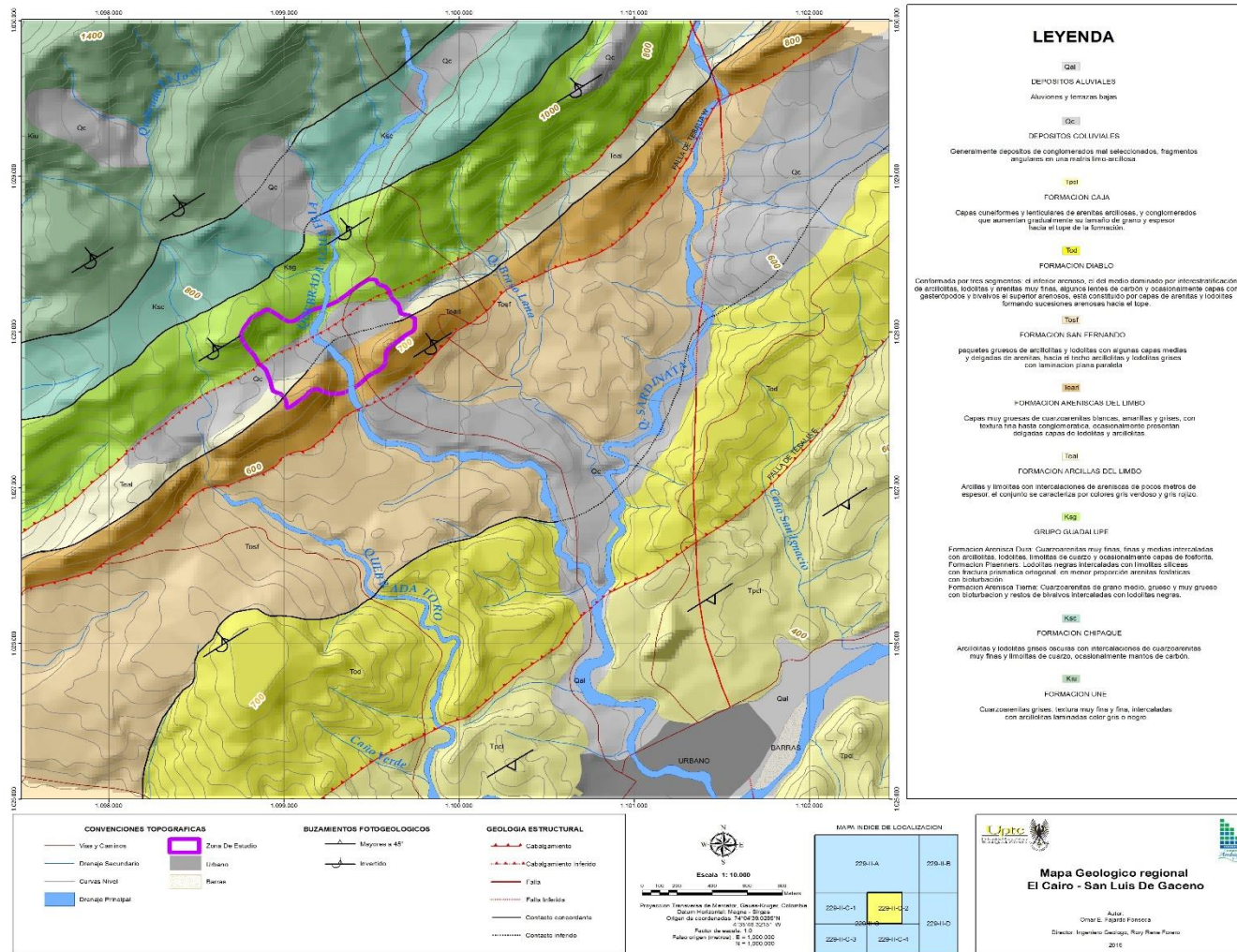
El área estudiada pertenece a la Cordillera Oriental la cual a través de su historia de formación está sometida a esfuerzos tectónicos preferencialmente compresionales durante el periodo Terciario generando fallas paralelas y transversales a la distribución de las unidades y diversos plegamientos, además de producir levantamientos y hundimientos.

El ambiente de deposición de las diferentes formaciones aflorantes en el área, ha sido producto de la transgresión que sucedió a principios del cretáceo desde el Turoniano hasta el Maestrichtiano y se caracteriza por la ocurrencia de un mar profundo dando origen a depósitos de sedimentos de facies marinas y la acumulación de restos de seres vivos que darían lugar a la formación de fosforita, posteriormente el tectonismo y la orogénesis tiene marcada importancia sobre las diferentes formaciones hasta el momento conformadas.³

La distribución de las unidades geológicas en el municipio de San Luis De Gaceno tienen una orientación preferencial N30E - N40E, Subiendo en la columna estratigráfica hacia el SE donde se sigue una secuencia desde el cretáceo inferior hasta el terciario, la zona se encuentra delimitada también por depósitos de tipo aluvial de importancia generados por el Rio Lengupá y las quebradas afluentes de este. (Ver Anexo A-1)

³ Servicio Geológico Colombiano SGC. Geología de la plancha 229 Gachalá. Bogotá D.C. Diciembre de 2013.

Figura 3: Mapa Geológico Regional



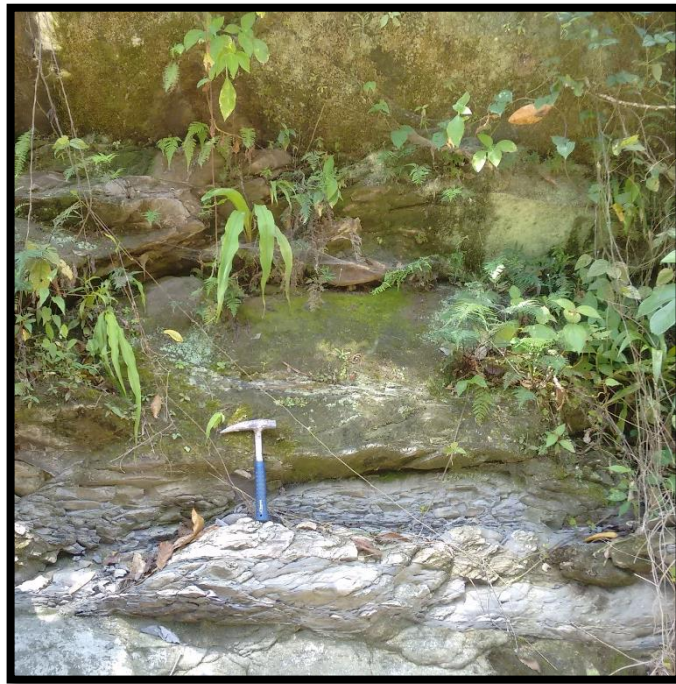
Fuente: El estudio.

2.2. GEOLOGIA LOCAL

2.2.1 Formación Dura y Plaenners (Ksgdp)

Areniscas de cuarzo de grano muy fino a fino en capas hasta de 6 metros, comúnmente con ondulitas, intercalaciones de limolitas y Lodolitas grises y negras, la bioturbación está presente homogenizando la roca, la formación se encuentra aflorando en dirección N40E y Buzando 47° al NW, sobre el flanco NW de la falla de Tesalia, en la zona se encuentra en contacto fallado de tipo cabalgamiento con la Formación Arcillas Del Limbo (Teal).

Fotografía 1: Afloramiento de areniscas con intercalación de Lodolitas grises bioturbadas.



Fuente: El estudio.

2.2.2 Formación Arcillas Del Limbo (Teal)

La formación se reconoce por generar pendientes suaves, generalmente relieves bajos constituidos por materiales arcillosos, Está conformada por arcillas grises verdosas con intercalaciones de areniscas cuarzosas blanco amarillentas, de grano medio a grueso estratificadas en bancos de 1 a 5 m. En el sector aflora en dirección N40E – N50E, poniéndose en contacto concordante hacia el SE con la Formación

Areniscas Del Limbo (Tearl) y hacia el NW en contacto fallado tipo cabalgamiento con la Formación Areniscas Dura y Plaenners (Ksgdp).

Figura 4: Vista del contacto Teal-Tearl en el área de estudio.



Fuente: El estudio.

2.2.3 Formación Areniscas Del Limbo (Tearl)

El nombre de Arenisca de El Limbo lo utilizó Van der Hammen (1958) por primera vez, para una sucesión de rocas de la sección descrita en el Piedemonte llanero en el curso del Río Cravo Sur. La localidad tipo de la sección descrita por Van der Hammen (1958) se encuentra cerca del Caserío de El Limbo, 2 km al NW de El Morro, Río Cravo Sur, donde esta unidad descansa sobre las Arcillas de El Limbo e infrayace a la Formación San Fernando.⁴

En el área de estudio afloran areniscas cuarzosa en bancos de hasta 6 metros tonalidades claras de amarillo a blanco, muy friables. Conglomerados compuestos por fragmentos redondeados a subredondeados predominantemente cuarzosos en una matriz arenosa con tonalidades amarillas claras con intercalaciones de arcillolitas grises de poco espesor, aflorando en dirección N40E con buzamiento de 57° NW predominantemente, la Formación se encuentra en contacto concordante

⁴ SERVICIO GEOLOGICO COLOMBIANO. Geología de la plancha 229 – Gachala, Bogota.2013.

hacia en NW con la Formación Arcillas Del Limbo, y hacia el SE, se encuentra cortada la secuencia por la falla de Tesalia, Fallamiento de tipo inverso, el cual pone en contacto la Formación con el miembro 2 de la Formación Caja. (Ver Anexo B)

Fotografía 2: Afloramiento de la Formación Areniscas Del Limbo, Intercalación de arcillolitas grises de poco espesor y conglomerados en matriz arenosa, Coordenadas = E: 1.099.453; N: 1.027.693.

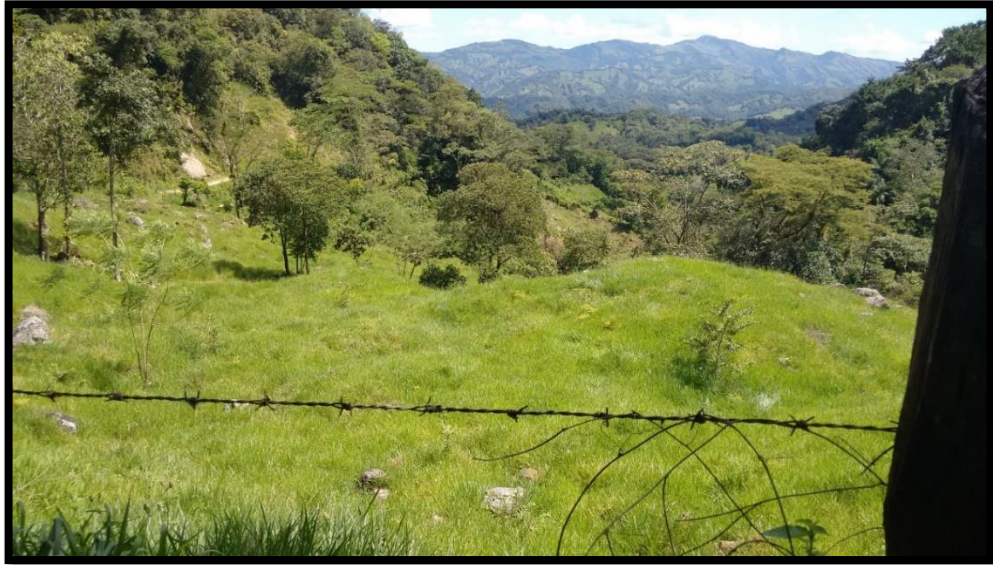


Fuente: El estudio.

2.2.4 Depósitos Coluviales (Qc)

Se caracterizan por presentar una topografía plana a ondulada, pendientes suaves, compuestos por Fragmentos angulosos, mal seleccionados con poco transporte, preferencialmente arenosos y conglomeraticos en una matriz limo arcillosa, la cual se extiende preferencialmente sobre las formaciones más blandas, con aporte de material de las formaciones del cretáceo y terciario.

Fotografía 3: Deposito de tipo coluvial al margen derecho de la Quebrada Agua Fría, Coordenadas= E: 1.099.3123 N: 1.027.933.



Fuente: El estudio.

2.3 GEOLOGIA ESTRUCTURAL

2.3.1 Falla de Tesalia

La Falla de Tesalia se desprende de las fallas de Santa María y Lengupá al sur del río Gazaunta (Plancha 248) y se extiende en sentido suroccidente - nororiente por unos 54 km cruzando el área de la Plancha 229-Gachalá (229: H4 - A11). En el extremo suroccidental de la plancha se observan tres ramales que han sido denominados: Falla de Tesalia W, Falla de Tesalia E y Falla de Tesalia E1. Estas fallas son inversas, tienen vergencia al este y componente de deslizamiento tanto en el rumbo como en el buzamiento. En el área de la plancha se observa que las fallas cortan unidades cada vez más jóvenes.⁵

Falla de Tesalia W: En el sector sur se identifican dos trazas subparalelas de la Falla de Tesalia W las cuales se extienden en dirección suroccidente - nororiente (229: H4-D7). La más occidental pone en el bloque colgante rocas de la Formación Une sobre rocas del Grupo Guadalupe y la más oriental pone rocas del Grupo Guadalupe sobre rocas de la Formación Arenisca de El Limbo.⁶

⁵ SERVICIO GEOLOGICO COLOMBIANO. Geología de la plancha 229 – Gachala, Bogota.2013. Pág. 243.

⁶ SERVICIO GEOLOGICO COLOMBIANO. Geología de la plancha 229 – Gachala, Bogota.2013. Pág. 243.

Desde el sitio conocido como Ceiba Chiquita (plancha 229), la Falla de Tesalia W se Bifurca de nuevo, y así, en el área de estudio en la Vereda El Cairo, en el tramo más occidental se pone en contacto la parte inferior del Grupo Guadalupe (Formación Areniscas Dura), con la Formación Arcillas Del Limbo, mientras que en el tramo más oriental, genera un escarpe formado por las areniscas de la Formación Areniscas Del Limbo, la cual se pone en contacto con la Formación San Fernando, extendiéndose el trazo de la Falla en dirección N45E.

Figura 5: Vista panorámica de la Falla Tesalia W desde la Vereda El Cairo (Coordenadas E: 1°100.053; N: 1.027.272).



Fuente: El estudio.

Fotografía 4: Estrías de falla sobre la Formación Guadalupe (Areniscas Dura) en zona de contacto con la formación Arcillas del limbo, en el tramo occidental de la Falla Tesalia W. Coordenadas = E: 1.099.127; N: 1.027.960.



Fuente: El estudio.

3. ANALISIS HIDROLOGICO

El análisis hidrológico va enfocado a la determinación de diferentes parámetros que ayudan a entender el comportamiento del recurso hídrico de la región, en este capítulo se desarrolla un análisis basado en los datos hidrometereológicos disponibles en la región en un periodo de tiempo determinado.

3.1 CARACTERIZACION HIDROLOGICA

El balance hídrico es una herramienta que permite estimar las ganancias de agua por lluvia o riego y las pérdidas por evaporación, escorrentía, drenaje profundo y la variación del almacenamiento de aguas en el suelo. Conocer el balance hídrico de una área permite determinar, la disponibilidad del recurso hídrico y la magnitud a nivel macroclimático de los periodos con exceso o deficiencia de agua de una unidad de trabajo sometida a un estudio hidroclimático.⁷

Para el desarrollo del balance hídrico se tuvo en cuenta un total de 8 estaciones meteorológicas en el departamento de Boyacá, entre las cuales se encuentran estaciones de tipo Limnométricas (LM), Pluviométricas (PM), Climatológicas Ordinarias (CO) y Climatológicas principales (CP) donde las estaciones pluviométricas permiten la obtención de datos de precipitación y las estaciones climatológicas permiten obtención de datos de evaporación, temperatura y humedad. (Ver Anexo C-1).

Tabla 2: Estaciones hidrometereológicas utilizadas.

N°	CODIGO	NOMBRE ESTACION	MUNICIPIO	TIPO
1	35085050	CAMPOHERMOSO	CAMPOHERMOSO	CO
2	35087040	LOS CEDROS	CAMPOHERMOSO	LM
3	35090050	VISTA HERMOSA	PAEZ	PM
4	35080110	ALTO MUCENO	MACANAL	PM
5	35075040	INST AGRA MACANAL	MACANAL	CP
6	35080070	SAN LUIS DE GACENO	SAN LUIS DE GACENO	PM
7	35070170	NAZARETH	SAN LUIS DE GACENO	PM
8	35080080	PIEDRA CAMPANA	SAN LUIS DE GACENO	PM
9	35085070	SANTA MARIA	SANTA MARIA	CP
10	35095110	HUERTA LA GRANDE	VILLANUEVA	CP
11	35055010	EL JAPON	PARATEBUENO	CO

Fuente: El estudio.

⁷ Rodriguez E. Ballesteros E. Bettin M. Ángel C. Componente Hidrologico. Universidad Nacional de Colombia, Corpochivor, Corpoboyaca.

3.1.1 Precipitación

La precipitación es, normalmente, la única fuente de humedad que tiene el suelo y por eso conviene que su medida y cálculo se hagan con gran precisión, pues de ello depende, en gran manera la exactitud de todos los cálculos del balance hídrico.⁸

3.1.1.1 Calculo de la precipitación media multianual

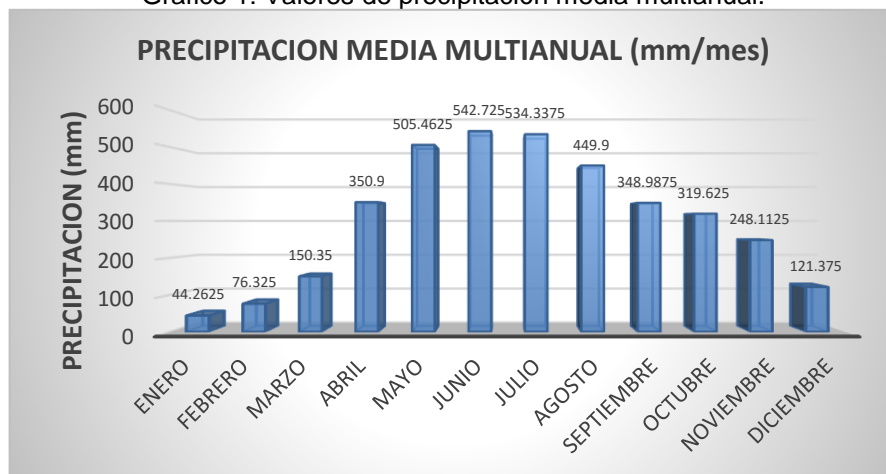
El valor medio de precipitación en un área determinada con una red de estaciones que registran datos meteorológicos distribuidos más o menos uniformemente se calcula como media aritmética de los datos evaluables en las estaciones analizadas:

$$\bar{P} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i$$

Donde \bar{P} es la precipitación media para un área determinada, P_i es la precipitación media en el mismo periodo de tiempo en la estación i , y n el número de estaciones utilizadas para el cálculo de la media.⁹

Para determinar la precipitación media multianual se analizan los valores medios mensuales multianuales para determinar un valor medio mensual para un periodo de 28 años según los datos registrados en las estaciones, ya que este es el periodo de tiempo de registro más bajo, correspondiente a la estación Campo hermoso.

Grafico 1: Valores de precipitación media multianual.



Fuente: El estudio.

^{8,9} A.A. Sokolov, T.G. Chapman, Métodos de cálculo del Balance Hídrico. Guía Internacional de Investigación y Métodos, Instituto de Hidrología de España. 1981.

En la gráfica se puede observar que el sector tiene un comportamiento monomodal de precipitación, donde los picos máximos de lluvias corresponden a los meses de mayo a julio, siendo junio el mes de máximo, y los periodos secos corresponden a los meses de diciembre a febrero.

3.1.1.2 Precipitación media por método de las isoyetas

Cuando en una región determinada se cuentan con pocos datos, o estos se encuentran fuera del área de estudio, pueden ser útiles mapas regionales de valores medios de estos elementos, generando contornos de isolinias y mediante los valores medios, determinar los valores de precipitación, escorrentía y evaporación (Ver Anexo C-3).

Tabla 3: Precipitación media del área de estudio por método de isoyetas.

PRECIPITACION MEDIA DEL AREA DE ESTUDIO					
ISOYETAS	AREA (Km ²)	% AREA	PREC. MEDIA (mm)	P. MEDIA * AREA (mm*Km ²)	
3850	6,31	25%	3850	24306,77289	
3850 3900	5,68	23%	3875	22000,16871	
3900 3950	5,56	22%	3925	21829,91269	
3950 4000	3,20	13%	3975	12706,91002	
4000 4050	2,04	8%	4025	8191,329853	
4050 4100	1,38	6%	4075	5616,087521	
4100 4150	0,05	0%	4125	201,7573333	
4150	0,79	3%	4150	3271,928978	
TOTALES	25	100%		98124,868	

Fuente: El estudio.

Fórmula para el cálculo de la precipitación media:

$$P_m = \frac{(P_{media} * Area)_{total}}{Area_{total}}$$

$$P_m = \frac{98124,868 \text{ mm} * \text{Km}^2}{25 \text{ Km}^2}$$

$$P_m = 3924,99472 \text{ mm}$$

3.1.2 Temperatura

De acuerdo con los datos obtenidos de las estaciones hidrometeorológicas, ninguna de estas estaciones cuentan con valores de temperatura, ya que es necesario utilizar los valores encontrados en el atlas climatológico del IDEAM, donde los valores de temperatura media promedio multianual la zona de estudio se encuentra en un promedio de 24 – 26° Celsius, correspondiendo la zona norte como la de

menor temperatura la cual sigue disminuyendo hacia el interior del país, aumentando gradualmente hacia el sur y hacia el oriente la temperatura correspondiendo a los llanos orientales (Ver Anexo C-4).

Según el mapa de temperatura con datos registrados en las estaciones analizadas, la temperatura del área de estudio varía de los 19,7° a los 20.9° Celsius aumentando la temperatura hacia el sureste siendo esa la zona de mayor temperatura en datos promedio anuales en un periodo de 29 años comprendido entre los años 1981 hasta el 2010, en la Tabla 4 se especifican las estaciones utilizadas.

Tabla 4: Estaciones utilizadas para el análisis de temperatura

COORDENADAS		ΔT (°C) HISTORICOS	NOMBRE EST.	MUNICIPIO	DEPARTAMENTO
X	Y				
1.107.639,08	1.048.838,34	21,1	Campohermoso	Campohermoso	Boyacá
1.084.034,55	1.038.483,75	17,2	Inst Agr Macanal	Macanal	Boyacá
1.128.292,82	1.006.905,66	25,8	Huerta La Grande	Villanueva	Casanare
1.085.641,90	976.213,94	26,1	EL Japon	Paratebueno	Cundinamarca

Fuente: El estudio.

3.1.3 Humedad Relativa

En este análisis se tienen valores en porcentaje, los cuales representan una relación entre la presión de vapor y la saturación, y tiene una afectación directa sobre la evaporación en el área de estudio, los datos tenidos en cuenta para este estudio corresponden a los promedios mensuales multianuales de las estaciones anteriormente mencionadas (Ver tabla 4).

De acuerdo a los datos obtenidos en las estaciones Campohermoso, Macanal, Villanueva y Paratebueno, se determinó en el área de estudio un rango de humedad máximo de 85,8 % y valores mínimos de 84,5%, donde el aumento de la humedad es en dirección noroccidental donde se concentran los valores más altos. (Ver Anexo C-5).

3.1.4 Evaporación

La evaporación es un proceso físico que consiste en el paso lento y gradual de un estado líquido hacia un estado gaseoso, tras haber adquirido suficiente energía para vencer la tensión superficial.¹⁰

¹⁰ Citado el 31/01/16 en:
https://es.wikipedia.org/wiki/Evaporaci%C3%B3n#Variable_hidrol.C3.B3gica

Se realizó la interpolación de los datos registrados por las estaciones analizadas en valor de milímetros, en intervalos anuales con el promedio multianual, el cual determino que en la zona estudiada, se tiene un rango entre un valor mínimo correspondiente a 1058 mm por año, y un valor máximo de 1126 mm por año, donde la evaporación tiene un aumento gradual de la zona noroccidental del área de estudio, hacia el sector suroriental, siendo este parámetro concordante con los cambios en los valores registrados de humedad relativa, temperatura y precipitación, haciendo evidente el cambio marcado entre los sistemas hidrológicos de la zona de cordillera y llanos, ya que esta zona es el límite entre los llanos orientales y la cordillera oriental, limitando el Municipio de San Luis de Gaceno con el Departamento de Casanare, en el Municipio de Villanueva (Ver Anexo C-6).

3.1.5 Evapotranspiración Potencial (ETP)

Se define como la pérdida de humedad de una superficie por evaporación directa junto con la pérdida de agua por transpiración de la vegetación. Se expresa en milímetros por unidad de tiempo.

Entre los diferentes métodos de determinación de la Evapotranspiración Potencial, existe el método según Thornthwaite, el cual está basado en la determinación de la evapotranspiración en función de la temperatura media, con una correlación en función de la duración astronómica del día y el número de días del mes. El método es muy empleado en hidrología y en la estimación de balances hídricos e Hidrología de cuencas, también es empleado en los índices y clasificaciones climáticas.¹¹

Thornthwaite propuso la fórmula:

$$e = 16 * (10 * \frac{tm}{I})^a$$

e : Evapotranspiración mensual sin ajustar en mm (mm/mes)

tm : Temperatura media mensual en °C

I : índice de calor anual

$$I = \sum i_j ; j = 1, \dots, 12$$

Que se calcula a partir del índice de calor mensual, i, como suma de 12 índices de calor mensual:

$$i_j = (\frac{tm_j}{5})^{1.514}$$

¹¹ Citado el 01/02/16 en: <http://ocw.upm.es/ingenieria-agroforestal/climatologia-aplicada-a-la-ingenieria-y-medioambiente/contenidos/evapotranspiraciones/metodosevapotranspiraciones.pdf>

a : Parámetro que se calcula, en función de I según la expresión:

$$a = 0.000000675 * I^3 - 0.000771 * I^2 + 0.01792 * I + 0.49239$$

Mediante este método, el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) realizó el cálculo del parámetro de Evapotranspiración Potencial (ETP) de las estaciones en funcionamiento, ya sean de tipo pluviométrico, Limnimétrico o climatológico.

En el área de estudio se determinó la evapotranspiración media multianual con los datos promedio históricos de 11 estaciones mediante el método de interpolación de inverso a la distancia, identificado en el SIG ArcGIS (versión 10.1) como IDW, donde posteriormente se aplica el mismo método de las isoyetas para la determinación del valor medio (Ver Anexo C-7).

Tabla 5: Estaciones interpoladas para el parámetro ETP media.

ID	CODIGO	NOMBRE ESTACION	MUNICIPIO	TIPO	ETP ANUAL (mm)
1	35085050	CAMPOHERMOSO	CAMPOHERMOSO	CO	1136,7
2	35087040	LOS CEDROS	CAMPOHERMOSO	LM	1087,2
3	35090050	VISTA HERMOSA	PAEZ	PM	1153,1
4	35080110	ALTO MUCENO	MACANAL	PM	985,7
5	35075040	INST AGRA MACANAL	MACANAL	CP	1012,6
6	35080070	SAN LUIS DE GACENO	SAN LUIS DE GACENO	PM	1282,3
7	35070170	NAZARETH	SAN LUIS DE GACENO	PM	1282,3
8	35080080	PIEDRA CAMPANA	SAN LUIS DE GACENO	PM	1273,8
9	35085070	SANTA MARIA	SANTA MARIA	CP	1209,2
10	35095110	HUERTA LA GRANDE	VILLANUEVA	CP	1503,1
11	35055010	EL JAPON	PARATEBUENO	CO	1408,0

Fuente: El estudio.

Tabla 6: Cálculo de ETP Media del área de estudio.

EVAPOTRANSPIRACION MEDIA DEL AREA DE ESTUDIO					
Líneas	ETP (mm)	AREA	% AREA	ETP MEDIA	ETP MEDIA * AREA (mm*Km ²)
	1280	1,42	5,69%	1280	1820,597621
1280	1275	3,31	13,24%	1277,5	4228,144602
1275	1270	3,35	13,40%	1272,5	4263,073912
1270	1265	3,12	12,49%	1267,5	3958,876957
1265	1260	3,04	12,18%	1262,5	3844,291079
1260	1255	2,83	11,33%	1257,5	3560,611017
1255	1250	2,86	11,45%	1252,5	3585,071039
1250	1245	2,93	11,71%	1247,5	3651,25657
1245	1240	2,11	8,42%	1242,5	2615,699852
1240		0,02	0,09%	1240	29,21466964
TOTALES		25,00	100%		31556,83732

Fuente: El estudio.

$$ETP_{media} = \frac{ETP_{MEDIA} * AREA}{AREA_{TOTAL}}$$

$$ETP_{media} = \frac{31556,83732 \text{ (mm * Km}^2 \text{ * año)}}{25,00 \text{ Km}^2}$$

$$ETP_{media} = 1262,273493 \text{ mm * año}$$

3.1.6 Escorrentía (Q)

Se llama escorrentía a la corriente de agua que se vierte al rebasar su depósito o cauce naturales o artificiales. En hidrología la escorrentía hace referencia a la lámina de agua que circula sobre la superficie en una cuenca de drenaje, es decir la altura en milímetros del agua de lluvia escurrida y extendida. Normalmente se considera como la precipitación menos la evapotranspiración real y la infiltración del sistema suelo.¹²

Para la determinación de la escorrentía se optó por la utilización del método del número de curva CN (Soil Conservation Service) donde se propone la siguiente formula:

$$Q = \frac{(P - 0.2S)^2}{(P + 0.8S)}$$

P: Precipitación promedio mensual de la cuenca.

S: Capacidad potencial de lluvia

$$S = \frac{25400}{CN} - 254$$

Conociendo los valores promedios de precipitación multianual en periodos mensuales de las estaciones analizadas es necesario conocer el valor ponderado de CN permitiendo así llegar finalmente al cálculo de escorrentía.

La determinación del valor CN se realizó mediante la utilización de mapas de cobertura vegetal, usos del suelo y características de estos, características que se

¹² Citado el 04/02/16 en: <https://es.wikipedia.org/wiki/Escorrent%C3%ADa>

relacionan con valores determinados en tabla de CN para el cálculo de la escorrentía (Ver tabla 7).

Tabla 7: Determinación de Valores de CN en suelos.

TIPO DE VEGETACION	FORMA DE CULTIVO	ESTADO	CLASE HIDROLOGICA DEL SUELO			
			A	B	C	D
Barbecho	Surcos Rectos	Malo	77	86	91	94
Cultivos en Surcos (Viandas y Hortalizas)	Surcos Rectos	Bueno	72	81	88	91
		Malo	67	78	85	89
	Curvas de Nivel	Bueno	70	79	84	88
		Malo	65	75	82	86
	Curvas de Nivel y Bancales	Bueno	66	74	80	82
Malo	62	71	78	81		
Cereales Finos (Maíz, Caña)	Surcos Rectos	Bueno	65	76	84	88
		Malo	63	75	83	87
	Curvas de Nivel	Bueno	63	74	82	85
		Malo	61	73	81	84
	Curvas de Nivel y Bancales	Bueno	61	73	81	84
Malo	59	70	78	81		
Leguminosas de siembra densa o prados en rotación	Surcos Rectos	Bueno	66	77	85	89
		Malo	58	72	81	85
	Curvas de Nivel	Bueno	64	75	83	85
		Malo	55	69	78	83
	Curvas de Nivel y Bancales	Bueno	63	73	80	83
Malo	51	67	76	80		
Pastos o Pastizales		Bueno	68	79	86	89
		Regular	49	69	79	84
		Malo	39	61	74	80
	Curvas de Nivel	Bueno	47	67	81	88
		Regular	49	69	79	84
Malo	39	61	74	80		
Prado (Permanente)		Bueno	30	58	71	78
		Malo	6	35	70	79
Bosques (Fincas Boscosas)		Regular	36	60	73	79
		Malo	25	55	70	77

Fuente: R. Pardo, N. Marreno.

Los valores de CN en el área de estudio fueron relacionados con la tabla 7, donde además de los descritos en esta, fue necesario tener en cuenta las zonas de tejido urbano continuo correspondiente al municipio de San Luis De Gaceno, donde la metodología Soil Conservation Service (SCS) determina que “Para estandarizar estas curvas, se definió un número adimensional de curva CN, tal que $0 \leq CN \leq 100$. Para superficies impermeables y de agua $CN = 100$; para superficies naturales CN^{13} , por tanto se define como una cobertura impermeable, con un valor que corresponde al valor máximo de 100.

¹³ M.Hang, M.Segovia. Estimación del Valor del Número de Curva (CN) a Través de Imágenes Satelitales Landsat5-tm. Departamento De Hidraulica UNNE.Chaco.

Tabla 8: Valores de CN para las diferentes coberturas del área de estudio.

Cobertura	Área (Km ²)	% Área	NC	C. HIDROLOGICA
Pastos limpios	4,99	20,0%	16,772	84
Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	6,35	25,4%	20,079	79
mosaico de pastos y espacios naturales	0,94	3,7%	2,245	60
Mosaico de pastos y cultivos	0,91	3,6%	2,881	79
Bosque fragmentado	0,78	3,1%	2,185	70
Bosque Denso	10,96	43,8%	26,292	60
Tejido urbano continuo	0,071571	0,3%	0,286	100
	25,00	100%	70,741	

Fuente: El estudio.

NC = Clase Hidrológica determinada por tabla * Porcentaje de Área

CN = Valor Ponderado de NC = 70.741

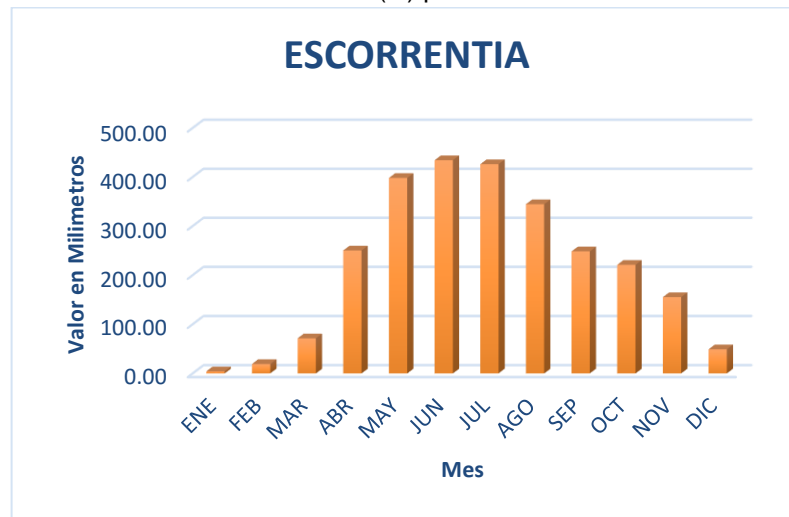
Tabla 9: Valores de precipitación determinados en el área de estudio.

PARAMETRO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Precipitación (mm)	44,26	76,33	150,3	350,9	505,5	542,7	534,3	450,0	349,0	319,6	248,1	121,4
CN	70,74	70,74	70,74	70,74	70,74	70,74	70,74	70,74	70,74	70,74	70,74	70,74
S	105,1	105,1	105,1	105,1	105,1	105,1	105,1	105,1	105,1	105,1	105,1	105,1
Q (mm)	4,21	19,08	71,37	250,2	398,1	434,3	426,1	344,5	248,4	220,9	155,3	49,03

Fuente: El estudio.

El valor total anual de escorrentía corresponde a 2621,48 mm.

Gráfico 2: Escorrentía (Q) para el área de estudio.



Fuente: El estudio.

En la gráfica se puede observar la concordancia de la escorrentía con los picos de precipitación, donde los valores máximos se concentran desde los meses de mayo a agosto, teniendo valores cercanos a cero en el mes de enero.

3.1.7 Balance Hídrico

Una vez determinados los parámetros correspondientes a la cantidad de agua que recoge esta zona, y los factores que intervienen en la acumulación o salida del recurso hídrico del sistema, es posible conocer la condición hidrológica del sector (Ver Tabla 10).

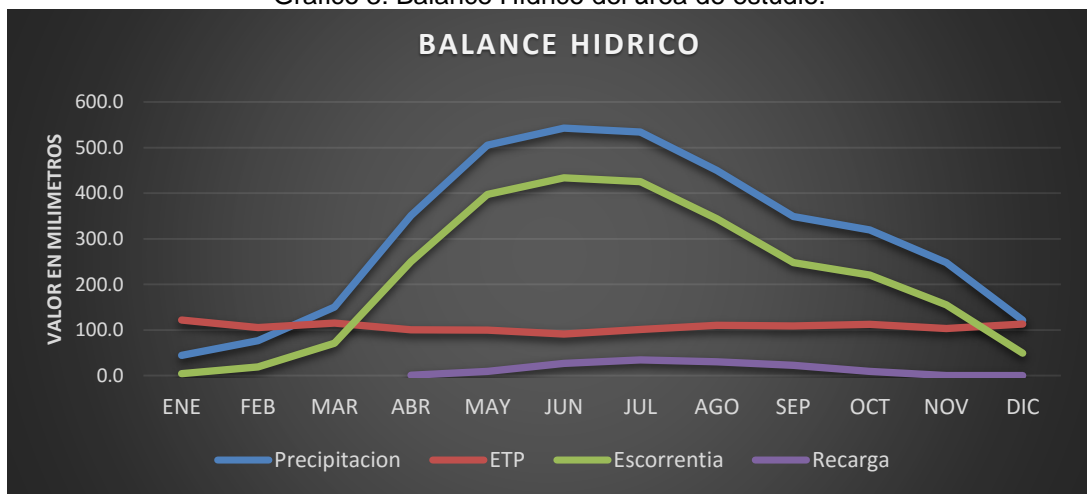
Tabla 10: Balance Hídrico de la zona de estudio.

BALANCE HIDRICO													
MES/PARAMETRO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUA
Días Del Mes	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31	365
Temperatura °C	23,5	23,8	23,5	22,7	22,1	21,5	21,2	21,6	22,2	22,6	22,8	23,0	22,5
precipitación (mm)	44,3	76,3	150,4	350,9	505,5	542,7	534,3	449,9	349,0	319,6	248,1	121,4	3692,3
ETP (mm)	121,8	105,1	115,4	100,6	99,5	91,1	101,1	110,1	109,0	112,2	103,5	112,9	1282,3
ESCORRENTIA (mm)	4,2	18,9	71,1	249,8	397,6	433,7	425,6	344,0	248,0	220,5	154,9	48,8	2617,1
Δ	-81,7	-47,7	-36,1	0,5	8,4	17,9	7,6	-4,2	-8,0	-13,0	-10,3	-40,3	
RECARGA (mm)				0,5	8,9	26,7	34,4	30,1	22,2	9,1	0,0	0,0	131,4
DEFECIT (mm)	-81,7	-47,7	-36,1								-1,2	-41,5	

Fuente: El estudio.

Se determinó una recarga total de acuíferos correspondiente a 131.4 milímetros, lo cual es un valor bajo con la intensidad de precipitación registrada en el área de estudio, donde en este sistema hidrológico es evidente que gran porcentaje del agua correspondiente a precipitación, está siendo llevado por escorrentía, se registran recargas desde el mes de abril y condición de déficit desde los meses de noviembre a marzo, debido a que la precipitación media mensual de estos meses no cumplen con las necesidades registradas de ETP y escorrentía del área.

Grafico 3: Balance Hídrico del área de estudio.



Fuente: El estudio.

4. HIDROGEOLOGIA

Dos características claves de las diferentes unidades geológicas son la porosidad y la permeabilidad de estas, donde la porosidad está ligada a la capacidad de las rocas de almacenar agua, capacidad la cual se conoce como conductividad hidráulica. Es así, como la distribución de las unidades determinan el comportamiento de las aguas, al permitir o impedir factores como el almacenamiento o flujo superficial o subterráneo. El estudio localmente se realizó bajo el enfoque de determinar las diferentes unidades hidrogeológicas presentes en la zona, mediante la interpretación de las unidades geológicas existentes, para así conocer la afectación directa del agua tanto superficial como subterránea sobre la inestabilidad de la zona (Ver Anexo A-3).

4.1 ACUÍFERO

Rocas que almacenan agua y a su vez permiten su movimiento, bajo la acción de las fuerzas de la gravedad, de tal manera que puede explotarse en cantidades relativamente apreciables, estas rocas deben tener una porosidad y permeabilidad alta para hacer posible el almacenamiento y la conductividad hidráulica, los acuíferos pueden ser de tipo libre, confinado o semiconfinado.¹⁴

4.1.1 Acuíferos Libres

Son aquellos acuíferos los cuales se encuentran en contacto con la zona subsaturada del suelo, donde la recarga es directamente por la infiltración sobre la roca con porosidad y permeabilidad, el límite del nivel de agua se conoce como nivel freático, el cual varía dependiendo de la recarga de este, cambiando en las épocas de lluvia y de sequía, En este acuífero la presión de agua en la zona superior es igual a la presión atmosférica, aumentando en profundidad a medida que aumenta el espesor saturado.¹⁵

4.1.2 Acuíferos Confinados

Son aquellos acuíferos los cuales se ubican en rocas con porosidad y permeabilidad limitadas tanto superior como inferiormente por capas impermeables, estos

¹⁴ Citado el 04/02/16 en: <http://ambientebogota.gov.co/aguas-subterraneas>

¹⁵ ¹⁶ Citado el 04/02/16 en:

http://www.recursosaguapuertorico.com/APENDICE_D_GLOSARIO_ENERO_2008.pdf

acuíferos se encuentran sometidos a una presión mayor a la presión atmosférica, la recarga de estos acuíferos se encuentra determinada por zonas diferentes a donde reside el cuerpo de agua, por ejemplo en zonas donde estas rocas llegan a la superficie, tendiendo recargas de agua por lluvias o cuerpos de agua.¹⁶

4.1.3 Acuíferos Semi-confinados

El acuífero “semi-confinado” ocurre cuando el estrato de suelo que lo cubre tiene significativamente menos permeabilidad que el acuífero en sí, pero no es impermeable, permitiendo que ocurra la descarga y recarga a través de este estrato. Las capas sello no son totalmente impermeables y permiten la filtración vertical del agua, por lo que puede recargarse o perder agua a través del techo o de la base. Según la movilidad del agua se pueden clasificar en acuíferos, acuitardos, acuícludos y acuífugos.

4.2 ACUITARDO Y/O ACUICIERRE

Son rocas que almacenan agua, pero que solo permiten el flujo de esta en forma muy lenta en comparación con los acuíferos. El Acuícierre es capaz de almacenar agua pero incapaz de transmitirla por lo menos en cantidades considerables para el aprovechamiento de este recurso, mientras que el Acuitardo almacena una gran cantidad de agua pero la transmiten muy lentamente, siendo apta solo para bajas captaciones, entre ellas están los materiales arcillo-arenosos. Estas rocas pueden ser claves cuando se estudia el movimiento del agua a nivel regional, ya que sobre áreas relativamente grandes pueden transmitir ciertas cantidades de agua a pesar de la baja velocidad de flujo; así, pueden permitir el paso de agua de un acuífero a otro, cuando estos se encuentran separados por un Acuitardo.¹⁷

4.3 ACUIFUGO

Son rocas o unidades geológicas las cuales no tienen la capacidad de almacenar ni transmitir agua¹⁸, en un sistema hidrogeológico su comportamiento es de roca sello, las cuales impiden el flujo de agua.

¹⁷ M.Velez, C. Ortiz, M.Vargas. LAS AGUAS SUBTERRANEAS un enfoque práctico. Instituto Colombiano De Geología y Minería INGEOMINAS. Universidad Nacional De Colombia. Bogotá, Colombia 2011

¹⁸ Y.E.Araque, Y.A.Meneses, Modelo Hidrogeológico conceptual de la afectación de la recarga en la acumulación de gas metano asociado al carbón (CBM), caso Sinclinal de Umbita (Boyacá, Colombia), Proyecto de grado para obtener el título del Ingeniero Geólogo, UPTC, Sogamoso. 2015.

4.4 UNIDADES HIDROGEOLOGICAS

En el área de estudio se identificaron las diferentes unidades geológicas, las cuales se caracterizaron de acuerdo con sus propiedades físicas e hidráulicas, y en el contexto hidrogeológico se reconocieron las diferentes unidades. (Ver figura 9).

4.4.1 Acuíferos

Formación Dura y Plaenners (Ksgdp): Litológicamente formación compuesta en el área de estudio por cuarzo arenitas de grano muy fino a fino, comúnmente con ondulitas, intercalaciones de limolitas y Lodolitas grises y negras, las cuales tienen un comportamiento común de acuífero de baja productividad, pero en el área de estudio se encuentra la formación altamente fracturada y la formación está en la zona de acción del flanco occidental de la Falla de Tesalia W, por lo que en este caso se definió esta unidad como un acuífero de alta productividad de porosidad secundaria.

Formación Areniscas del Limbo (Tearl): compuesta en el sector por areniscas cuarzosas muy friables, Conglomerados predominantemente cuarzosos en una matriz arenosa con tonalidades amarillas claras con intercalaciones de arcillolitas grises de poco espesor, la variación de granulometría es considerable por lo que es un sedimento mal clasificado, y su porosidad es baja, pero la intensidad de fracturamiento es alta, por lo que se definió esta unidad como un acuífero de alta productividad de porosidad secundaria.

4.4.2 Acuitardos

Depósitos Coluviales (Qc): Compuesto por fragmentos rocosos de tipo arenoso predominantemente en zona de ladera embebidos en una matriz limo arcillosa, la cual se caracteriza por tener una porosidad media, pero no es realmente una porosidad eficaz, la cual determina la comunicación entre poros, por lo que tiene una alta capacidad de retener agua pero no de transmitirla, esta unidad se clasifica como Acuitardo teniendo en cuenta que a largo plazo por el proceso de reacomodo de las partículas puede convertirse en un Acuicierre.

Depósitos Aluviales (Qal): Compuesto por fragmentos redondeados los cuales han sufrido transporte embebidos en una matriz limo- arcillosa, los cuales tienen un

comportamiento muy similar a los depósitos de tipo Coluvial, por tanto se clasificaron como la misma unidad hidrogeológica (Acuitardo).

4.4.3 Acuicierres

Formación Arcillas Del Limbo (Teal): Está conformada por arcillas con intercalaciones de areniscas cuarzosas de grano medio a grueso, las cuales en su comportamiento hidrogeológico se determinó el almacenamiento de agua sin posibilidad de transmitirla, por tanto se clasifico como Acuicierre.

Tabla 11: Áreas de las diferentes unidades hidrogeológicas.

UNIDAD	AREA (m ²)	PORCENTAJE
Acuífero	254632,673	56,6%
Acuicierre	49495,3226	11,0%
Acuitardo	145472,449	32,4%
TOTAL	449600,444	100%

Fuente: El estudio.

5. GEOMORFOLOGIA

La geomorfología se define como la ciencia que estudia las formas terrestres, involucrando procesos de formación de las estructuras como también los procesos que generan los cambios a través del tiempo de las formas de la tierra, es así que la geomorfología se compone de 3 aspectos principales, Morfometría, Morfogénesis y Morfodinámica (Carvajal 2008).

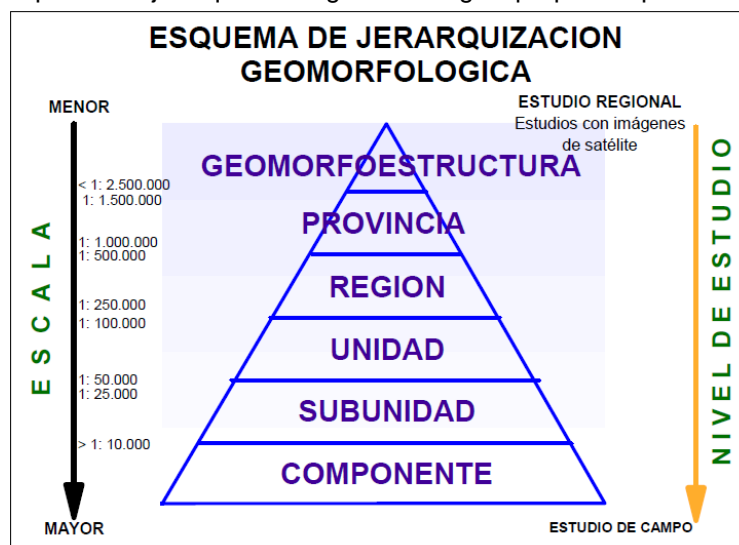
5.1 METODOLOGIA

Para el desarrollo de este capítulo se optó por la “propuesta metodológica sistemática para la generación de mapas geomorfológicos analíticos aplicados a la zonificación de amenaza por movimientos en masa escala 1:100.000.” planteada por el Servicio Geológico Colombiano, la cual fue ajustada para las características del estudio y la escala de trabajo.

Para el desarrollo de trabajo local fue necesario determinar el grado de detalle necesario, el cual es descrito por Carvajal (2008), plantea enfocar el análisis geomorfológico de un sitio o lugar, siguiendo un proceso analítico del terreno desde un punto de vista regional hasta llegar a uno local. Para tal efecto desarrolla una propuesta de jerarquización geomorfológica, en la cual relaciona las escalas de trabajo con las jerarquías geomorfológicas, donde la base regional está fundamentada en la génesis geológica de las geoformas y los ambientes morfogenéticos, y el detalle basado en los ambientes morfogenéticos, expresión morfológica, litología y procesos morfodinámicos¹⁹

¹⁹ propuesta metodológica sistemática para la generación de mapas geomorfológicos analíticos aplicados a la zonificación de amenaza por movimientos en masa escala 1:100.000. Servicio Geológico Colombiano. Bogotá D.C. Febrero de 2012.

Figura 6: Esquema de jerarquización geomorfológica propuesta para INGEOMINAS.



Fuente: propuesta metodológica sistemática para la generación de mapas geomorfológicos analíticos aplicados a la zonificación de amenaza por movimientos en masa escala 1:100.000. Servicio Geológico Colombiano. Bogotá D.C. Febrero de 2012.

El estudio realizado propone un área de tipo regional trabajada escala 1:10.000 y la zona inestable en la Vereda El Cairo una escala de trabajo 1:2.000, por tanto teniendo en cuenta el esquema de jerarquización geomorfológica, la escala de detalle manejada corresponde a componentes geomorfológicos los cuales se definen como el nivel máximo de detalle, al no existir una metodología ni un glosario geomorfológico que definan un estándar de componentes geomorfológicos es necesario determinar los rasgos del relieve (escarpes naturales o antrópicos, relieves internos de laderas o flancos, crestas, formas de valle) definidos en sitios puntuales y determinados por la morfometría detallada del terreno en una subunidad geomorfológica. Igualmente puede estar definida por micro relieves asociados con una característica litológica.²⁰

5.1.1 Insumos básicos

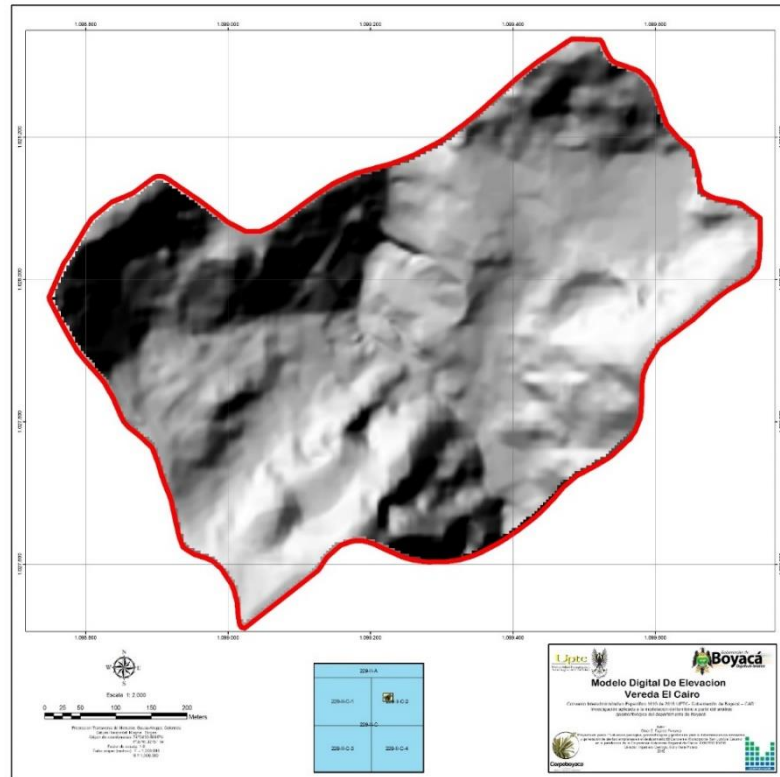
5.1.1.1 Modelo Digital De Elevación.

A partir de la topografía detallada de la zona inestable en la Vereda El Cairo, cubriendo un área de 449607 metros cuadrados, con curvas de nivel cada 2 metros, Suministrada por La Corporación Autónoma Regional De Chivor (CORPOCHIVOR),

²⁰ propuesta metodológica sistemática para la generación de mapas geomorfológicos analíticos aplicados a la zonificación de amenaza por movimientos en masa escala 1:100.000. Servicio Geológico Colombiano. Bogotá D.C. Febrero de 2012.

se generó en el SIG ArcGIS 10.1 un Modelo Digital De Elevación con tamaño de pixel de 4 metros.

Figura 7: Mapa de sombras sobre el DEM 4 metros generado.



Fuente: El estudio.

5.2 MORFOMETRÍA

Se trata de aspectos cuantitativos en términos de medidas de longitud, área, forma y pendiente. También se incluye la comparación según la relación geométrica entre las diferentes posiciones espaciales.

5.2.1 Mapa de Pendientes

Para generar el Mapa de Pendientes se utilizó el Modelo Digital de Elevación el cual se clasificó mediante ArcGIS 10.1 utilizando la clasificación descrita en la propuesta metodológica sistemática para la generación de mapas geomorfológicos analíticos aplicados a la zonificación de amenaza por movimientos en masa escala 1:100.000. Del Servicio Geológico Colombiano (Ver Anexo A-8).

Tabla 12: Clasificación de pendientes según la metodología utilizada.

CLASIFICACION	PENDIENTE	DESCRIPCION
1	< 5°	Plana a suavemente inclinada
2	6° - 10°	Inclinada
3	11° - 15°	Muy Inclinada
4	16° - 20°	Abrupta
5	21° - 30°	Muy Abrupta
6	31° - 45°	Escarpada
7	> 45°	Muy Escarpada

Fuente: El estudio.

5.3 MORFOGÉNESIS

Causas y procesos que dieron la forma al paisaje. El origen del paisaje depende de los procesos endogenéticos y la modificación de los agentes exogenéticos (agua, viento, hielo), que actúan sobre la superficie terrestre en diferentes proporciones e intensidades, y durante intervalos de tiempos geológicos, modelando el terreno. La información morfogenética es representada en forma de unidades geomorfológicas; los parámetros de evaluación morfométrica permiten caracterizar una geoforma en su orden espacial individual y en su entorno, la morfogénesis junto a la morfocronología, recopila, explica y sintetiza la evolución geológica del relieve actual.²¹ (Ver Anexo A-5).

Tabla 13: Áreas y porcentajes de los ambientes y geoformas encontrados en el área de estudio.

AMBIENTE	AREA (m ²)	%	UNIDAD	CONVENCION	AREA (m ²)
DENUDACI ONAL	158737,8 0	36,17%	CONO Y LOBULO COLUVIAL Y SOLIFLUXION	Dco	72674,76
			DESLIZAMIENTO TRANSLACIONAL	Ddt	660,37
			DESLIZAMIENTO ROTACIONAL INACTIVO	Ddri	2862,77
			ESCARPE DE EROSION MENOR	Deeme	7022,46
			LADERA DENUIDAD	Dld	21098,11
			LADERA ONDULADA	Dlo	54419,32
FLUVIAL	18576,69	4,23%	CAUCE ALUVIAL	Fca	1271,11
			PLANO O LLANURA DE INUNDACION	Fpi	17305,59
ESTRUCTURAL	261524,6 9	59,59%	LADERA ESTRUCTURAL	Sle	120299,75
			LADERA DE CONTRAPENDIENTE	Slcp	138689,42
			ESCARPE DE LINEA DE FALLA	Sife	2535,51
TOTAL					438839,18

Fuente: El estudio.

²¹ Documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza relativa por movimientos en masa escala 1:100.000. Bogotá D.C. Agosto de 2013.

5.3.1 Ambiente Denudacional.

Compuesto por geoformas las cuales han sufrido la acción combinada de procesos moderados a intensos de meteorización, erosión, y transporte, los cuales modifican las unidades preexistentes, dejando remanentes de estas o creando nuevas unidades compuestas por la acumulación de sedimentos.

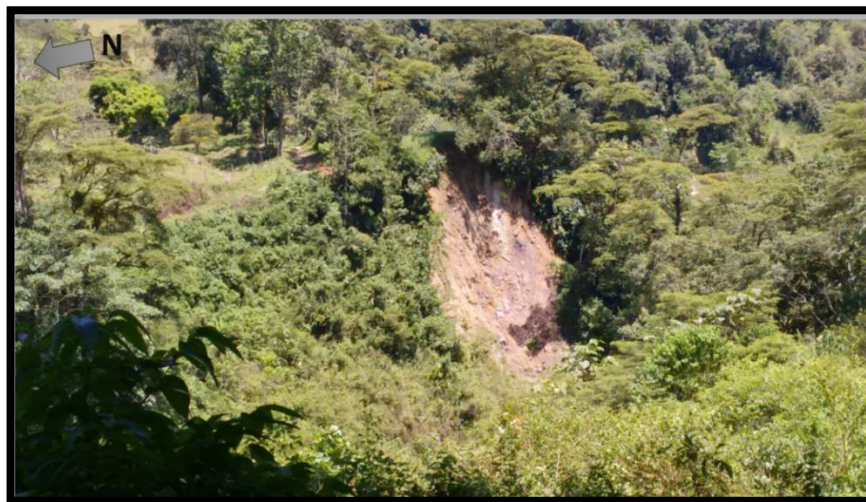
5.3.1.1 Cono y Lóbulo Coluvial y de Solifluxión (Dco)

Geoforma en forma de cono o de lóbulos alomados bajos, están constituidos por bloques y fragmentos de las formaciones preexistentes (Formación Guadalupe y Formación Areniscas del Limbo) embebidos en una matriz limo arcillosa, geoforma la cual reposa sobre la Formación Arcillas del Limbo (Teal) en el sector nororiental, mientras que la zona noroccidental reposa sobre la Formación Guadalupe con pendientes de abruptas a muy escarpadas concordando con la disposición geológica de los depósitos de tipo coluvial.

5.3.1.2 Deslizamiento Translacional (Ddt)

Geoforma generada por el movimiento de suelos residuales, tierras y detritos en zona de ladera con una pendiente muy abrupta y escarpada, la cual se ubica geológicamente sobre una formación arcillosa y depósitos de tipo coluvial ubicado sobre el margen oriental de la quebrada agua fría, el cual genera una superficie plana en ladera con pendientes superiores a 40°

Fotografía 5: Proyección del Deslizamiento Translacional al margen oriental de la Quebrada Agua Fría. (Coordenadas: E: 1'099.080 N: 1'027.927 Proyección: 85°)



Fuente: El estudio.

5.3.1.3 Deslizamiento Rotacional Inactivo (Ddri)

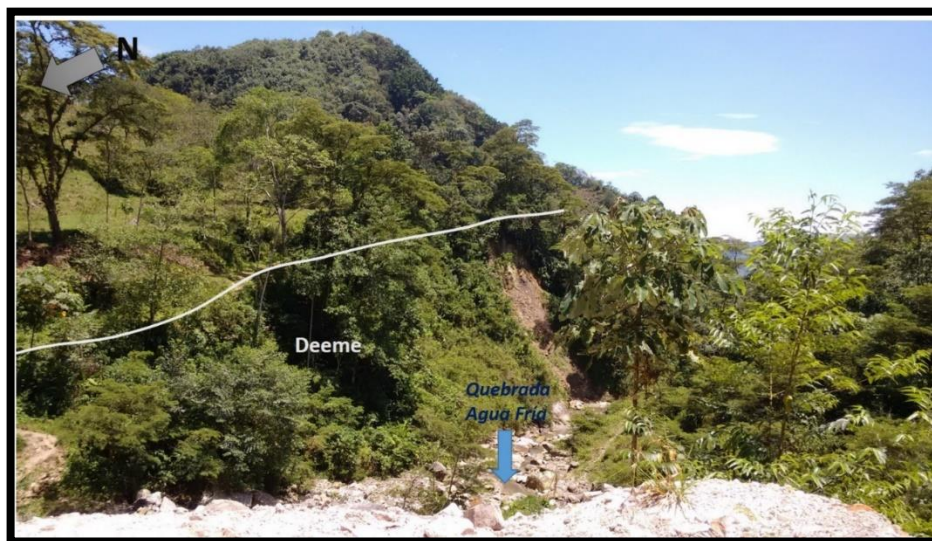
Geoforma generada por el movimiento de tipo rotacional sobre depósito de tipo coluvial compuesto por bloques arenosos en una matriz limo arcillosa en ladera ondulada con pendientes inclinadas a escarpadas, se caracteriza por la corona, la cual se divide en dos secciones de deslizamiento diferenciable, localmente la geoforma se ubica al margen occidental de la Quebrada Agua Fría, siendo esta el límite inferior del movimiento.

5.3.1.4 Escarpe de Erosión Menor (Deeme)

Escarpe de longitud muy corta, con alturas de 1 a 20 metros de forma cóncavo convexa y eventualmente recta, con pendiente muy abrupta a muy escarpada, generada por socavación fluvial lateral o por procesos de erosión.

Localmente la geoforma es un escarpe de socavación lateral producido por el flujo de la Quebrada Agua Fría, ubicada al margen oriental de la quebrada, en la parte norte de la zona de estudio el Escarpe de Erosión Menor tiene alturas inferiores a los 5 metros, y en las zonas más bajas del curso hídrico alcanza alturas de hasta 20 metros el escarpe, esta zona es propensa a sufrir deslizamientos y desprendimientos de los materiales que la componen, encontrándose localmente movimientos de tierra, suelos residuales y detritos en las visitas realizadas a campo.

Figura 8: Proyección del Escarpe de Erosión Menor (Deeme) al margen oriental de la Quebrada Agua Fría (Coordenadas: E: 1'099.159; N: 1'027.977; Proyección: 105°)



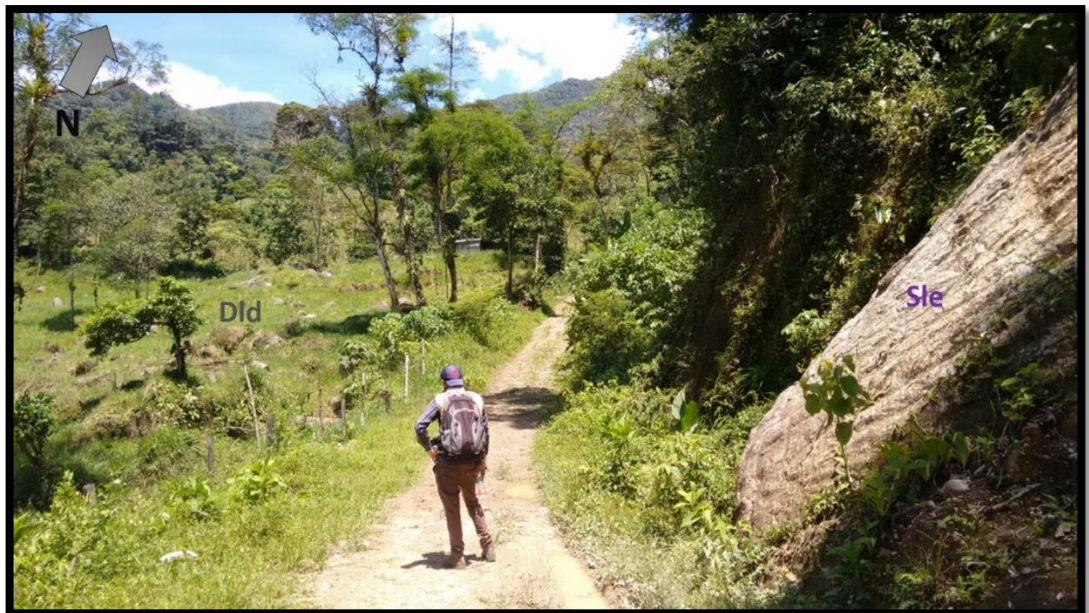
Fuente: El estudio.

5.3.1.5 Ladera Denudada (Dld)

Superficies donde se concentran los procesos denudativos, caracterizados por una topografía plana a abrupta generando un relieve relativo bajo, el cual diferencia zonas con mayor o menor grado de erosión, haciendo diferenciables las zonas en las cuales discurren los cursos de agua. Se caracteriza por presentar erosión diferencial.

Localmente se encuentra sobre el margen oriental de la Quebrada Agua Fría, geoforma generada por la erosión de materiales arenosos y arcillosos de las Formaciones Areniscas del Limbo (Tearl) y Arcillas del Limbo (Teal) y depósitos de tipo coluvial en este sector, se caracterizan estas geoformas localmente por unas pendientes que varían desde plana a suavemente inclinada hasta unos límites dados por pendientes abruptas.

Figura 9: Límite entre las geoformas Ladera Denudada (Dld) y Ladera Estructural (Sle) sobre la vía de la Vereda El Cairo. (Coordenadas: E: 1'099.409; N: 1'027.929).



Fuente: El estudio.

5.3.1.6 Ladera Ondulada (Dlo)

Geoforma caracterizada por una morfometría ondulada, con pendientes que varían de plana a suavemente inclinada, a muy escarpada, de forma muy irregular compuesta por depósitos de tipo coluvial y suelos arcillosos remanentes de las formaciones propensas a sufrir procesos erosivos.

Localmente tiene gran importancia ya que sobre esta se ubica un movimiento rotacional inactivo, y cubre gran parte de la zona clasificada como Denudacional, encontrada tanto al margen oriental como occidental de la Quebrada Agua Fría, se compone predominantemente de suelos arcillosos y depósitos de tipo coluvial.

Figura 10: Proyección de la geoforma de Ladera Ondulada (Dlo) en el margen oriental de la Quebrada Agua Fría (Coordenadas: E: 1'099.127; N: 1'027.960; Proyección: 55°)



Fuente: El estudio.

5.3.2 Ambiente Fluvial

Las geoformas de origen fluvial y lagunar están originadas por procesos de erosión de las corrientes de los ríos y acumulación o sedimentación de materiales en las zonas aledañas a dichas corrientes, tanto en épocas de grandes avenidas e inundación, como en la dinámica normal de corrientes perennes, durante la época seca. De esta manera es posible encontrar geoformas aledañas a ríos y quebradas y en el fondo de los cauces, cuyos depósitos son transportados y acumulados cuando éstas pierden su capacidad de arrastre. Se identificaron cauces activos de quebradas con valles aluviales estrechos, llanuras de inundación, conos de deyección, niveles de terrazas antiguas y recientes, planicies y deltas lacustrinos producto de eventos fluviotorrenciales recientes.²²

²² ZONIFICACIÓN DE AMENAZAS POR MOVIMIENTOS EN MASA: ESTANDARIZACIÓN DE GEOFORMAS DE AMBIENTE FLUVIAL Y LAGUNAR. Subdirección de Amenazas Geológicas. Servicio Geológico Colombiano. Bogotá. Mayo de 2013.

5.3.2.1 Cauce Aluvial (Fca)

Canales de forma irregular excavados por corrientes perennes o estacionales, dentro de macizos rocosos y sedimentos aluviales y que dependiendo de factores como pendientes, resistencia de lecho, carga de sedimentos y caudal, pueden persistir por grandes distancias.²³

La Quebrada Agua Fría comienza en la parte alta de la Vereda El Cairo a 2 kilómetros hacia el noreste de la zona de estudio y desemboca en el Rio Lengupá a 3.5 kilómetros al sureste de la zona de estudio pasando por el margen oriental del casco urbano del Municipio de San Luis De Gaceno, como afluente del Rio Lengupá tiene un alto transporte de material y un caudal considerable, por tanto la erosión de la misma ha modelado la morfometría del área de estudio, siendo este sector el curso medio de la Quebrada, determinado por el perfil en U de la misma. Tomando una forma irregular el curso con zonas donde se acentúan los procesos erosivos, de igual manera zonas de deposición de material de arrastre de diferentes tamaños, entre los cuales se encuentran rocas de considerable tamaño, bolos y materiales más finos.

5.3.2.2 Planos y Llanuras de Inundación (Fpi)

Geoforma cuyas características principales son franjas de terreno plano, bajo de morfometría baja y ondulada eventualmente inundable, se presenta bordeando los cauces fluviales y se limita localmente por escarpes.

Localmente al encontrarse el curso medio de la Quebrada, el área que cubre dicha geoforma está muy limitada al curso de agua, donde el transporte de material y las zonas inundables se acentúan en los sectores donde la morfometría es baja, concordando con la litología de los materiales encontrados. Se reconocieron en capo las zonas donde la morfometría plana es susceptible a sufrir inundaciones al aumentar el caudal de la quebrada, se observan pendientes planas a suavemente inclinadas.

²³ ZONIFICACIÓN DE AMENAZAS POR MOVIMIENTOS EN MASA: ESTANDARIZACION DE GEOFORMAS DE AMBIENTE FLUVIAL Y LAGUNAR. Subdirección de Amenazas Geológicas. Servicio Geológico Colombiano. Bogotá. Mayo de 2013.

Figura 11: Panorámica del curso bajo de la Quebrada Agua Fría en la Vereda El Cairo.



Fuente: El estudio.

5.3.3 Ambiente Estructural

Corresponde a las geoformas generadas por la dinámica interna de la tierra, especialmente las asociadas a plegamientos y fallamiento, cuya expresión morfológica está definida por la litología y la disposición estructural al plegamiento de las rocas superiores de la corteza terrestre y que aún conservan rasgos reconocibles de las estructuras originales a pesar de haber sido afectadas en diverso grado por los procesos de denudación.²⁴

5.3.3.1 Escarpe de línea de falla (Slfe)

Escarpe de ladera corta a muy corta, de pendiente escarpada a muy escarpada, originada por erosión a lo largo de la línea de falla generada por la bifurcación de la falla regional denominada Falla De Tesalia, la cual en el Municipio de San Luis De Gaceno se bifurca en la Falla de Tesalia Este y Oeste, en el área de estudio la Falla Tesalia Oeste vuelve a sufrir una bifurcación, y la parte más Occidental de esta pone en contacto rocas del cretáceo como la Formación Areniscas Dura (Ksgd) con la formación del terciario Arcillas Del Limbo (Teal), al poner en contacto una formación competente con una formación arcillosa la cual es fácilmente erosionable, quedan

²⁴ ZONIFICACIÓN DE AMENAZAS POR MOVIMIENTOS EN MASA: ESTANDARIZACION DE GEOFORMAS DE AMBIENTE ESTRUCTURAL. Subdirección de Amenazas Geológicas. Servicio Geológico Colombiano. Bogotá. Mayo de 2013.

expuestas las areniscas formando un plano concordante con el trazo de la falla, evidenciándose de igual manera las estrías de falla sobre dicho plano.

5.3.3.2 Ladera de Contra Pendiente Estructural (Slcp)

Geoforma formada por los estratos dispuestos en contra de la pendiente del terreno, según la geología local con buzamientos de los estratos con ángulos alrededor de los 50 grados, se caracterizan en el sector por pendientes de muy abruptas a muy escarpadas, limitadas por cursos de agua intermitentes, y laderas estructurales, se localizan hacia el norte del área de estudio, y hacia el sur, siendo las zonas donde las pendientes son mayores al tener una resistencia a procesos erosivos, los materiales que la componen son predominantemente areniscas, siguiendo el rumbo de las formaciones, predominantemente siguen un lineamiento N40°E.

5.3.3.3 Ladera Estructural (Sle)

Geoforma conformada por estratos dispuestos a favor de la pendiente del terreno, con pendientes que varían de muy abrupta a muy escarpada, se localiza en la parte suroccidental del área de estudio, siguiendo el lineamiento geológico de la Formación Areniscas del Limbo (Tearl) hacia el nororiente, geoforma limitada por laderas de contra pendiente estructural y cursos de agua intermitentes.

5.4 MORFODINAMICA

La morfodinámica es la parte de la geomorfología que trata de los procesos geodinámicos externos (principalmente denudativos), tanto antiguos como recientes que han modelado y continúan modelando el relieve y son los responsables del estado actual de las geoformas o Unidades de terreno²⁵. Para poder determinar la evolución y los procesos que han dado lugar al modelado del terreno se realiza una caracterización morfodinámica, donde se plantea la generación de un inventario de clasificación y caracterización de movimientos en masa en campo, donde se describen los tipos de movimiento, atributos y rasgos de cada uno de estos movimientos.

En el área de estudio se identificaron 3 movimientos en masa de diferentes tipos, los cuales fueron inventariados de acuerdo al formato establecido por la metodología sistemática para la generación de mapas geomorfológicos analíticos por movimientos en masa propuesta por el Servicio Geológico Colombiano (Ver Anexo D).

²⁵ *Propuesta metodológica sistemática para la generación de mapas geomorfológicos analíticos por movimientos en masa. Servicio Geológico Colombiano. Febrero de 2012. Bogotá D.C.*

6. ZONIFICACION DE LA SUSCEPTIBILIDAD POR MOVIMIENTOS EN MASA

Para la generación de la información, como mapas temáticos e información teórica de movimientos en masa se realizaron diferentes actividades de recopilación de datos hidrometeorológicos, interpretación mediante sistemas de información geográfica, ajuste de datos recopilados a la escala de trabajo (1:2000), recopilación y análisis de información requerida para la zonificación y toma de datos en campo, los cuales son necesarios para la determinación de aspectos geológicos, morfométricos y morfodinámicos del área de estudio.

Para la realización de la zonificación de la susceptibilidad por movimientos en masa se utilizó el Documento metodológico de la zonificación de Susceptibilidad y Amenaza por movimientos en masa escala 1:100.000 propuesto por el servicio geológico colombiano (SGC), ya que esta metodología es estándar para la realización de este tipo de estudios por parte de las entidades territoriales, al cual fue necesario realizar un ajuste a la escala de trabajo, donde se especifican los insumos básicos y procesos necesarios para la escala de trabajo <1:5000.

Tabla 14: Relación entre Métodos, Niveles y Tipos de Zonificación de acuerdo con la escala y el propósito del proyecto.

Escala	Rango indicativo de las escalas	Métodos de Zonificación			Niveles de Zonificación			Tipos de Zonificación		Propósito
		Básico	Intermedio	Avanzado	Preliminar	Intermedio	Avanzado	Susceptibilidad	Amenaza	
Pequeña	<1:100.000	*			*			*		Zonificación Regional Información
Media	1:100.000 a 1:25.000	*	(*)		*	(*)		*	(*)	Zonificación Regional Información asesoramiento
Grande	1:25.000 a 1:50.000	*	*	*	*	*	*	*	*	Zonificación Regional Información asesoramiento planificación
Detallada	>1:5.000	(*)	(*)	*	(*)	(*)	*	(*)	*	Zonificación Regional Información Asesoramiento Planificación Diseño
Notas: *Aplicable, (*) Se puede aplicar, () No se recomienda o no de uso común										

Fuente: Documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza relativa por movimientos en masa escala 1:100.000.

6.1 METODO HEURISTICO

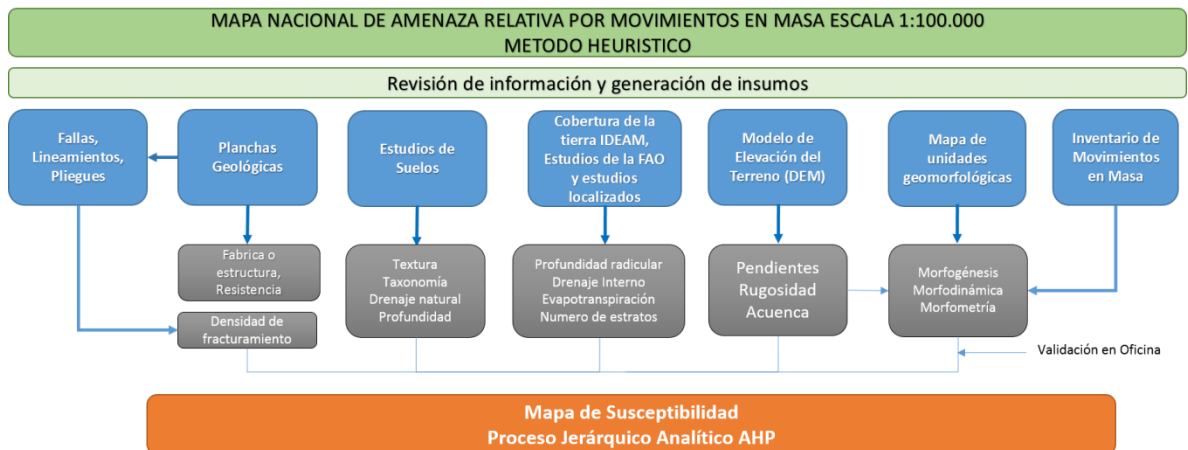
Los métodos heurísticos se basan en categorizar y ponderar los factores causantes de inestabilidad según la influencia esperada de éstos en la generación de movimientos en masa (Brabb et al., 1972; Nilsen et al., 1979; Anbalagan, 1992). Son métodos conocidos como indirectos, los resultados de los cuales se pueden extrapolar a zonas sin movimientos en masa con una combinación de factores similar.²⁶

6.1.1 método de proceso de análisis jerárquico (AHP)

Consiste en un método semicualitativo el cual determina las variables que intervienen y la influencia de cada una de estas, para así determinar un valor de calificación y así generar mapas de combinación cuantitativa para finalmente determinar la susceptibilidad de un área determinada a la ocurrencia de los diferentes tipos de movimientos en masa.

El AHP, mediante la construcción de un modelo jerárquico, permite de una manera eficiente y gráfica organizar la información respecto de un problema, descomponerla y analizarla por partes, visualizar los efectos de cambios en los niveles y sintetizar. Este método aplicado a la zonificación de amenazas tiene diferentes niveles de clasificación llevados a mapas de igual escala, para así poder superponer estos valores para realizar la respectiva interpretación de las variables en conjunto.

Figura 12: Modelo jerárquico Analítico para susceptibilidad por Movimientos en Masa (Método Heurístico)



Fuente: Documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza relativa por movimientos en masa escala 1:100.000.

²⁶ Documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza relativa por movimientos en masa escala 1:100.000. Servicio Geológico Colombiano (SGC). Vol. 2. Bogotá. Agosto de 2013.

6.2 MAPAS E INSUMOS TEMATICOS

6.2.1 Modelo Digital de Elevación (DEM)

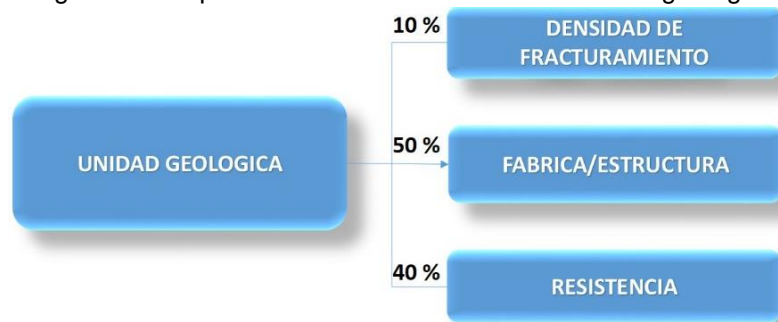
El análisis de la información morfométrica se realizó con base en la topografía detallada del área, la cual cuenta con curvas de nivel en intervalos altimétricos de 2 metros con las cuales se generó mediante el SIG ArcGIS el Modelo Digital De Elevación para la escala de detalle necesaria, el Modelo cuenta con un tamaño de pixel de 4 metros, el cual se utilizara en una escala de trabajo detallada correspondiente a 1:2000.

6.3 INSUMOS TEMATICOS

6.3.1 Geología

Para el proceso de zonificación fue necesario realizar el levantamiento de la cartografía geológica escala 1:2000 del área de estudio, descrito en el Capítulo 2. Donde se identificaron las estructuras, fallamientos y descripción litológica de las unidades presentes en el área, es así como se determinan las variables que intervienen para la clasificación geológica.

Figura 13: Esquema de clasificación de las unidades geológicas.



Fuente: Documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza relativa por movimientos en masa escala 1:100.000.

6.3.1.1 Densidad de Fracturamiento

A partir del análisis de las fallas encontradas en el sector, mediante la opción del SIG ArcGIS (10.1) Line Density, la cual permite determinar la densidad de líneas en la vecindad de cada pixel definida por un radio de búsqueda, para esto a partir de cada centro se dibuja un círculo de radio R, se toma la longitud de la línea de falla que cae dentro de este círculo y se multiplica por el peso de la actividad, la suma total se divide entre el área del círculo.

Tabla 15: Rangos de Line Density y Calificación para Zonificación de Susceptibilidad.

Rangos	Calificación	Susceptibilidad
0 - 2,214832493	1	Muy Baja Densidad
2,214832493 - 3,809511888	2	Baja Densidad
3,809511888 - 5,404191283	3	Media Densidad
5,404191283 - 7,530430476	4	Alta Densidad
7,530430476 - 22,59129143	5	Muy Alta Densidad

Fuente: Documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza relativa por movimientos en masa escala 1:100.000.

Una vez realizado el análisis Line Density, se determinó para el área de estudio en general la densidad de líneas, y localmente se tiene la acción de una falla inversa, aun así este parámetro obtuvo un valor máximo que se clasifica dentro de los rangos establecidos para la calificación 1, presentando una susceptibilidad de densidad de fracturamiento correspondiente a muy baja densidad.

6.3.1.2 Fabrica y/o Estructura

El parámetro fábrica o estructura hace referencia principalmente al empaquetamiento de la roca, donde se califica el tipo de contacto partícula a partícula, La fábrica tiene gran influencia en el comportamiento de los suelos y rocas, en especial en lo referente a la anisotropía que genera debido a la orientación de las partículas, la cual así mismo gobierna anisotropía en las propiedades geo mecánicas, la clasificación de las rocas según su fábrica/estructura, puede servir para establecer diferencias de las rocas en cuanto a su resistencia y direccionalidad de las propiedades mecánicas.

Tabla 16: Textura/Fabrica de las rocas

Textura/Fabrica	Características
Cristalina Masiva	En rocas de cualquier origen (Ígneo, metamórfico o sedimentario) cuyas partículas minerales están entrelazadas y con orientación aleatoria, corresponde a las rocas más resistentes y menos deformables, salvo las rocas volcánicas cuya calidad es un poco dispersa según sean porosas o no lo sean. Ejemplos: granitos, basaltos, calizas, chert, cuarcitas y mármoles.
Cristalina Foliada y Rocas de Falla	En rocas cuyas partículas minerales están mecánicamente entrelazadas, con una orientación preferencial a lo largo de la cual las rocas son menos resistentes. Su calidad se dispersa como consecuencia de su fábrica orientada, es decir, por los planos de esquistosidad y foliación. Ejemplos: Pizarras, Filitas, Esquistos, Milonitas.
Cristalina Bandeada	En rocas cuyas partículas minerales están mecánicamente entrelazadas, conformando bandas composicionales con alguna influencia direccional. Ejemplo: Neis
Clásticas Cementadas	En rocas con partículas cementadas, con resistencia y deformación variable, dependiendo de la calidad del material cementante, la relación matriz-clastos y el grado de empaquetamiento general que posea. Ejemplos: Areniscas, Conglomerados.
Clásticas Consolidadas	En estas rocas se presenta comportamiento variable esfuerzo-deformación, con direccionalidad de sus propiedades mecánicas. La resistencia se acrecienta con el grado de consolidación diagenética. Ejemplos: Arcillolitas, Lodolitas, Shales.

Fuente: Documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza relativa por movimientos en masa escala 1:100.000.

De acuerdo con la tabla anterior, se clasificaron las diferentes unidades geológicas para posteriormente realizar la propuesta de calificación dada por el servicio geológico colombiano, teniendo en cuenta de igual forma los depósitos de tipo cuaternario presentes en el área, que al no estar descritos dentro de la tabla de clasificación Fabrica/Estructura, es necesario relacionar el tipo de depósito para así clasificarlo dentro del rango que más se adapte a sus características.

Tabla 17: Calificación propuesta para Fabrica/Estructura.

Atributo	Propuesta de Calificación
N/A	0
Cristalina Masiva	1
Cristalinas Bandeadas	2
Clásticas Cementadas	3
Clásticas Consolidadas	4
Cristalina Foliada y Rocas de Falla	5

Fuente: Documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza relativa por movimientos en masa escala 1:100.000.

La clasificación de las unidades se hizo teniendo en cuenta la litología levantada en campo, donde hay formaciones arcillosas las cuales se clasificaron como clásticas consolidadas, y formaciones arenosas las cuales son rocas cementadas, los depósitos de tipo coluvial y aluvial, al ser un material heterogéneo, donde los clastos se encuentran embebidos en una matriz limo-arcillosa, de igual manera se clasificaron dentro de materiales cementados.

Tabla 18: Clasificación Fabrica/Estructura de las unidades geológicas de la zona de estudio.

Formación	Convención	Atributo	Propuesta de Calificación
Areniscas Dura	Ksgd	Clástica Cementada	3
Arcillas del Limbo	Teal	Clástica Consolidada	4
Areniscas del Limbo	Tearl	Clástica Cementada	3
Cuaternario Coluvial	Qc	Clástica Cementada	3
Cuaternario Aluvial	Qal	Clástica Cementada	3

Fuente: El estudio.

6.3.1.3 Resistencia

Este parámetro hace referencia a las propiedades físicas de los materiales que intervienen, como resistencia a la compresión, impacto y penetración, la cual es medida en laboratorio y se clasifican mediante los ensayos de resistencia a la compresión uniaxial y carga por punta principalmente, aunque existen ensayos simples in situ para determinar un parámetro que correlacione estos valores de ensayos físicos y permiten caracterizar la resistencia de los materiales a los agentes de deterioro o denudativos, para la realización de la calificación se adoptan las tablas de clasificación propuestas por Hoke 1996, donde se especifican las características de resistencia de cada una de las clasificaciones, con los ensayos realizables en campo para clasificar las unidades dentro de los rangos descritos.

Tabla 19: Categorías de resistencia a la compresión simple de las rocas, según Hoke 1996.

GRADO	TERMINOLOGIA	RESISTENCIA COMP. UNIAXIAL (MPa)	RESISTENCIA CARGA POR PUNTA (MPa)	CAMPO DE ESTIMACION DE FUERZA	EJEMPLOS
R6	Extremadamente fuerte	> 250 MPa	>10	Solo puede astillarse con el martillo geológico	basalto fresco, chert, diabasa, Gneiss, granito, cuarcita
R5	Muy fuerte	100 - 250 MPa	4 - 10 MPa	Requiere muchos golpes del martillo geológico para romperse	Anfibolita, Arenisca, Basalto, Gabro, Gneiss, Granodiorita, Caliza, Mármol, Riolita, Toba
R4	Fuerte	50 - 100 MPa	2 - 4 MPa	Requiere más de un golpe del martillo geológico para romperse	Caliza, Mármol, Filita, Arenisca, Esquisto, Lutita
R3	Medianamente fuerte	25 - 50 MPa	1 - 2 MPa	no puede ser raspado o pelado con una navaja, la muestra se pueden fracturar con un solo golpe de un martillo geológico	Arcillolitas, Carbón, Schist, Lutita, Arcillolitas
R2	Débil	5 - 25 MPa	*	se puede raspar con una navaja, con dificultad, muesca poco profunda hecha por golpe firme con punta de un martillo geológico	Talco, Potasio, Halita
R1	Muy débil	1 - 5 MPa	*	Se desmorona con un firme golpe con un martillo geológico, se pueden pelar por una navaja de bolsillo	Roca altamente alterada o degradada
R0	Extremadamente débil	0,25 - 1 MPa	*	identificado por partículas miniatura (Polvo)	Polvo de falla

Fuente: Documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza relativa por movimientos en masa escala 1:100.000.

De acuerdo con la anterior tabla, y con los datos recopilados en campo se dio la clasificación para cada una de las unidades geológicas encontradas en la zona, para la descripción de unidades de tipo cuaternario, tanto aluvial como coluvial, se tuvo en cuenta la clasificación de cuaternarios descrita por el documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza relativa por movimientos en masa escala 1:100.000, donde se especifica el rango de calificación dependiendo del tipo de depósito y las geformas asociadas a estas.

Tabla 20: Calificación de resistencia geológica de depósitos.

Ambiente	Deposito	Geoforma Asociada	Calificación
Denudacional	Depósitos Coluviales	Cono y Lóbulo Coluvial y de Solifluxión y Conos de Deyección, Glacis de Acumulación	5
	Depósitos de Detritos	Cono o Lóbulo de deslizamiento Translacional de detritos, Cono o lóbulo de deslizamiento rotacional de detritos	4
	Depósitos de Tierras	Cono o lóbulo de deslizamiento Translacional de tierras, Cono o lóbulo de deslizamiento rotacional de tierras	5
	Depósitos de Terraza Sobre Elevada	Terraza sobreelevada o colgada	4
	Depósitos Costras Ferruginosas o Calcáreas	Planos aterrizados o duricostras, Terrazas o mesas calcretas o silicretas	1
	Depósitos de Lodos	Cono o lóbulo de flujo de lodo	5
Fluvial y Lagunar	Depósitos de Cauce y Llanura Aluvial	Cauce activo y abandonado, Albardones, barras, cuencas de decantación, lagos en media luna, lagunas naturales, meandros abandonados, planicie o llanura de inundación, planicies o deltas lacustrinos, planos anegadizos, planos y artesas lagunares	1
	Depósitos de Terraza Aluvial	Terrazas de erosión, terrazas de acumulación subreciente, terrazas de acumulación antigua, terrazas de depositación y escarpes de terraza	2
	Depósitos Paudales	artesas lagunares y planos anegadizos	1
	Depósitos Lagunares	lagos en media luna y meandros abandonados	1
	Depósitos de Abanicos Aluviales	Abanicos fluvio-torrenciales, conos de deyección, deltas de desborde natural, deltas lacustrinos y escarpes de abanicos fluviales	3
Marino	Depósitos Marino Aluviales	Llanuras costeras	2

Fuente: Documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza relativa por movimientos en masa escala 1:100.000.

Las tablas 19 y 20 describen las calificaciones de las unidades en el parámetro de resistencia, con las cuales se clasificaron las unidades geológicas y se describen en la tabla 21.

Tabla 21: Calificación de resistencia de las unidades del área de estudio.

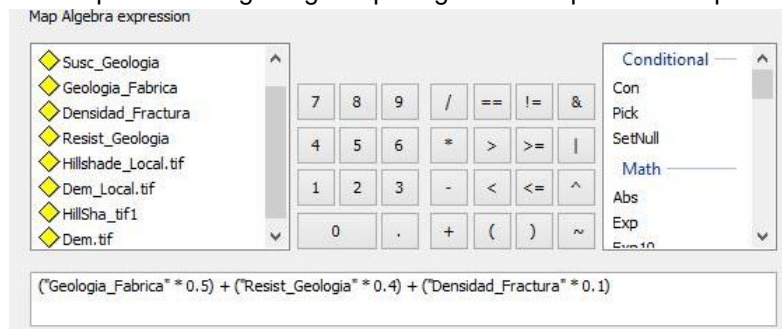
Formación	Simbología	Resistencia	Grado	Calificación Resistencia
Areniscas Dura	Ksgd	Muy Dura	R5	1
Arcillas del Limbo	Teal	Moderadamente Dura	R3	3
Areniscas del Limbo	Tearl	Dura	R4	2
Cuaternario Coluvial	Qc	Muy Blanda	R1	5
Cuaternario Aluvial	Qal	No aplica en M. Masa	-	1

Fuente: El estudio.

6.3.1.4 Susceptibilidad geológica

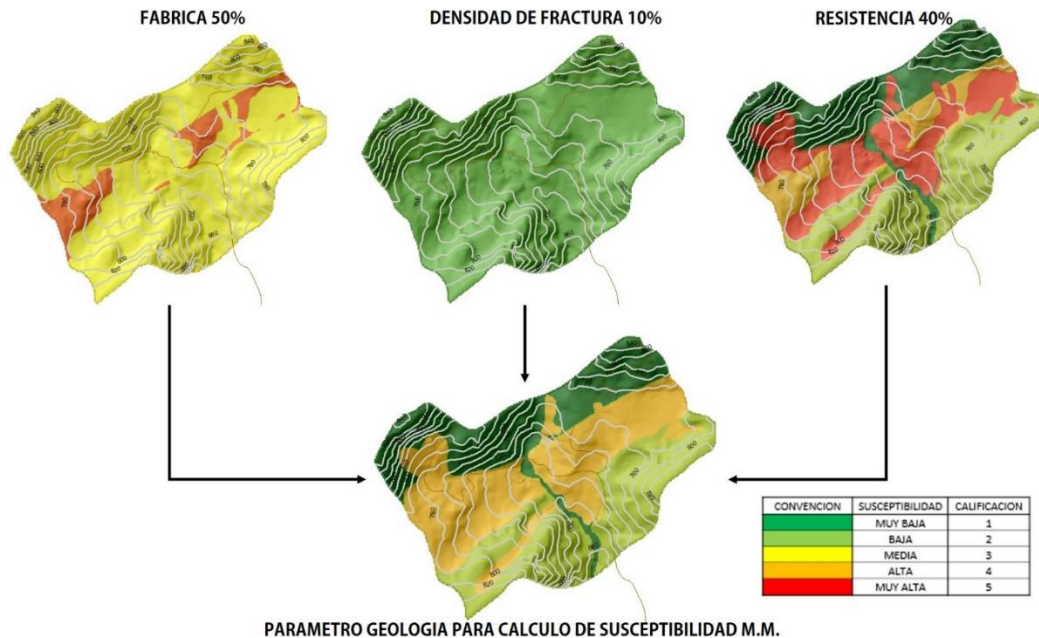
Una vez realizado el análisis de los factores geológicos que intervienen, mediante un proceso de cruce de información temática utilizando el SIG ArcGIS, se da un valor de calificación de 1 a 5 de cada uno de estos parámetros, donde 1 corresponde al valor de susceptibilidad más bajo y 5 susceptibilidad muy alta, se realiza la rasterización de los mapas mediante una transformación denominada Polígono to Raster y posteriormente mediante Map Algebra/ Raster Calculator, se cruzan los mapas cada uno con su respectivo porcentaje.

Figura 14: Cruce de parámetros geológicos para generar mapa de susceptibilidad geológica.



Fuente: El estudio.

Figura 15: mapas generados del parámetro geológico para cálculo de susceptibilidad de movimientos en masa.



PARAMETRO GEOLOGIA PARA CALCULO DE SUSCEPTIBILIDAD M.M.

Fuente: El estudio.

6.3.2 Geomorfología

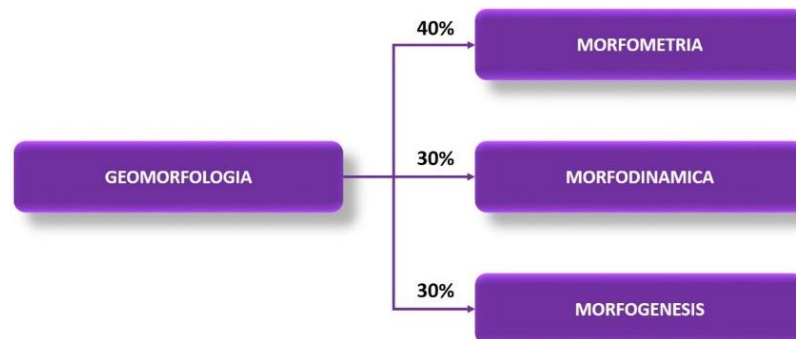
Como insumo temático del componente geomorfológico para la zonificación de susceptibilidad por movimientos en masa se realizó el levantamiento de la cartografía geomorfológica (Ver Capítulo 5), la cual será utilizada para la definición de parámetros como Morfodinámica y Morfogénesis, basándonos en esta información se realiza la calificación de las unidades. El parámetro geomorfológico se compone de 3 aspectos principales:

Morfometría: Se refiere al análisis cuantitativo de la forma, un concepto que abarca el tamaño y la forma del terreno²⁷, se compone a su vez de 3 aspectos que determinan este parámetro los cuales son Pendientes, Rugosidad y Acuenca.

Morfogénesis: Causas y procesos que dieron la forma al paisaje. El origen del paisaje depende de los procesos endogenéticos y la modificación de los agentes exogenéticos (agua, viento, hielo), que actúan sobre la superficie terrestre en diferentes proporciones e intensidades, y durante intervalos de tiempos geológicos, modelando el terreno.²⁸

Morfodinámica: Corresponden a una serie de acciones sucesivas, simultáneas a través de las cuales los agentes morfogenéticos principalmente los externos son capaces de modelar la superficie terrestre, los procesos morfodinámicos están asociados a una secuencia conformada por la erosión de la roca, el transporte de los materiales removidos y sedimentación de dichos detritos. En consecuencia los procesos morfodinámicos dependen de una serie de factores externos e internos.²⁹

Figura 16: Porcentajes de parámetros geomorfológicos para el cálculo de susceptibilidad por movimientos en masa.



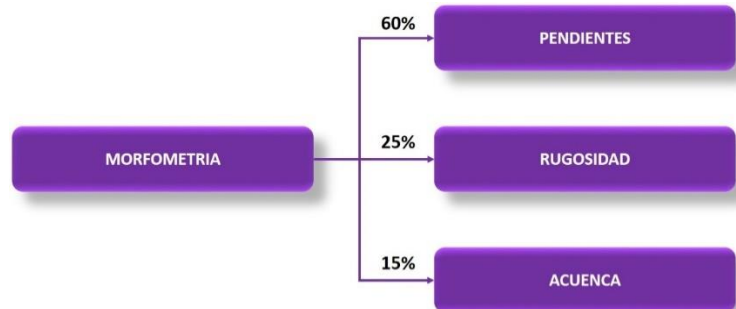
Fuente: Documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza relativa por movimientos en masa escala 1:100.000.

^{27, 28} Documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza relativa por movimientos en masa escala 1:100.000. Servicio Geológico Colombiano (SGC). Vol.2.Bogotá. Agosto 2013.

6.3.2.1 Morfometría

Trata de aspectos cuantitativos en términos de pendientes, Rugosidad y Acuencia. También se incluye la comparación según la relación geométrica entre las diferentes posiciones espaciales.³⁰ Para la generación de los parámetros morfométricos se utilizó el Modelo Digital de Elevación (DEM) descrito inicialmente como insumo básico.

Figura 17: Porcentajes de los parámetros que componen la morfometría.



Fuente: Documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza relativa por movimientos en masa escala 1:100.000.

6.3.2.1.1 Pendientes

La pendiente es una forma de medir el grado de inclinación del terreno. A mayor inclinación mayor valor de pendiente. Para poder realizar la interpretación geomorfológica en conjunto con sus diferentes variables es necesario realizar un rango de pendientes clasificada en 5 grupos, con calificación de susceptibilidad de muy baja a muy alta, por tanto se sigue la clasificación descrita en el documento metodológico del Servicio Geológico Colombiano.

Tabla 22: Clasificación de susceptibilidad de las pendientes.

CLASIFICACION	PENDIENTE EN GRADOS	DESCRIPCION	SUSCEPTIBILIDAD
1	0 - 7°	Plana a suavemente inclinada	Muy Baja
2	7° - 11°	Inclinada	Baja
3	11° - 19°	Muy Inclinada	Media
4	19° - 40°	Abrupta	Alta
5	40° - 90°	Escarpada	Muy Alta

Fuente: Documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza relativa por movimientos en masa escala 1:100.000.

^{29,30} Documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza relativa por movimientos en masa escala 1:100.000. Servicio Geológico Colombiano (SGC). Vol.2.Bogota. Agosto 2013.

6.3.2.1.2 Rugosidad

La rugosidad del terreno se define como la variación de la pendiente en un área y representa la desviación del vector normal a la superficie en cada celda. El valor 1 corresponde a rugosidad nula y los valores se hacen menores al aumentar la dispersión de los vectores (alta rugosidad).³¹ El parámetro rugosidad se clasificó de acuerdo a la tabla de rangos propuesta en el documento metodológico (Ver tabla 23), con base en el Modelo Digital de Elevación utilizado en el estudio.

Tabla 23: Rangos de clasificación y calificación de susceptibilidad del parámetro rugosidad.

CONVENCION	RANGO	DESCRIPCION	SUSCEPTIBILIDAD	CALIFICACION
1	0,9975-1	RUGOSIDAD MUY BAJA O NULA	MUY BAJA	1
2	0,995-0,9975	RUGOSIDAD BAJA	BAJA	2
3	0,99-0,995	RUGOSIDAD MEDIA	MEDIA	3
4	0,985-0,99	RUGOSIDAD ALTA	ALTA	4
5	0,1-0,985	RUGOSIDAD MUY ALTA	MUY ALTA	5

Fuente: Documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza relativa por movimientos en masa escala 1:100.000.

6.3.2.1.3 Acuenca

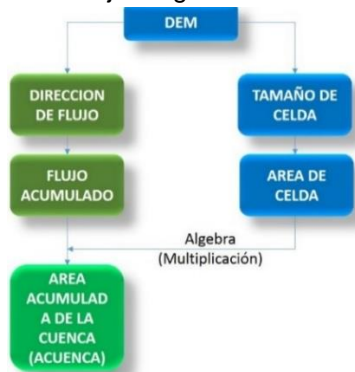
El atributo Acuenca corresponde a la superficie de la cuenca aguas arriba de la celda cuya sumatoria de la superficie vierten a una celda determinada (cuenca acumulada). La variable se deriva del Modelo Digital de Elevación MDE y se expresa en m². Si bien es una variable cuantitativa, los valores de superficie son múltiplo del área de una celda, no tratándose de una variable continua.³²

Para el cálculo de este parámetro se estableció de acuerdo al tamaño del pixel de 4 metros, donde se realiza el análisis mediante el SIG ArcGIS mediante las opciones Flow Accumulation y Flow Direction donde finalmente mediante la opción Map algebra/Raster Calculator se realiza la multiplicación de estos dos parámetros y se clasifica en los rangos establecidos por el documento metodológico.

³¹ Documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza relativa por movimientos en masa escala 1:100.000. Servicio Geológico Colombiano (SGC). Vol.2.Bogota. Agosto 2013.

³² Documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza relativa por movimientos en masa escala 1:100.000. Servicio Geológico Colombiano (SGC). Vol.2.Bogota. Agosto 2013.

Figura 18: Diagrama de flujo de generación del parámetro Acuenca.



Fuente: Documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza relativa por movimientos en masa escala 1:100.000.

Tabla 24: Rangos de clasificación del atributo Acuenca.

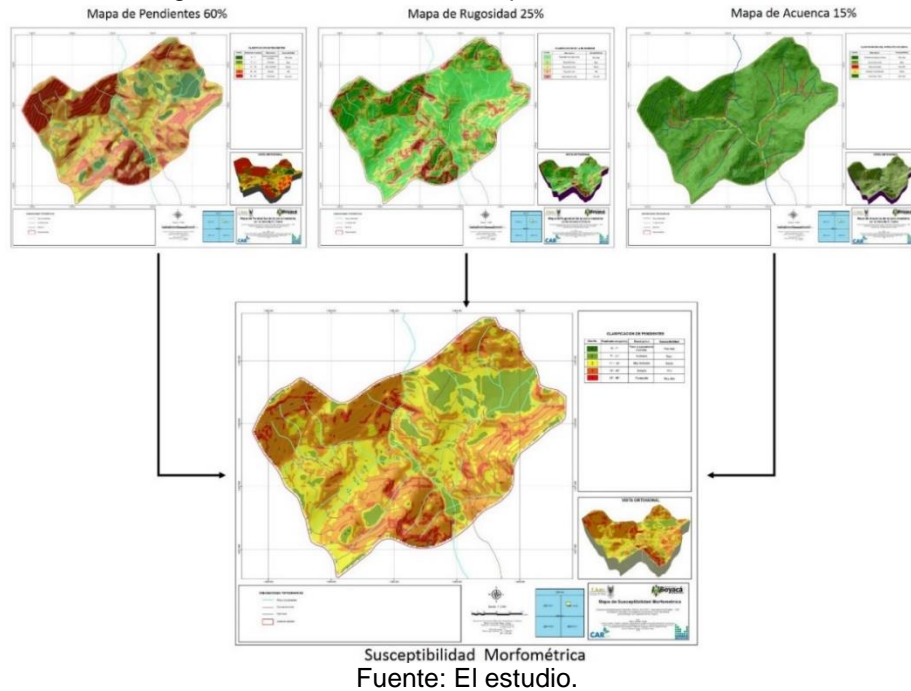
CONVENCION	RANGO	DESCRIPCION	SUSCEPTIBILIDAD	CALIFICACION
	0	Divisoria de Aguas o Lomos	MUY BAJA	1
	0 - 3.500	Escorrentía Lenta	BAJA	2
	3.500 - 40.000	Flujo Acumulado	MEDIA	5
	40.000 - 1'000.000	Drenaje no permanente	ALTA	3
	1'000.000 - Max	Quebradas, Ríos	MUY ALTA	1

Fuente: Documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza relativa por movimientos en masa escala 1:100.000.

6.3.2.1.4 determinación final del parámetro morfométrico

Finalmente una vez realizada la clasificación de los parámetros morfométricos, se realizó el cruce de la información mediante el SIG ArcGIS (10.1) mediante la opción Map Algebra/ Raster Calculator, donde de acuerdo a los porcentajes de cada uno de los parámetros se llega a la clasificación morfométrica final, con una calificación concordante con los rangos de los parámetros determinados, entre 1 y 5, donde 5 corresponde a un valor de susceptibilidad morfométrica muy alta y 1 corresponde a susceptibilidad muy baja.

Figura 19: Calculo de la susceptibilidad morfométrica.



6.3.2.2 Morfogénesis

Este parámetro hace referencia a los procesos que dieron formación a las geoformas las cuales se expresan como unidades geomorfológicas, donde para clasificar este parámetro utilizo el mapa geomorfológico detallado en el área de estudio (Ver Capítulo 5.), dependiendo de su ambiente, y aspectos como sus características agradacionales o deposicionales y degradacionales o destructivos. La clasificación de cada una de las unidades geomorfológicas se realizó mediante el documento metodológico, donde se da una calificación dependiendo de los factores anteriormente descritos (Ver Tabla 25).

Tabla 25: Clasificación y calificación de las unidades morfogenéticas.

Ambiente	Origen	Proceso genético	Modelado		Rango de Calificación	
			Agradación	Degradación	Agradación	Degradación
Costero	0	1	1	0	2	1
Fluvial	0	1	1	0	2	1
Eólico	1	1	1	0	3	2
Kárstico	1	1	1	0	3	2
Volcánico	2	0	1	0	3	2
Antrópico	2	1	1	0	4	3
Denudacional	2	1	1	0	4	3
Glacial	2	1	1	0	4	3
Estructural	3	0	1	0	4	3

Exógeno	1	Agradacional	1
Endógeno	0	Degradacional	0

Fuente: Documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza relativa por movimientos en masa escala 1:100.000.

Tabla 26: Calificación de las unidades geomorfológicas del área de estudio.

Ambiente	Modelado	Geoforma	Acrónimo	Calificación
Denedacional	Agradación	Cono y lóbulo coluvial y de soliflucción	Dco	4
	Degradación	Deslizamiento rotacional inactivo	Ddri	3
	Degradación	Deslizamiento Translacional	Ddt	3
	Degradación	Escarpe de erosión menor	Deeme	3
	Degradación	Ladera denudada	Dld	3
	Agradación	Ladera ondulada	Dlo	4
Estructural	Degradación	Escarpe de falla	Slfe	3
	Degradación	Ladera de contrapendiente	Slcp	3
	Degradación	Ladera estructural	Sle	3
Fluvial	Agradación	Plano o llanura de inundación	Fpi	2
	Degradación	Cauce aluvial	Fca	1

Fuente: El estudio.

6.3.2.3 Morfodinámica

La generación del atributo morfodinámico se realizó a través de un proceso de Agrupamiento, el cual se construye a partir de la representación Cartográfica de los suelos transportados vistos como geoforma, del inventario de Movimientos en Masa de campo y las variables geométricas derivadas del modelo DEM.

Figura 20: Proceso metodológico en la construcción del atributo morfodinámico.



Fuente: Documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza relativa por movimientos en masa escala 1:100.000.

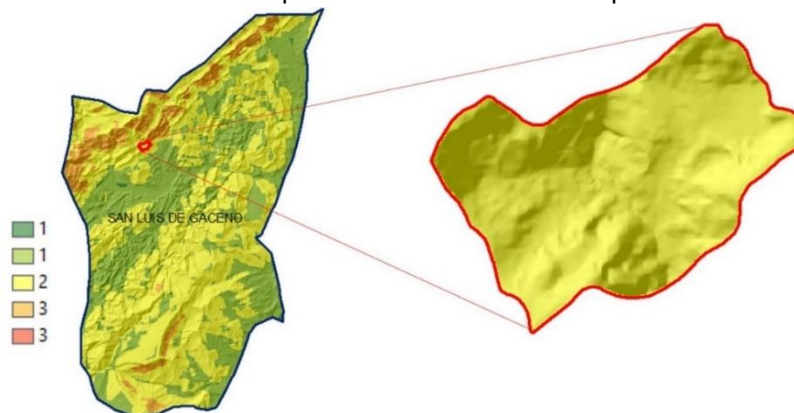
6.3.2.3.1 Relieve relativo

Se hace referencia a que el relieve relativo representa la diferencia de altitud de la geoforma, independientemente de su altura absoluta o nivel del mar. Ella se mide por la diferencia de alturas entre la parte más baja y alta, llámese colina, montaña, meseta, terraza y otros. (INGEOMINAS, 2004), cuando el análisis de la Geoforma

lo hace un intérprete (que sería lo ideal), pero en el uso de algoritmos que permitan hacer esta evaluación tendremos que recurrir a la siguiente definición: El índice de relieve relativo se define como la diferencia entre la mayor elevación y la menor elevación por unidad de área (Chacón, T., 1993) y se expresa como la máxima diferencia de altura del terreno por Km².

La clasificación del parámetro se realizó con base en el modelo de elevación, el cual se clasificó en 6 rangos mediante la clasificación descrita por el documento metodológico, donde se agrupan de acuerdo a las alturas promedio del terreno para dar un valor de calificación de relieve, en este caso por ser un estudio local, con el modelo de elevación digital local, el cálculo es errado, ya que la diferencia altimétrica es muy baja y se desprecian estos valores, por tanto se utilizó el modelo digital de elevación de 30 metros correspondiente a la totalidad del municipio de San Luis de Gaceno, clasificando en los rangos establecidos por el documento metodológico (Ver Tabla 26). Se determinó un valor de calificación de relieve relativo para el área de estudio correspondiente a 2.

Figura 21: Determinación del parámetro Relieve Relativo para el área de estudio.



Fuente: El estudio.

6.3.2.3.2 *Inclinación de ladera*

Se hace referencia a la inclinación de la ladera porque generalmente está relacionada con el tipo de material que conforma la unidad morfológica y con la susceptibilidad de dicha unidad a la formación de los movimientos en masa. En general se puede afirmar que existe una relación directa y proporcional. Aunque si es un factor dinámico importante, esta relación no siempre es correlacionable y depende principalmente del tipo de material (VARGAS, 2001 en INGEOMINAS 2004).³³

³³ Documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza relativa por movimientos en masa escala 1:100.000. Servicio Geológico Colombiano (SGC). Vol.2.Bogotá. Agosto 2013.

Tabla 27: Calificación de la inclinación de ladera.

INCLINACION	DESCRIPCION	CARACTERISTICAS DEL MATERIAL Y SUSCEPTIBILIDAD	CAL. INCLINACION
< 5°	Plana a suavemente inclinada	Muy blanda y muy baja susceptibilidad a MM.	1
5° - 10°	Inclinada	Blanda y baja susceptibilidad a MM.	1
10° - 15°	Muy inclinada	Moderadamente blanda y moderada susceptibilidad a MM.	2
15° - 20°	Abrupta	Moderadamente resistente y moderada susceptibilidad a MM.	2
20° - 30°	Muy abrupta	Resistente y Alta susceptibilidad a MM.	3
30° - 45°	Escarpada	Muy resistente y alta susceptibilidad a MM.	3
> 45°	Muy escarpada	Extremadamente Resistente y alta susceptibilidad a MM.	3

Fuente: Documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza relativa por movimientos en masa escala 1:100.000.

6.3.2.3.3 Combinación de Relieve Relativo e Inclinación de ladera

Esta combinación mediante el documento metodológico se conoce como RelIncli, y se describe como la agrupación de estos dos elementos geomorfológicos, donde cada uno de estos tiene un porcentaje específico, distribuido de la siguiente manera:

$$RelaIncli = (0.6 * Relieve Relativo) + (0.4 * Inclinacion de Ladera)$$

Esta combinación se realiza mediante el SIG ArcGIS (10.1), donde mediante la opción MapAlgebra/Raster Calculator se genera el mapa final de combinación de relieve relativo e inclinación de ladera.

6.3.2.3.4 Suelos

El parámetro morfodinámico de los suelos hace referencia a todos aquellos cambios de las unidades, como movimientos en masa los cuales dependiendo de su tipo tienen una calificación que varía de 4 a 5 y depósitos de tipo cuaternario, los cuales hacen que aumente o disminuya la calificación morfométrica en algún punto determinado, por ejemplo los depósitos de tipo aluvial los cuales no intervienen en susceptibilidad de movimientos en masa, por lo que la calificación Morfodinámica corresponde a un valor bajo (1) y zonas de depósitos Coluviales los cuales tienen calificaciones mayores, elevando el valor de calificación a (5) dependiendo del tipo de depósito.

Tabla 28: Calificación de suelos para el parámetro morfodinámico.

Ambiente	Deposito	Geoforma Asociada	Calif
Denudacional	Depósitos Coluviales	Cono y Lóbulo Coluvial y de Solifluxión y Conos de Deyección, Glacis de Acumulación	5
	Depósitos de Detritos	Cono o Lóbulo de deslizamiento translacional de detritos, Cono o lóbulo de deslizamiento rotacional de detritos	4
	Depósitos de Tierras	Cono o lóbulo de deslizamiento translacional de tierras, Cono o lóbulo de deslizamiento rotacional de tierras	5
	Depósitos de Terraza Sobre Elevada	Terraza sobreelevada o colgada	4
	Depósitos Costras Ferruginosas o Calcáreas	Planos aterrazados o duricostras, Terrazas o mesas calcretas o silicretas	1
	Depósitos de Lodos	Cono o lóbulo de flujo de lodo	5
Fluvial y Lagunar	Depósitos de Cauce y Llanura Aluvial	Cauce activo y abandonado, Albardones, barras, cuencas de decantación, lagos en media luna, lagunas naturales, meandros abandonados, planicie o llanura de inundación, planicies o deltas lacustrinos, planos anegadizos, planos y artesas lagunares	1
	Depósitos de Terraza Aluvial	Terrazas de erosión, terrazas de acumulación subreciente, terrazas de acumulación antigua, terrazas de depositación y escarpes de terraza	2
	Depósitos Paudales	artesas lagunares y planos anegadizos	1
	Depósitos Lagunares	lagos en media luna y meandros abandonados	1
	Depósitos de Abanicos Aluviales	Abanicos fluvio-torrenciales, conos de deyección, deltas de desborde natural, deltas lacustrinos y escarpes de abanicos fluviales	3

Fuente: Documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza relativa por movimientos en masa escala 1:100.000.

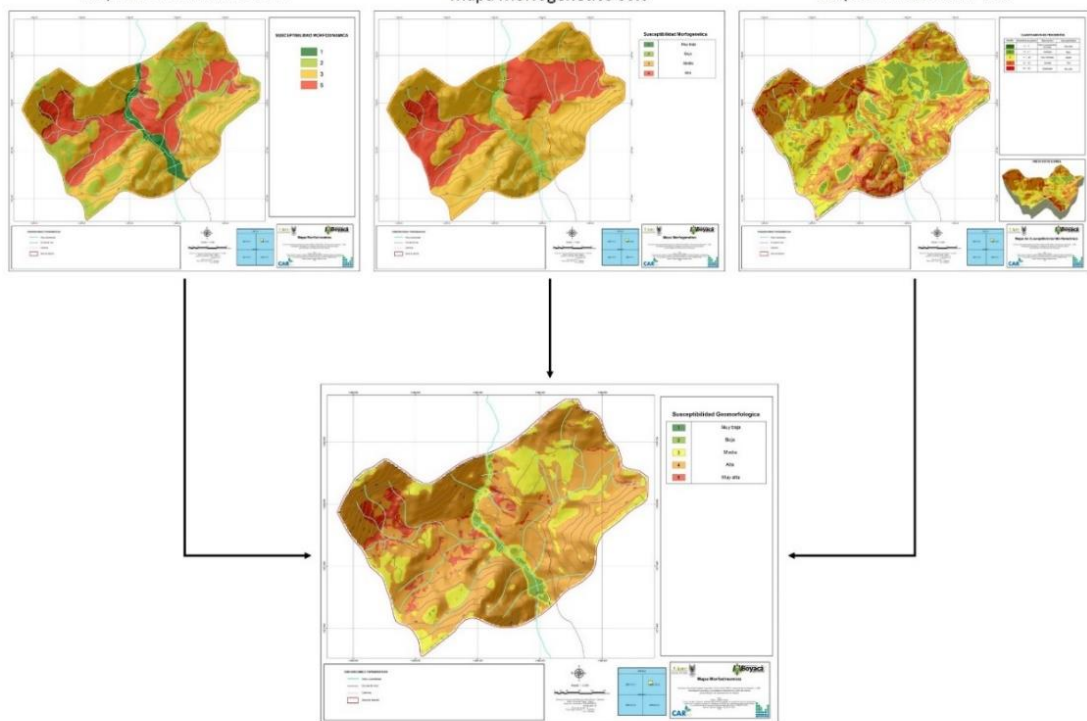
6.3.2.2.5 Susceptibilidad Morfodinámica Total

Para determinar el parámetro de susceptibilidad Morfodinámica total se utiliza el mapa generado de relación de inclinación (RelaIncli) al cual se superpone la delimitación de suelos (Cuaternarios, Movimientos en Masa) con sus calificaciones descritas en la tabla 28, la clasificación se agrupa en 5 rangos, siendo 1 el valor de la susceptibilidad Morfodinámica muy baja, y siendo 5 el valor de la susceptibilidad muy alta.

6.3.2.4 Susceptibilidad Geomorfológica Total

Para determinar la susceptibilidad geomorfológica total se realiza el cruce de información temática, donde cada una de las variables que intervienen (Morfogénesis, Morfometría y Morfodinámica) son tenidas en cuenta, el proceso de superposición de mapas se realiza mediante el SIG ArcGIS.

Figura 22: Variables y Mapa de susceptibilidad Geomorfológica total.
 Mapa Morfodinámico 30% Mapa Morfofénico 30% Mapa Morfométrico 40%



Mapa Susceptibilidad Geomorfológica
 Fuente: El estudio.

6.3.3 Suelos

La información utilizada es tomada de estudios generales de suelos elaborados por el IGAC debido a la escasa disponibilidad de este tipo de estudios detallados, donde intervienen 5 parámetros para llegar a la susceptibilidad final por suelos, igual que las coberturas de la tierra son la entrada y el regulador inicial de la precipitación pluvial en el ecosistema. El movimiento del agua (escurrimiento o flujo superficial, infiltración, capilaridad, percolación, entre otros), tiende a modificar el estado de la materia y la energía del suelo, afectando sus propiedades y esfuerzos, pero sin alterar su naturaleza.

La determinación de las variables físicas de suelos, muestran el comportamiento a lo largo del perfil de éstos; donde, cada uno de ellos presenta diferentes características y cualidades que lo hacen complejo, en la determinación del comportamiento de la estabilidad. IDEAM, 2009.³⁴

Los parámetros de clasificación de suelos propuesto por el documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza relativa por movimientos en masa escala 1:100.000 son textura, taxonomía, drenaje natural,

³⁴ Documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza relativa por movimientos en masa escala 1:100.000. Servicio Geológico Colombiano (SGC). Vol.2.Bogota. Agosto 2013.

profundidad de suelo y tipo de arcilla, parámetros con los cuales se busca analizar el comportamiento de los suelos ante la ocurrencia de movimientos en masa.

Figura 23: diagrama de atributos del variable suelo con sus porcentajes.



Fuente: Documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza relativa por movimientos en masa escala 1:100.000.

6.3.3.1 Textura

La textura es un parámetro que se encuentra directamente relacionado con la cantidad de humedad de los suelos, permeabilidad, nutrición mineral, capacidad de las raíces de avanzar entre otros, donde comprende la cantidad relativa de los diferentes tipos de granulometría (Arenas, limos, arcillas).

En suelos arcillosos el movimiento vertical del agua es menor por cuanto los poros son más pequeños de esta manera la conductividad hidráulica también es menor, haciendo de los suelos menos permeables, la consecuencia es que aumentan el contenido de agua, se saturan y finalmente son más susceptibles a movimientos en masa. Contrario a los suelos arcillosos, los de textura gruesa (arena, grava) serán menos susceptibles por cuanto el agua se desplaza a mayor velocidad en el perfil del suelo (mayor velocidad de infiltración), caracterizando los suelos más permeables y con mayor conductividad hidráulica.³⁵

Tabla 29: Clasificación textural de suelos.

Clase textural	Calificación
Gr,A,FAGrP,Agr,AFP	1
AF,FAGr,FArAGr,FArGr,FGr,FGrP	2
ArA,ArGr,FA,FArLGr,ArLGr, FLGr, rAGr	3
F,F-Org.Far, FArA, FArL,FL,FLOrg	4
Ar,ArL	5

Fuente: Documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza relativa por movimientos en masa escala 1:100.000.

A: Arena; L: Limo; Ar: Arcilla; F: Franco; Gr: Grava; P: Piedra; Org: Orgánico.

³⁵ Documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza relativa por movimientos en masa escala 1:100.000. Servicio Geológico Colombiano (SGC). Vol.2.Bogota. Agosto 2013.

6.3.3.2 Drenaje natural

El drenaje natural es uno de los factores que contribuye a la estabilización de masas de tierra, por tanto un suelo con buen drenaje es menos susceptible a la ocurrencia de movimientos en masa, ya que controla el flujo de agua subterránea y disipa las presiones de poros aumentando resistencia de los suelos (Fajardo Puerta, 2005)³⁶. Esta variable se determina de los perfiles modales de las diferentes unidades de suelos, y se clasifican mediante la Tabla 30, propuesta por el IDEAM.

Tabla 30: Calificación del drenaje natural del suelo.

Clase	Características	Calificación
Excesivo	No retienen agua después de las lluvias	1
Moderado Excesivo	No retienen agua para las plantas después de las lluvias. El nivel freático nunca sube por encima de 2 metros.	
Bueno	Suelos óptimos para el abastecimiento de agua y aire a los cultivos. Nivel freático siempre por debajo de 80 cm.	2
Moderado Excesivo	El agua es removida lentamente hasta el nivel freático (40-80cm. En Época de lluvias). Requiere drenaje para cultivos permanentes.	3
Imperfecto	Suelos con capas impermeables que impiden percolación en época de lluvias.	4
Pobre	Agua removida lentamente y los perfiles están mojados en la época de lluvias. Se requiere drenaje.	
Muy pobre	Agua freática cerca o sobre la superficie. Encharcamientos permanentes. Se requiere drenaje.	5
Pantanosos	Agua freática sobre la superficie. Encharcamientos permanentes. Se requiere drenaje.	

Fuente: Documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza relativa por movimientos en masa escala 1:100.000.

6.3.3.3 Taxonomía

La taxonomía de suelos, corresponde a un sistema básico de clasificación para hacer e interpretar los levantamientos de suelos. Actualmente, la descripción Taxonómica de suelos, se basa en la clasificación y estructuración que hace la S.S.S. (Soil Survey Staff 1.998). La clasificación taxonómica, permite realizar generalizaciones inductivas acerca de las características de las clases de suelos y establecer interrelaciones entre ellos. IDEAM, 2009.³⁷

En la tabla 30 se presenta la clasificación de susceptibilidad taxonómica de los diferentes tipos de suelos donde la susceptibilidad de ocurrencia de movimientos en

^{36, 37} Documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza relativa por movimientos en masa escala 1:100.000. Servicio Geológico Colombiano (SGC). Vol.2.Bogota. Agosto 2013.

masa más alta corresponde a los suelos más jóvenes, y la susceptibilidad menor corresponde a suelos más evolucionados.

Tabla 31: Calificación de la taxonomía de suelos según orden.

Orden de suelos	Calificación
Oxisol, Ultisol	1
Afisol	2
Mollisol, Andisol, Espodosol	3
Vertisol, Aridisol	4
Inceptisol, Entisol, Histosol	5

Fuente: Documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza relativa por movimientos en masa escala 1:100.000.

6.3.3.4 Profundidad

Aquí la profundidad de los suelos está definida por el espesor de los horizontes establecidos por los estudios generales 1:100.000 y en todo caso se puede definir hasta donde se encuentra el contacto con el material parental o litológico y puede tenerse también como referencia la profundidad efectiva (hasta donde pueden penetrar las raíces de las plantas).³⁸

Tabla 32: Calificación de profundidad total.

Profundidad (cm)	Categoría	Calificación
0 - 25	Muy baja o muy superficial	1
25 - 50	baja o superficial	2
50 - 100	media o moderadamente profunda	3
100 - 150	alta o moderadamente profunda	4
mayor a 150	muy alta o muy profunda	5

Fuente: IDEAM. 2009

6.3.3.5 Tipo de arcilla

El tipo de suelo o roca determina el tipo de movimiento en masa y la probabilidad de ocurrencia del mismo, y las arcillas tienen diferente comportamiento dependiendo de sus características físicas y químicas.

En general, el tipo de mineral de arcilla presente y el porcentaje, en proporción con el total de minerales afecta en forma considerable el comportamiento del suelo. Las otras propiedades de las arcillas, como son sus características de expansión y contracción siguen un mismo patrón ante las propiedades de plasticidad, entre más plástico el material mayor su potencial de expansión y menor su resistencia al esfuerzo cortante. De acuerdo con el tipo de arcilla en la tabla 33 se especifican los tipos de arcillas y su calificación.

³⁸ Documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza relativa por movimientos en masa escala 1:100.000. Servicio Geológico Colombiano (SGC). Vol.2. Bogotá. Agosto 2013.

Tabla 33: Calificación de tipo de arcillas.

Grupos de tipo de arcilla	Calificación
Caolinita Caolinita, Biotita	1
Halloisita	2
Caolinita, Montmorillonita, Vermiculita Caolinita, Muscovita, Montmorillonita	3
Montmorillonita, Clorita, Caolinita Montmorillonita, Vermiculita, Caolinita	4
Alofana, Gipsita Montmorillonita, Vermiculita Montmorillonita, Illita, Vermiculita, Muscovita Muscovita, Montmorillonita, Vermiculita Talco, Muscovita, Vermiculita, Montmorillonita	5

Fuente: Documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza relativa por movimientos en masa escala 1:100.000.

6.3.3.6 Susceptibilidad de suelos total

Definidas las variables y analizado el papel que cada una cumple en forma natural en torno a la susceptibilidad, se definió una función para obtener la calificación total de las unidades de suelos. La función es una suma de las calificaciones de las variables (calificadas de 1 a 5) multiplicadas por el peso que se dio a cada una, así:³⁹

$$C = (0.3 \text{Textura}) + (0.15 * \text{Taxonomia}) + (0.2 * \text{Profundidad}) + (0.2 * \text{tipo Arcilla}) + (0.15 * \text{Drenaje})$$

Se realizó el cálculo de clasificación de susceptibilidad total de suelos en un rango de 1 a 5, siendo 5 el valor de susceptibilidad muy alta y 1 el valor de susceptibilidad muy baja, en la tabla 34 se especifican las unidades clasificadas y su valor de calificación.

Tabla 34: Calificación de susceptibilidad de suelos.

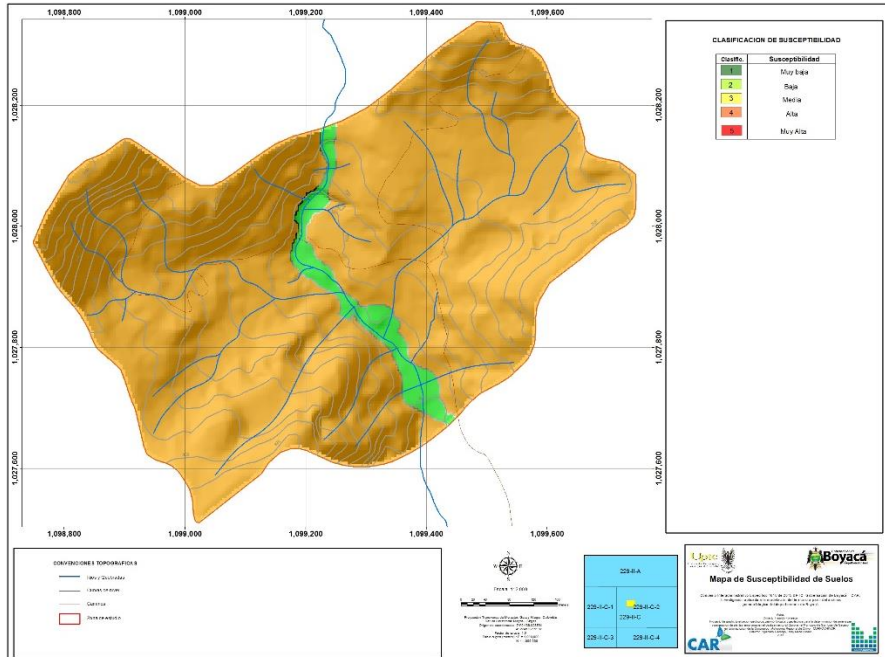
UCSuelo	SUBGRUPO	PROF.	TEXTURA	DRENAJE	AREA_HA	1	2	3	4	5	6
MVEg	Lithic Udorthents, Oxic Dystrudepts, Afloramientos Rocosos	Superficial y moderadamente profundo	Media y fina	Bueno	23,1	4,0	5,0	2,0	3,4	2,0	3,3
MVEg	Lithic Udorthents, Oxic Dystrudepts, Afloramientos Rocosos	Superficial y moderadamente profundo	Media y fina	Bueno	20,0	4,0	5,0	2,0	3,4	2,0	3,3
CA	Cuerpos de Agua	Cuerpos de Agua	Cuerpos de Agua	Cuerpos de Agua	1,9	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0

Fuente: El estudio.

³⁹ Documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza relativa por movimientos en masa escala 1:100.000. Servicio Geológico Colombiano (SGC). Vol.2.Bogota. Agosto 2013.

1: Calificación textura; 2: Calificación taxonómica; 3: Calificación Drenaje; 4: Calificación profundidad; 5: Calificación arcilla; 6: Calificación susceptibilidad Suelos.

Figura 24: Mapa de susceptibilidad de suelos.



Fuente: El estudio.

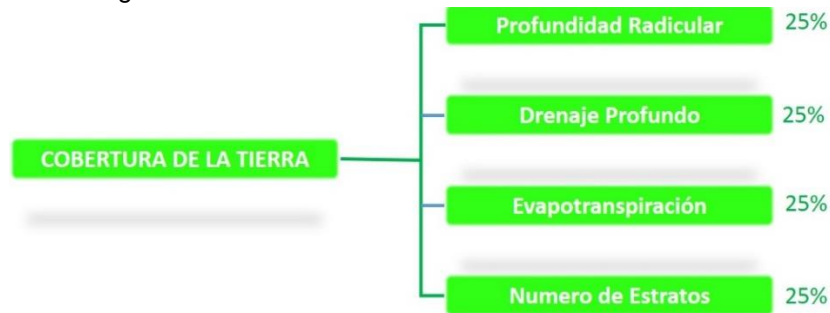
6.3.4 Cobertura de la tierra

Para la descripción de las unidades de cobertura vegetal se utilizó la metodología Corine Land Cover (CLC), el cual definió una metodología específica para realizar el inventario de la cobertura de la tierra. La base de datos de Corine Land Cover Colombia (CLC) permite describir, caracterizar, clasificar y comparar las características de la cobertura de la tierra, interpretadas a partir de la utilización de imágenes de satélite de resolución media (Landsat), para la construcción de mapas de cobertura a diferentes escalas.⁴⁰

Para la clasificación de las coberturas para realizar el análisis de susceptibilidad, se tienen en cuenta 4 aspectos que clasifican el parámetro, profundidad radicular, drenaje profundo, evapotranspiración y número de estratos, los cuales tienen el mismo porcentaje de incidencia dentro del parámetro cobertura (Ver Figura 25).

⁴⁰ Citado el 03/03/2016 en: <http://www.ideam.gov.co/web/ecosistemas/metodologia-corine-land-cover>

Figura 25: Atributos de la variable cobertura de la tierra.



Fuente: Documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza relativa por movimientos en masa escala 1:100.000.

6.3.4.1 Profundidad radicular

La profundidad de las raíces cumplen un trabajo de sostenimiento de las unidades de suelo, por tanto, funcionan como un sistema de apoyo y aumento de resistencia al cortante, y la profundidad determina el grado de apoyo que este atributo aporta al suelo, donde a mayor profundidad el aporte de sostenimiento es mayor, dependiendo del tipo de cobertura (Bosques, Pastos, Arbustales) se define la profundidad media, donde los bosques pueden tener valores en susceptibilidad entre 1 y 2, mientras que los pastos limpios al tener menor profundidad radicular pueden tener valores susceptibilidad de 2 a 4 dependiendo del análisis que se realice.⁴¹ La clasificación y calificación de la profundidad radicular se especifica en la tabla 36.

Tabla 35: Categorización y calificación de la profundidad efectiva.

Profundidad Efectiva	Rango (cm)	Susceptibilidad
Muy superficial	menos de 25 cm	5
Superficial	25-50	4
Moderadamente profundo	5-100	3
Profundo	110-150	2
Muy profundo	mayor de 150	1

Fuente. Manual de suelos de la subdirección de Agrología – IGAC. (USDA-2007).

6.3.4.2 Drenaje profundo

El atributo hace referencia a la facilidad que tiene del flujo de agua de penetrar en los drenajes profundos, lo cual varía dependiendo del tipo de cobertura vegetal, y la categorización y clasificación depende del tipo de cobertura, donde la calificación de susceptibilidad varía entre pastos, Arbustales, bosques y demás coberturas.

⁴¹ Documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza relativa por movimientos en masa escala 1:100.000. Servicio Geológico Colombiano (SGC). Vol.2.Bogota. Agosto 2013.

Tabla 36: Categorización y clasificación del atributo drenaje profundo.

Drenaje Profundo	Rango (%)	Susceptibilidad	Categorización	Coberturas Asociadas
Muy superficial	0-10	5	Muy alta	Pastos
Superficial	10,1-20	4	Alta	Áreas Agrícolas
Moderadamente profundo	20,1-30	3	Media	Arbustales abiertos
Profundo	30,1-40	2	Baja	Arbustales densos
Muy profundo	Mayor de 40	1	Muy baja	Zonas boscosas

Fuente: Documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza relativa por movimientos en masa escala 1:100.000.

6.3.4.3 Numero de estratos

En esta variable se desea utilizar el número de estratos de una cobertura vegetal para darse una idea por ejemplo del tipo de bosque, de su densidad, estructura, el resultado es que tan buena protección hace en algunos aspectos. Ejemplo para bosques bien evolucionados es posible encontrar hasta 4 estratos, de esta manera se podría calificar entre 1 y 2; para un cultivo limpio que solo tiene un estrato, su susceptibilidad sería de 4 – 5.⁴²

Tabla 37: Categorización y calificación del atributo número de estratos.

Estratos de la cobertura	Rango (N° de estratos verticales)	Susceptibilidad
No presenta	0	5
Baja densidad estructural	1	4
Media densidad estructural	2	3
Moderadamente alta	3	2
Alta densidad estructural	4	1

Fuente: Documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza relativa por movimientos en masa escala 1:100.000.

6.3.4.4 Evapotranspiración

Para la determinación del atributo evapotranspiración se relaciona las coberturas con el parámetro Kc (Coeficiente de cultivo) y las fuentes para obtener datos de referencia son los estudios de la FAO y otros en la región andina.

$$Kc = \frac{Etc}{Eto}$$

Etc: Evapotranspiración Estándar.

Eto: Evapotranspiración de referencia

La FAO cuenta con tablas en donde se describen valores de referencia de coeficiente de cultivo para las diferentes coberturas (Ver tabla 38), con las cuales se determinó el parámetro en el presente estudio, en la tabla 39 se describen estos valores de clasificación y calificación Kc para determinación del parámetro.

⁴² Documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza relativa por movimientos en masa escala 1:100.000. Servicio Geológico Colombiano (SGC). Vol.2.Bogota. Agosto 2013.

Tabla 38: Coeficientes de cultivos adaptados de FAO

Vegetación	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Árboles Frutales	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
Bosque caducifolio	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
Bosque Mixto	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
Caña de Azúcar	0,6	0,8	0,9	0,9	1	1	1	1	1,05	1,15	1,15	0,85
Cultivos de Café	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Cultivos de Piña	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Granos Básicos	1	1	1	1	0,35	1	1,05	1,05	0,6	1	1	1
Hortalizas	1	1	1	1	0,7	1	1,05	1,05	0,95	1	1	1
Pastos Naturales	1	1	1	1	1	1	1	1	1,1	1,1	1,1	1
Vegetación Acuática	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05

Fuente: Servicio Hidrológico del Salvador.

Tabla 39: Categorización y calificación del atributo Evapotranspiración.

Evapotranspiración	Rango de Kc	Susceptibilidad
Muy baja	0-0,5	5
Baja	0,51-0,8	4
Media	0,81-1	3
Alta	1,1-1,5	2
Muy Alta	mayor de 1,5	1

Fuente: Documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza relativa por movimientos en masa escala 1:100.000.

6.3.4.4 Calculo total del atributo cobertura de la tierra

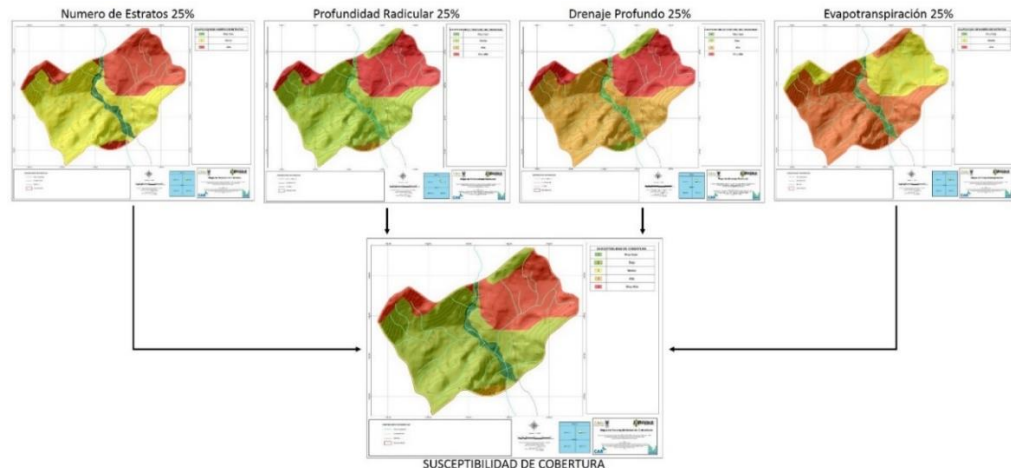
Para la determinación final del atributo cobertura de la tierra es necesario continuar con el proceso analítico jerárquico AHP, donde las variables que intervienen en el atributo ya fueron halladas, y se tienen en cuenta los porcentajes de incidencia de cada uno de los atributos, así, por medio del SIG ArcGIS (10.1) mediante la opción Map Algebra/Raster Calculator, se suman los mapas temáticos generados (Ver Figura 30), la calificación al igual que los demás atributos que intervienen en la zonificación de susceptibilidad por movimientos en masa tienen un rango de calificación de 1 a 5, siendo 1 el menor valor correspondiente a susceptibilidad muy baja y 5 el valor de susceptibilidad muy alta, en la tabla 40 se especifican los rangos de calificación dado para cada una de las variables de las diferentes coberturas encontradas en el área de estudio.

Tabla 40: Calificación de susceptibilidad de cobertura de la tierra.

NIVEL_1	NIVEL_2	NIVEL_3	LEYENDA	ProfRa	DrenPr	NumE	Evap
Bosques y areas Seminaturale	Áreas con vegetación herbácea y arbustiva	Vegetación secundaria o en transición		3,0	3,0	5,0	4,0
Territorios Agrícolas	Pastos	Pastos limpios	Pastos limpios	5,0	5,0	5,0	3,0
Bosques y areas Seminaturale	Bosques	Bosque Denso	Bosque denso alto de tierra firme	3,0	4,0	3,0	4,0
Territorios Agrícolas	áreas Agrícolas Heterogéneas	Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	4,0	3,0	5,0	4,0
Bosques y areas Seminaturale	Bosques	Bosque Denso	Bosque denso alto de tierra firme	3,0	4,0	3,0	4,0
Superficies de Agua	Rio	Rio	Rio	1,0	1,0	1,0	1,0

Fuente: El estudio.

Figura 26: Variables y Mapa de susceptibilidad cobertura de la tierra total.



Fuente: El estudio.

6.4 ZONIFICACION DE LA SUSCEPTIBILIDAD

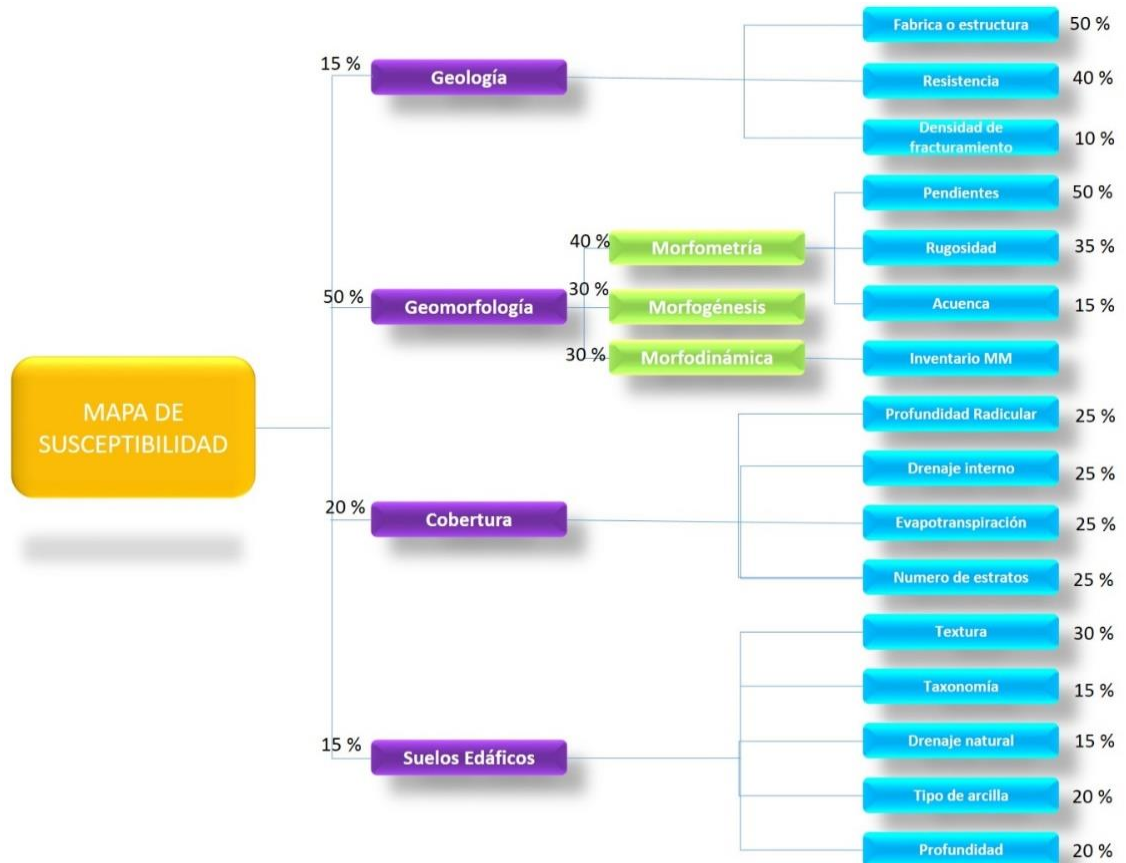
El análisis de susceptibilidad intenta hacer énfasis en la distribución de movimientos en masa en ladera y procesos de vertientes generadores de desequilibrio Morfogenético, tomando en consideración el enfoque geomorfológico, cuyo objetivo es determinar la variación espacial de la inestabilidad de las laderas y su representación cartográfica mediante el mapa de susceptibilidad geomorfológica. La evaluación se fundamenta en el método heurístico, el cual se basa en el análisis de los procesos geomorfológicos que actúan sobre el terreno, el mapeo de los procesos, los factores ambientales que afectan directamente e indirectamente la inestabilidad de las laderas, estimación de las relaciones entre los factores y los fenómenos de inestabilidad y la clasificación del terreno en dominios de diferente grados de susceptibilidad de acuerdo con las relaciones detectadas (Van Westen, 2003), en combinación con el enfoque analítico (Hansen, 1984), en el que se

elabora una serie de mapas temáticos, los cuales se evalúan separadamente y después se integran para alcanzar una evaluación general del área de estudio.⁴³

6.4.1 Proceso Analítico Jerárquico (AHP)

Es un método desarrollado por Thomas L. Saaty en 1980, como una ayuda a la toma de decisiones, consiste en dividir una situación compleja y poco estructurada en sus partes que la componen; arreglando estas partes, o variables, en un orden jerárquico; asignando valores numéricos a juicios subjetivos sobre la importancia relativa de cada variable; y sintetizando los juicios para determinar cuál variable tiene la mayor prioridad y deben actuar bajo la influencia del resultado de la situación.⁴⁴

Figura 27: Diagrama de susceptibilidad total con porcentajes.



Fuente: Documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza relativa por movimientos en masa escala 1:100.000.

⁴³ Documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza relativa por movimientos en masa escala 1:100.000. Servicio Geológico Colombiano (SGC). Vol.2.Bogota. Agosto 2013.

⁴⁴ Documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza relativa por movimientos en masa escala 1:100.000. Servicio Geológico Colombiano (SGC). Vol.2.Bogota. Agosto 2013.

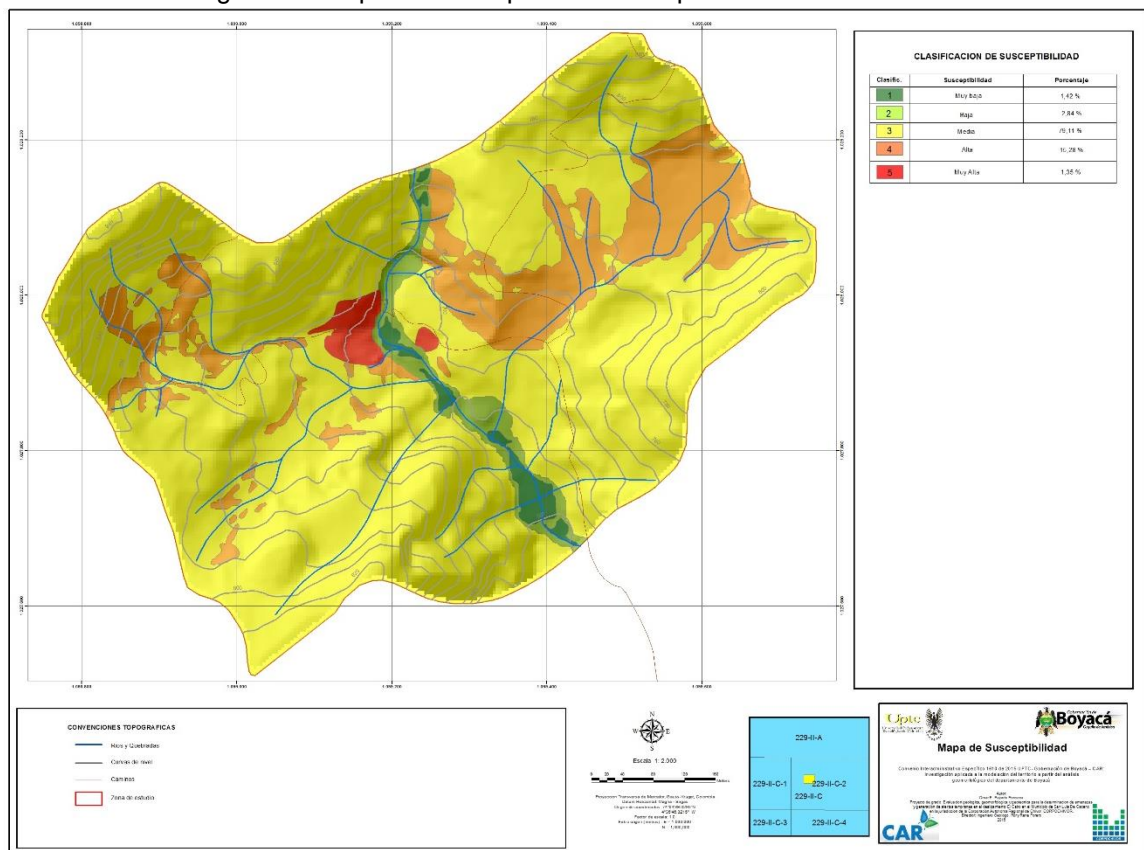
Teniendo en cuenta los anteriores porcentajes de los parámetros involucrados, y realizados todos los análisis finalmente es posible generar el mapa de susceptibilidad por movimientos en masa para el área de estudio mediante el AHP, Proceso que se lleva a cabo mediante SIG (Ver Anexo A-6).

Tabla 41: porcentajes de susceptibilidad del área de estudio.

SUSCEPTIBILIDAD	AREA	PORCENTAJE
1	6625,4	1,53%
2	13473,23	3,10%
3	348352,34	80,26%
4	65177,5	15,02%
TOTAL	433628,5	100%

Fuente: El estudio.

Figura 28: Mapa de Susceptibilidad total por movimientos en masa.



Fuente: El estudio.

7. ZONIFICACION DE AMENAZAS

Para determinar la susceptibilidad a la ocurrencia de movimientos en masa en el área de estudio se llevó a cabo un proceso de generación de mapas temáticos descriptivos mediante etapas como recopilación, ajuste, interpretación y procesamiento de la información, logrando así evaluar los factores geológicos, geomorfológicos, suelos y cobertura. Donde se desarrollaron etapas de interpretación, captura de datos en campo, construcción de modelos digitales de elevación correspondientes a la escala de trabajo manejada y modelación de la información. Es así como posteriormente se realiza la evaluación de factores extrínsecos al terreno denominados detonantes los cuales desencadenan una amenaza, estos factores corresponden a sismos y lluvias, factores que desestabilizan o aumentan la probabilidad de ocurrencia de algún tipo de movimiento en masa (deslizamientos, caídas de rocas, flujos de lodos o desprendimientos).

7.1 METODOLOGIA UTILIZADA

Siguiendo la metodología utilizada para el análisis y generación de mapas temáticos correspondientes a la susceptibilidad, para la determinación de amenazas, se trabaja con la metodología propuesta en el Documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza relativa por movimientos en masa escala 1:100.000 propuesta por el Servicio Geológico Colombiano, realizando lo descrito mediante el método heurístico, donde se especifican las variables que intervienen como detonantes y la forma de relacionar estas variables con la susceptibilidad y así llegar a la zonificación de amenaza relativa por movimientos en masa, como se describió anteriormente esta información tuvo un proceso de ajuste a escala detallada, donde los insumos generales y temáticos (Modelos de elevación, cartografía geológica y geomorfológica, suelos y cobertura) se generaron a una escala de mayor detalle.

El detonante climático se define mediante una fórmula la cual da valores a los píxeles en el análisis de susceptibilidad correspondientes al área de estudio, fórmula descrita de la siguiente manera: ⁴⁵

$$Ac = S + FC$$

Donde:

Ac: Amenaza por factores climáticos

⁴⁵ Documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza relativa por movimientos en masa escala 1:100.000. Servicio Geológico Colombiano (SGC). Vol.2. Bogotá. Agosto 2013.

S: Susceptibilidad del terreno a la ocurrencia de movimientos en masa
Fc: Factor climático

Posteriormente se realiza el análisis del detonante sísmico el cual también da valores correspondientes al factor sismo a los pixeles generados en la zonificación de susceptibilidad, este proceso se describe mediante formula de la siguiente manera:⁴⁶

$$As = S + Fs$$

Donde:

As: Amenaza por detonante sismo
S: Susceptibilidad del terreno a la ocurrencia de movimientos en masa
Fs: Factor sismo

Finalmente se integran estos dos detonantes llegando así a la amenaza total por movimientos en masa:⁴⁷

$$At = Ac + As$$

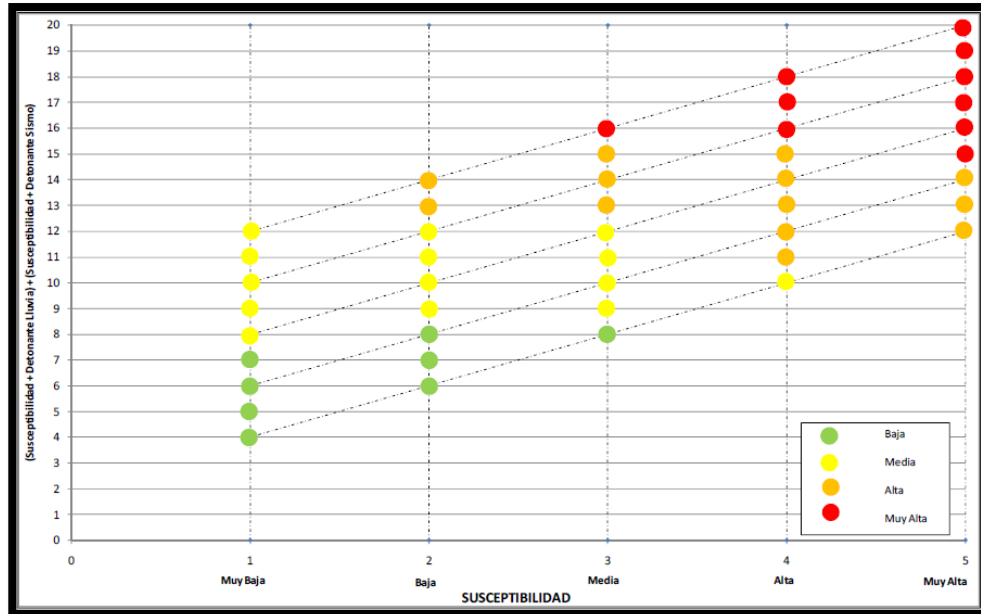
Donde:

At: Amenaza Total
Ac: Amenaza por detonante clima
As: Amenaza por detonante sismo

Los valores obtenidos de amenaza por detonante clima o sismo oscilan entre 2 y 10 debido a que tanto la calificación de los detonantes como la de la susceptibilidad varían entre 1 y 5.

^{46, 47} Documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza relativa por movimientos en masa escala 1:100.000. Servicio Geológico Colombiano (SGC). Vol.2.Bogota. Agosto 2013.

Figura 29: Clasificación de mapa de zonificación de amenaza relativa por movimientos en masa.



Fuente: Documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza relativa por movimientos en masa escala 1:100.000.

7.2 EVALUACION DE DETONANTES

Mediante la metodología descrita, para realizar la evaluación de detonantes sísmicos y climáticos se utilizan las coberturas generadas por el Servicio Geológico Colombiano, pero por el grado de detalle necesario en este estudio, los datos hidrometeorológicos a utilizar son correspondientes a los estudios realizados en la zona, descritos en el Capítulo 3.

7.2.1 Condiciones climáticas

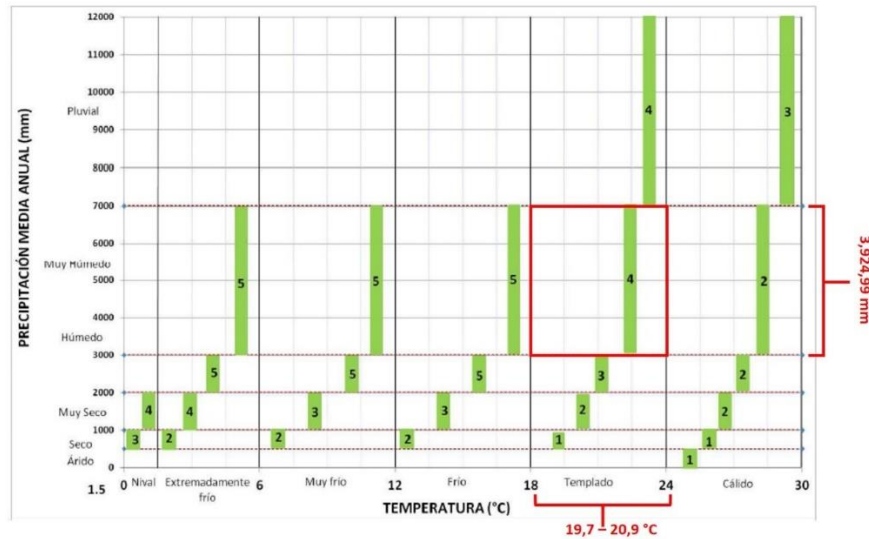
En el documento metodológico utilizado se describen 3 aspectos climáticos relevantes:

- La precipitación media anual y la temperatura media anual influyen en el contenido de humedad del suelo, es decir, en zonas en donde la precipitación media anual sea alta y la temperatura media anual sea baja, la humedad del suelo será mayor, lo cual contribuiría en mayor medida a la generación de movimientos en masa.
- A mayor valor de lluvia máxima diaria, mayor saturación y por ende, mayor probabilidad de que se generen procesos de inestabilidad en las laderas.
- A mayor contenido de humedad antecedente en el suelo y mayor valor de lluvia máxima diaria, se incrementa la probabilidad de generarse movimientos en masa.

7.2.1.1 Precipitación media anual y temperatura media anual

Este parámetro se determina mediante la relación de la temperatura media anual, y la precipitación media anual determinada en el capítulo 3 mediante el método de las isoyetas. Donde la precipitación media multianual corresponde a 3.924,99 milímetros y la temperatura media se encuentra en un rango de 19,7°C a 20,9°C, la clasificación de precipitación media anual corresponde a 4, en la figura 36 se especifican los rangos de calificación de la zonificación climática de este parámetro.

Figura 30: Calificación de la zonificación climática con base en su contribución a los movimientos en masa.



Fuente: Documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza relativa por movimientos en masa escala 1:100.000.

7.2.1.2 Precipitación máxima diaria

Mediante el análisis de la información correspondiente a las estaciones meteorológicas descritas, se determinó una precipitación máxima diaria mediante la interpolación de los valores de precipitación máxima 24 horas a partir de la distribución de Gumbel para un periodo de retorno de 25 años, cuyo resultado fue una calificación en el rango mayor a 220 mm cuya calificación según su contribución a movimientos en masa corresponde a 5.

7.3.1.3 Cobertura del detonante climático

Según la contribución de la precipitación máxima diaria y la zonificación climática es posible determinar la calificación del detonante por factores climáticos, dicha calificación se describe en la Tabla 42.

Tabla 42: Calificación del detonante por factores climáticos a partir de la zonificación climática nacional de las lluvias máximas diarias, de acuerdo con su contribución a los movimientos en masa.

Zonificación climática	Lluvias máximas diarias	Detonante por factores climáticos
1	1	1
1	2	1
1	3	2
1	4	3
1	5	3
2	1	2
2	2	2
2	3	3
2	4	3
2	5	4
3	1	1
3	2	1
3	3	2
3	4	3
3	5	4
4	1	5
4	2	4
4	3	4
4	4	5
4	5	5
5	1	5
5	2	4
5	3	5
5	4	5
5	5	5

Fuente: Documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza relativa por movimientos en masa escala 1:100.000

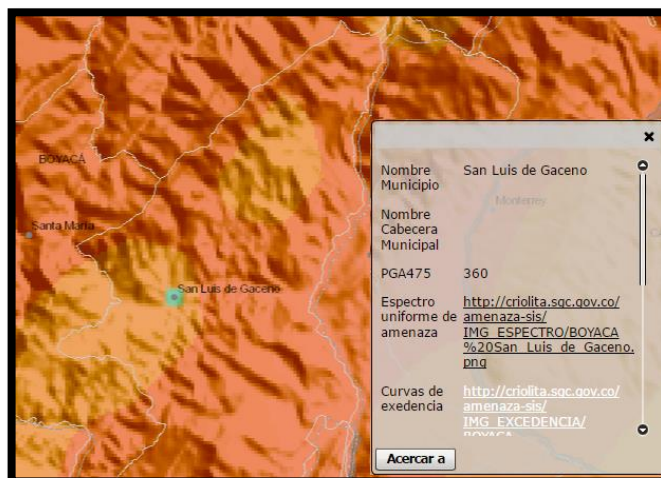
7.2.2 Detonante sísmico

Desde el punto de vista ingenieril, las laderas y taludes se encuentran en estados que van desde muy estables a marginalmente estables. Cuando un sismo ocurre induce un movimiento del terreno a menudo suficiente para causar fallas a taludes que están marginalmente a moderadamente estables antes del sismo. Los daños resultantes pueden ser desde insignificantes a catastróficos dependiendo de la geometría y de las características del material que las conforman.⁴⁸

Para determinar el grado de contribución del detonante sismo a la generación de movimientos en masa se toman los valores de PGA (cm/seg²) correspondientes a un periodo de retorno de 475 años, localmente el Municipio de San Luis de Gaceno mediante el mapa nacional de amenazas tiene un valor de PGA 475 correspondiente a 360, valor que se clasifica dentro de una calificación muy alta con el máximo valor (5).

⁴⁸ Documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza relativa por movimientos en masa escala 1:100.000. Servicio Geológico Colombiano (SGC). Vol.2.Bogota. Agosto 2013.

Figura 31: valor de Aceleración máxima horizontal a nivel de roca - PGA475 del Municipio de San Luis De Gaceno en el Mapa Nacional de Amenaza Sísmica.



Fuente: Servicio Geológico Colombiano, Geoportal.

Tabla 43: Calificación del detonante sismo según su contribución a movimientos en masa.

Valores de PGA475 (cm/seg ²)	Calificación
10-100	1
100-150	2
150-200	3
200-300	4
>300	5

Fuente: Documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza relativa por movimientos en masa escala 1:100.000.

7.3 CALIBRACION DEL MAPA DE AMENAZA RELATIVA TOTAL

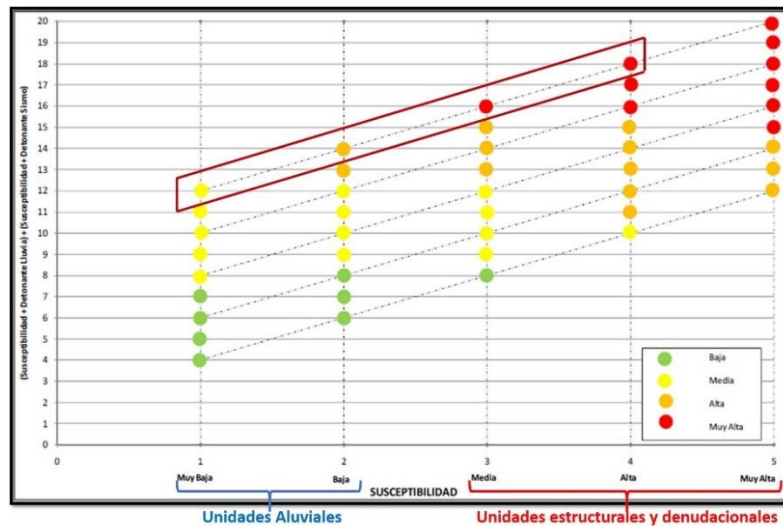
Con el fin de calibrar el resultado de la zonificación de amenaza total, se establece la coincidencia de las zonas correspondientes a las categorías de amenaza alta y muy alta, con las zonas inestables y potencialmente inestables agrupadas dentro de la variable morfodinámica⁴⁹, dentro de la clasificación de susceptibilidad se identificaron zonas inestables como los movimientos en masa descritos en el Capítulo 4 en el atributo morfodinámico, es así que la amenaza debe tener relación y coincidencia con lo expuesto en este atributo.

Localmente en el área de estudio, se determinó un 96% de amenaza muy alta a la ocurrencia de los diferentes tipos de fenómenos en masa, valor generado debido al grado de amenaza climática y sísmica, al encontrarse el sector dentro de la máxima

⁴⁹ Documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza relativa por movimientos en masa escala 1:100.000. Vol2. Servicio Geológico Colombiano. Bogotá D.C.2010.

calificación dada en ambos casos correspondiente a 5, es así que el valor mínimo posible de amenaza según la metodología descrita, corresponderá a una amenaza media a alta en las zonas donde la susceptibilidad es muy baja a baja, correspondiendo en este caso al curso que siguen las aguas de la Quebrada Agua Fría, mientras que las zonas clasificadas dentro de una susceptibilidad media, alta y muy alta se clasifican en rangos de amenaza muy alta (Ver Figura 32).

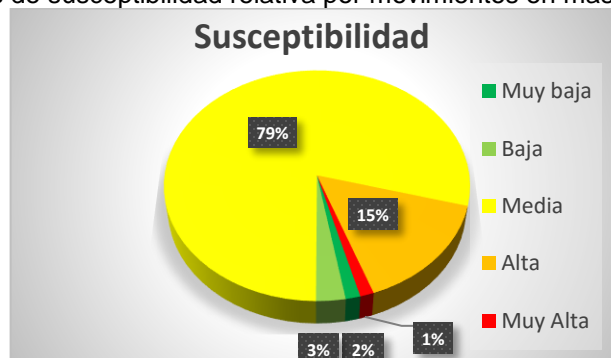
Figura 32: Rangos de amenaza debido a la calificación de detonantes en el área de estudio.



Fuente: El estudio.

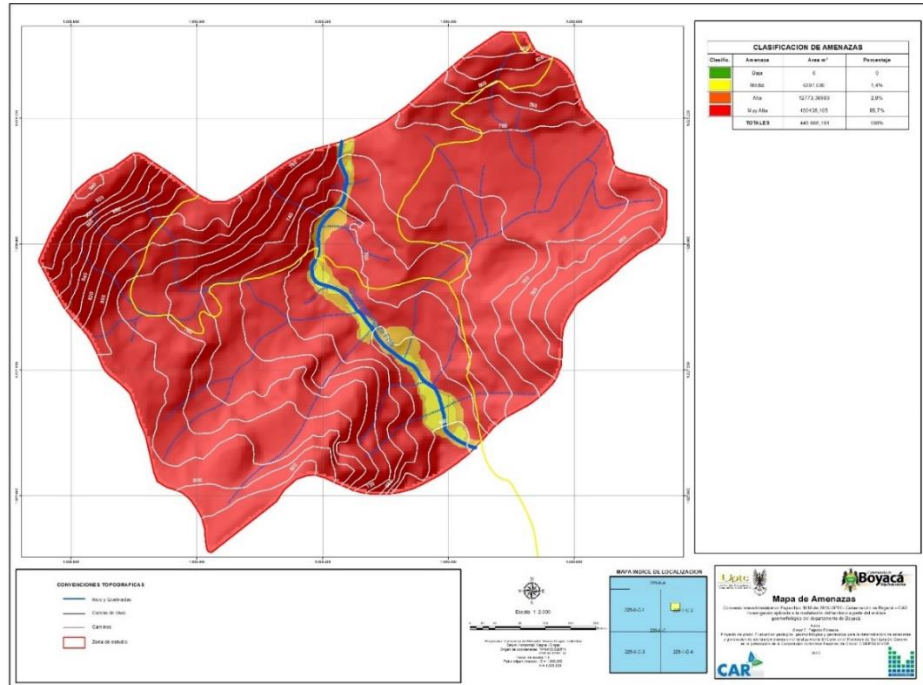
Para la calibración del mapa final de amenaza y su aceptación se definieron los porcentajes de las zonas de susceptibilidad y su correlación con el mapa final de amenazas.

Gráfico 4: Porcentajes de susceptibilidad relativa por movimientos en masa en el área de estudio.



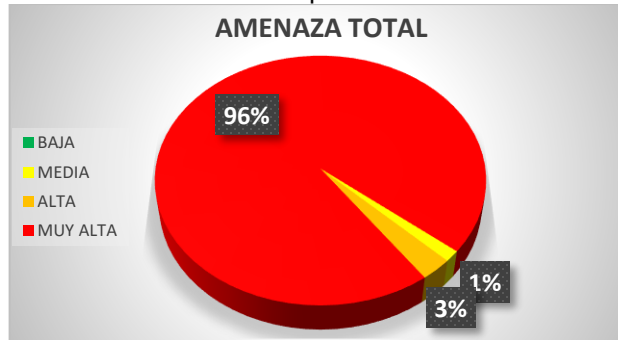
Fuente: El estudio.

Figura 33: Mapa de amenazas relativas por movimientos en masa en el área de estudio.



Fuente: El estudio.

Gráfico 5: Porcentajes de amenazas relativas por movimientos en masa en el área de estudio.



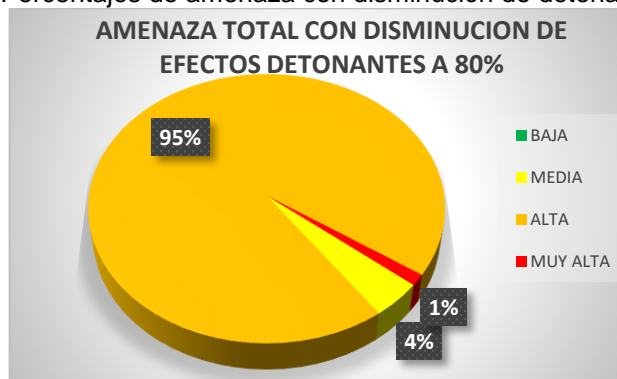
Fuente: El estudio.

En la figura 32 se diferencia el curso de la Quebrada Agua Fría correspondiendo a calificación de amenaza media a alta y muy alta las zonas de ladera correspondientes a la zona restante del área de estudio, donde los porcentajes difieren en gran medida de la distribución de la susceptibilidad, por tanto, realizando un ajuste del porcentaje de incidencia de los factores detonantes en el área de estudio, debido a la sobre estimación de los detonantes, los cuales no son totalmente representativos de las zonas de amenaza real evidenciadas en campo, donde es necesario priorizar las zonas donde actualmente existen movimientos en masa, y las laderas de mayor pendiente y materiales cuya susceptibilidad sea

mayor, es así que se analizaron diferentes porcentajes a la suma de los factores detonantes (sismo y clima) buscando un modelo con porcentajes de coincidencia mayor para el área.

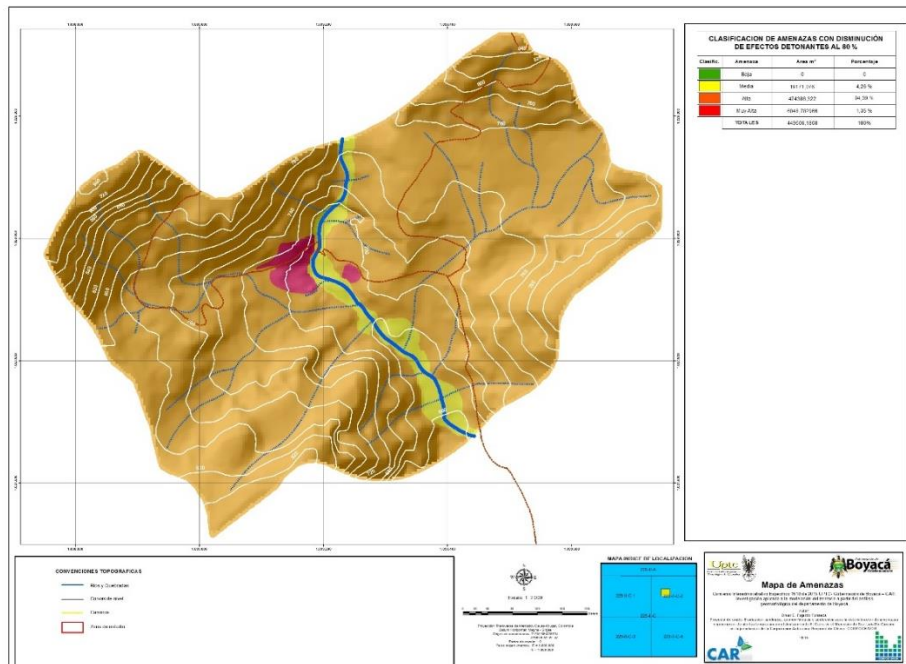
Los porcentajes analizados corresponden a una disminución del efecto de los detonantes en 20 %, 30% y 40%, de los cuales se generaron mapas temáticos de los mismos, buscando un ajuste porcentual y grafico de la amenaza relativa por movimientos en masa del área de estudio.

Grafico 6: Porcentajes de amenaza con disminución de detonantes a 80%.



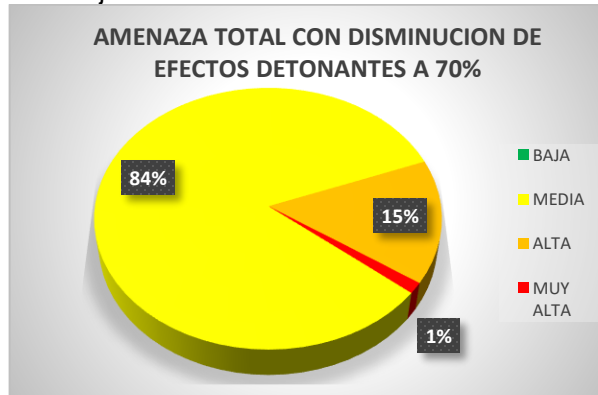
Fuente: El estudio.

Figura 34: Mapa de amenazas relativas por movimientos en masa en el área de estudio con disminución de efectos detonantes a 80%.



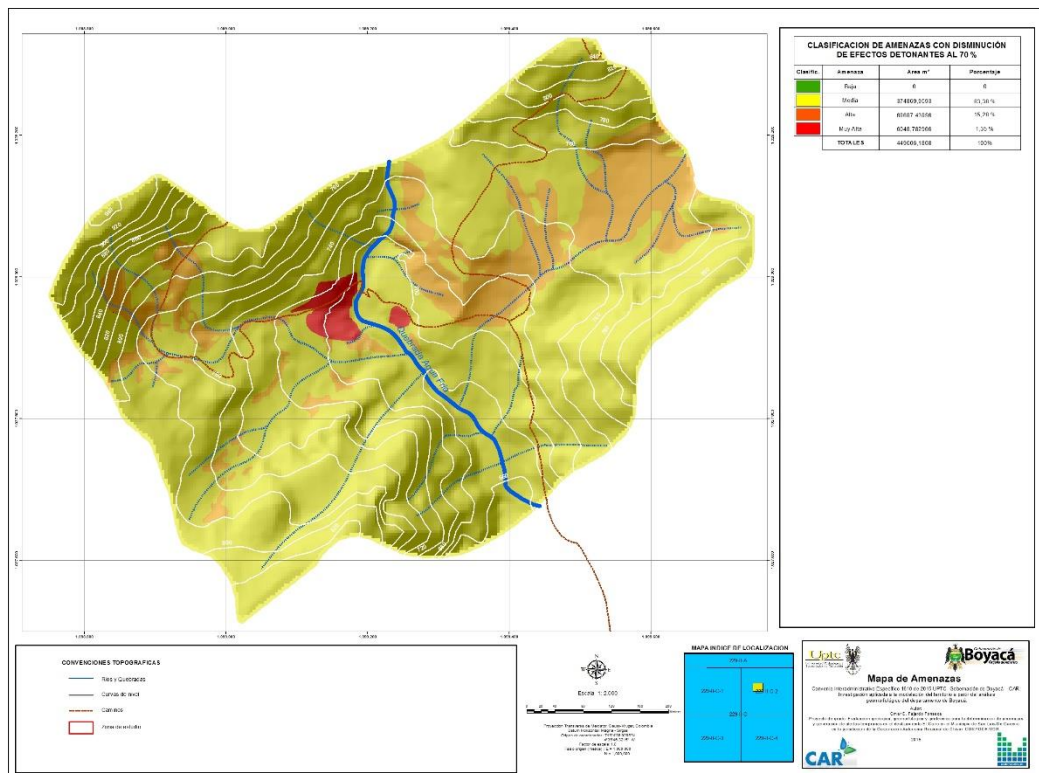
Fuente: El estudio.

Grafico 7: Porcentajes de amenaza con disminución de detonantes a 70%.



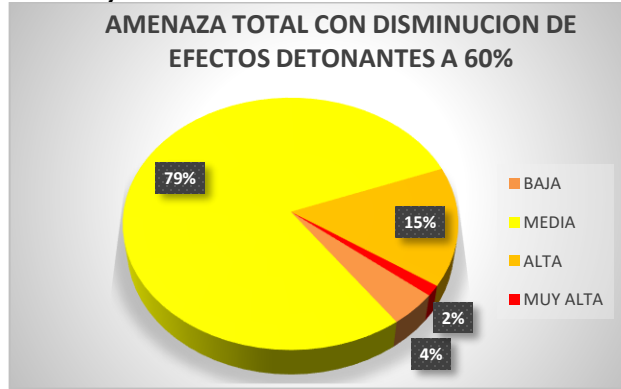
Fuente: El estudio.

Figura 35: Mapa de amenazas relativas por movimientos en masa en el área de estudio con disminución de efectos detonantes a 70%.



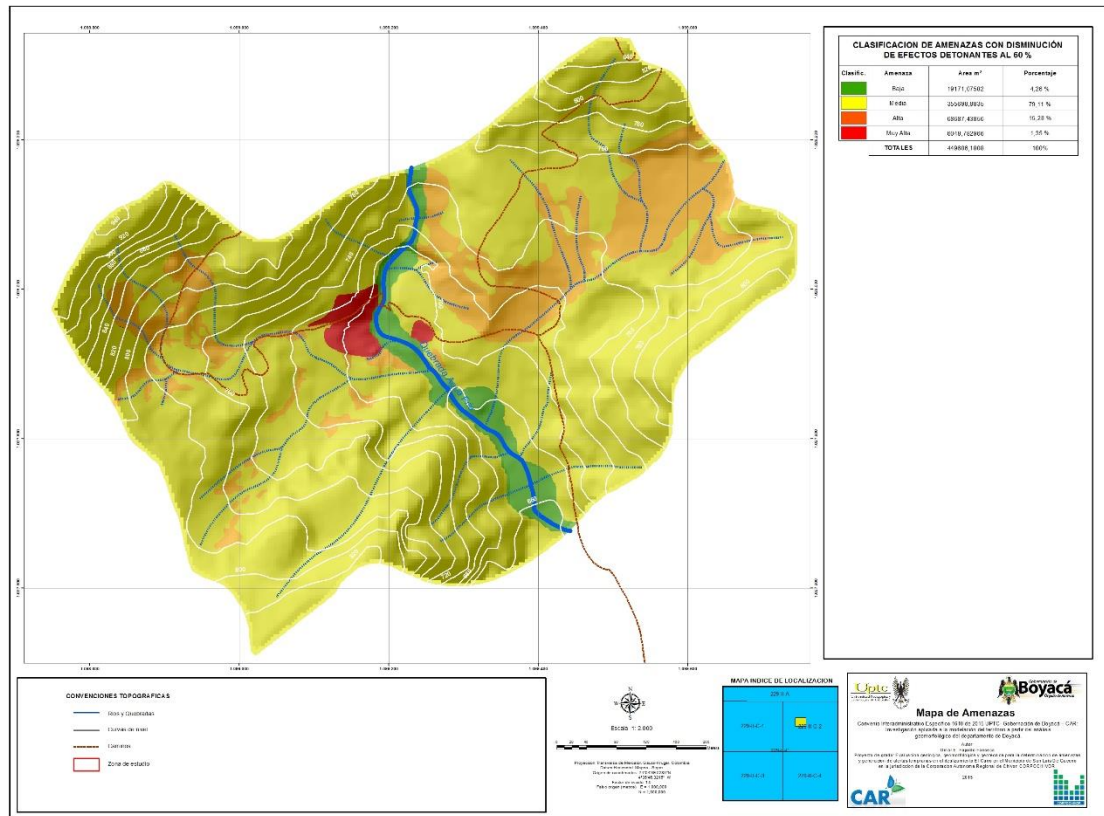
Fuente: El estudio.

Grafico 8: Porcentajes de amenaza con disminución de detonantes a 60%.



Fuente: El estudio.

Figura 36: Mapa de amenazas relativas por movimientos en masa en el área de estudio con disminución de efectos detonantes a 60%.



Fuente: El estudio.

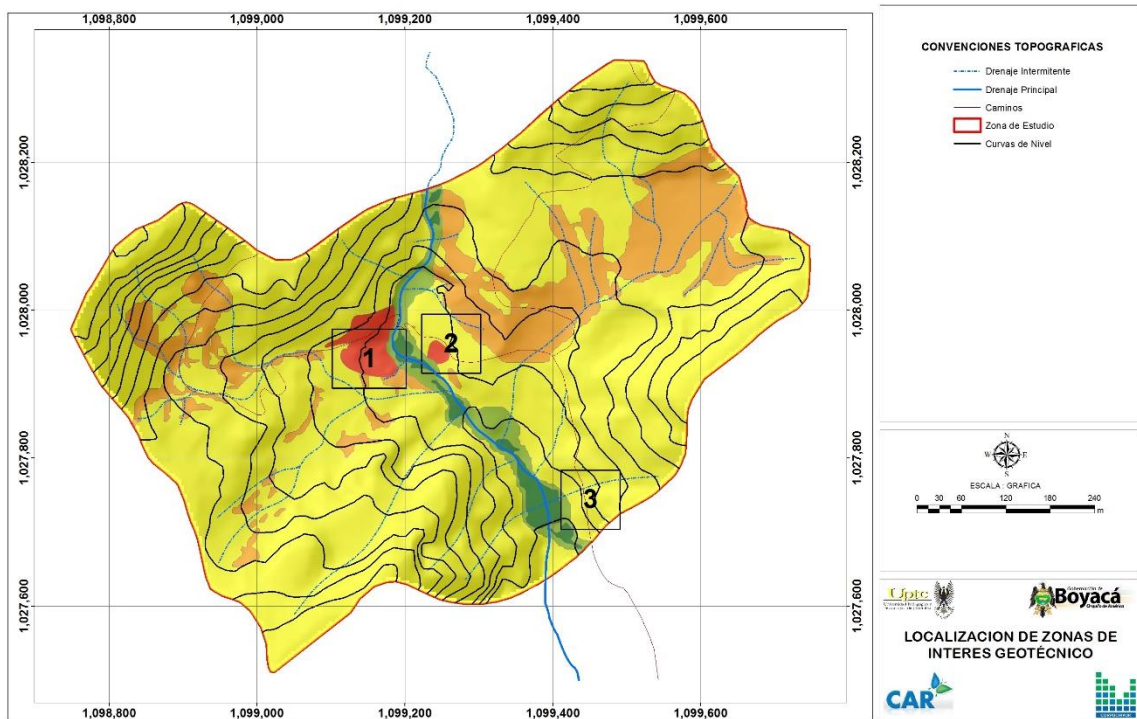
De acuerdo con los porcentajes tenidos en cuenta para la zonificación de amenaza relativa por movimientos en masa, el porcentaje de ajuste mayor con la susceptibilidad, las zonas priorizadas en el reconocimiento de campo y los

parámetros descritos en el atributo morfodinámico corresponde a la evaluación con la disminución de los efectos detonantes a un 60% donde se identifican los movimientos en masa descritos como zonas de amenaza muy alta, y el curso de la Quebrada Agua Fría como zona de amenaza baja, por tanto este se presenta como el modelo adecuado para la zonificación de amenaza por movimientos en masa.

8. ANALISIS GEOTECNICO Y GEOMECANICO

Según lo descrito en la zonificación de amenaza relativa por movimientos en masa (Ver Capítulo 7), se identificaron 3 sectores que representan prioridad, correspondiendo a las zonas identificadas como movimientos en masa, y un tercer sector correspondiente al corte vial en roca realizado por la vía que comunica la Vereda El Cairo con el casco urbano del municipio de San Luis De Gaceno, cuya amenaza corresponde a media.

Figura 37: Zonas de interés geotécnico según zonificación de amenaza por M.M.



Fuente: El estudio.

Es así que se plantea el análisis geotécnico y geomecánico de los sectores descritos del área de estudio, el cual tiene como finalidad determinar las propiedades de los materiales que intervienen y los diferentes mecanismos de falla que puedan llegar a presentarse, mediante el reconocimiento en campo y la realización de diferentes ensayos en roca y suelo, los cuales determinan parámetros como su composición y comportamiento mecánico.

8.1 CARACTERIZACION GEOTECNICA Y GEOMECANICA

La caracterización geotécnica y geomecánica consiste en determinar la composición y propiedades físicas, mecánicas e hídricas del terreno, con el fin de determinar los parámetros aplicables a la determinación de factores de seguridad mediante la toma de datos en campo y la realización de diferentes ensayos de laboratorio e interpretación de muestras de los materiales involucrados.

8.1.1 Antecedentes

La Corporación Autónoma Regional De Chivor (CORPOCHIVOR), en el área de estudio ha realizado estudios de exploración directa e indirecta, donde se identificaron y determinaron parámetros litológicos y geotécnicos del suelo y subsuelo correspondientes a las zonas de los movimientos en masa identificados en campo, en la tabla 43 se especifican los estudios realizados y en la tabla 44 los ensayos de laboratorio realizados.

Tabla 44: Estudios realizados previamente por Corpochivor.

TIPO DE ESTUDIO	COORDENADAS		PROFUNDIDAD (metros)
	ESTE	NORTE	
SONDEO GEOTECNICO 1	1'099,200	1'027,998	7,5
SONDEO GEOTECNICO 2	1'099,144	1'027,942	7,5
TOMOGRAFIA ELECTRICA	1'099,213 1'099,263	1'027,977 1'027,922	14,8

Fuente: El estudio.

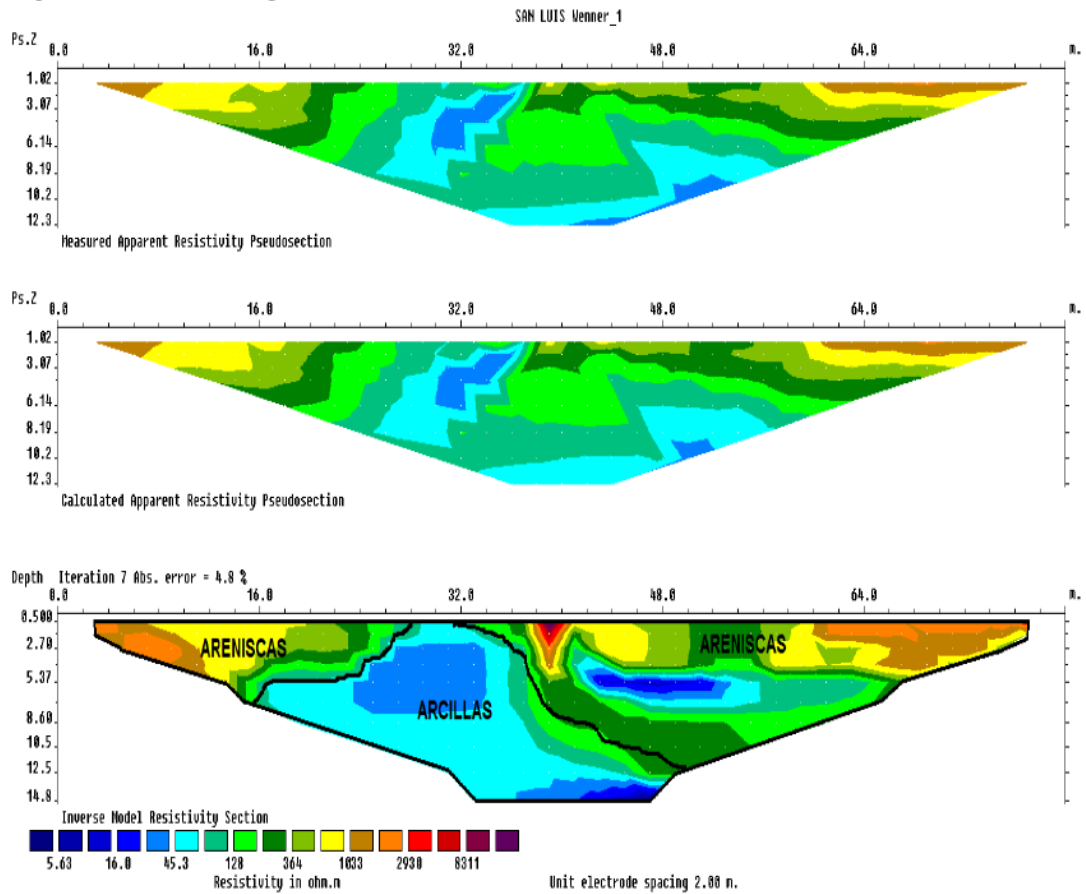
Tabla 45: Ensayos de laboratorio realizados previamente por Corpochivor.

NUMERO DE ENSAYOS	TIPO DE ESTUDIO	SONDEO
7	PESOS UNITARIOS	1
7	PESOS UNITARIOS	2
7	COMPRESION INCONFINADA	1
7	COMPRESION INCONFINADA	2
1	CORTE DIRECTO	1
1	CORTE DIRECTO	2
7	GRANULOMETRIA	1
7	GRANULOMETRIA	2
6	LIMITES DE CONSISTENCIA	1
6	LIMITES DE CONSISTENCIA	2
7	CONTENIDO DE AGUA	1
7	CONTENIDO DE AGUA	2

Fuente: El estudio.

En el Anexo E se presentan las tablas de resultados de los ensayos de laboratorio realizados, En la figura 37, la interpretación de los estudios de tomografía eléctrica y en la tabla 46 se presenta la tabla resumen de los ensayos realizados.

Figura 38: Perfil geoelectrico.



Fuente: Elaboración de estudio de riesgo (amenaza y vulnerabilidad) y diseño de obras de estabilización en la vereda El Carmen, Municipio de San Luis De Gaceno, jurisdicción de la corporación autónoma regional de Chivor (Corpochivor).

Tabla 46: Tabla resumen de los ensayos realizados.

UNIVERSIDAD PEDAGOGICA Y TECNOLOGICA DE COLOMBIA																				
LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS																				
SECCIONAL SOGAMOSO																				
MEMORIA DE SONDEOS																				
PROYECTO:		ESTUDIO DE AMENAZA Y VULNERABILIDAD MUNICIPIO DESAN LUIS DE GACENO - DEPARTAMENTO DE BOYACA																		
PERFORACION:		SONDEOS 1 - 2																		
LOCALIZACION:		MUNICIPIO DE SAN LUIS DE GACENO - DEPARTAMENTO DE BOYACA																		
FECHA:		SEPTIEMBRE DE 2013																		
inalterada																				
alterada																				
RESISTENCIA AL CORTE SUELOS																				
SONDEO / APIQUE N°	MUESTRA N°	TIPO DE MUESTRA	PROF. (m)	COORDENADAS		PROPIEDADES FISICAS SUELOS						CORTE DIRECTO		λ HUMEDO		λ SECO		COMPRESION INCONFINADA		PENETROMETRO
				E	N	Wn (%)	LL	LP	IP	CLASIF (U.S.C.)	P.T.N° 200 %	φ	C	Peso Unitario	Peso Unitario	qu	C	BOLSILLO Kg/cm²		
S 1	1		1,00	1,099,200	1,027,998	23,39						6,201			2,2852	1,9033	3,2261	1,61305	2	
	2		1,80	1,099,200	1,027,998	16,07	27,38	18,39	8,99	CL	6,307			2,3446	2,0175	2,6695	1,33475	2,5		
	3		2,50	1,099,200	1,027,998	12,49	24,45	14,71	9,74	CL	6,421	15,216	1,949	2,2798	1,8349	1,4807	0,74035	3		
	4		3,25	1,099,200	1,027,998	13,66	33,49	19,09	14,40	CL	7,195			2,0888	1,6183	2,0404	1,0202	3,5		
	5		4,70	1,099,200	1,027,998	28,67	27,92	14,67	13,25	CL	6,27			2,2327	1,8114	1,3155	0,65775	4		
	6		5,80	1,099,200	1,027,998	27,31	23,54	13,64	9,90	CL	7,892			2,1819	1,725	2,6216	1,3108	4,5		
	7		7,50	1,099,200	1,027,998	9,21	21,63	11,02	10,61	CL	8,365			2,3092	1,9724	0,5141	0,25705	4,5		
S2	1		1,20	1,099,144	1,027,942	28,13				CL	6,85			2,3729	1,981	1,31	0,655	2,5		
	2		1,90	1,099,144	1,027,942	27,54	20,8	11,54	9,26	CL	7,833			2,3127	1,8736	2,6115	1,30575	3,5		
	3		2,60	1,099,144	1,027,942	27,29	22,02	13,78	8,24	CL	8,495			2,1577	1,7109	2,1225	1,06125	3		
	4		3,40	1,099,144	1,027,942	26,22	11,42	7,89	3,53	CL	7,115	12,407	1,916	2,1753	1,709	2,1937	1,09685	3,5		
	5		4,55	1,099,144	1,027,942	26,20	29,05	12,62	16,43	CL	8,678			2,207	1,8036	2,8866	1,4433	4		
	6		6,15	1,099,144	1,027,942	20,04	23,45	14,29	9,16	CL	8,68			2,1847	1,7776	1,0302	0,5151	4,5		
	7		7,50	1,099,144	1,027,942	21,8	22,36	11,43	10,93	CL	7,109			1,7285	1,4913	0,891	0,4455	4,5		

Fuente: Elaboración de estudio de riesgo (amenaza y vulnerabilidad) y diseño de obras de estabilización en la vereda El Carmen, Municipio de San Luis De Gaceno, jurisdicción de la corporación autónoma regional de Chivor (Corpochivor).

8.1.2 Trabajo de campo

Como complemento al trabajo realizado por parte de la Corporación Corpochivor, se realizó una visita de campo del día 7 al 19 de Octubre de 2015 donde se recolectaron muestras de roca, se realizo toma de datos estructurales y diaclasas, datos tomados en las unidades de roca de la Formación Areniscas Del Limbo (Tearl), en la tabla 45 se describen las coordenadas de las zonas de toma de datos y muestras.

Fotografía 6: Zona de toma de muestra de roca y diaclasas en talud de la Formacion Areniscas Del Limbo (Tearl), Coordenadas; E:1'099.453; N:1.027.693.



Fuente: El estudio.

Tabla 47: Zonas de toma de datos y muestras.

DESCRIPCION	COORDENADAS	
	X	Y
TOMA DE MUESTRAS DE ROCA	1'099.453	1'027.693
TOMA DE DIACLASAS	1'099.456	1'027.668
	1'099.448	1'027.745

Fuente: El estudio.

8.1.3 Trabajo de laboratorio

Para la obtención de las propiedades físicas, hidráulicas y mecánicas de las areniscas correspondientes a la Formación Areniscas Del Limbo (Tearl) en el laboratorio de suelos, rocas y agregados de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC) se realizaron los siguientes ensayos:

Angulo de reposo: El ángulo de rozamiento tiene una interpretación física, al estar relacionado con el ángulo de reposo o máximo ángulo posible para la pendiente de una muestra de dicho material granular. Cualquiera que sea el ángulo de reposo está determinado por la fricción, la cohesión y la forma de las partículas pero en un material sin cohesión y donde las partículas son muy pequeñas en relación al tamaño de la muestra el ángulo de reposo coincide con el ángulo de rozamiento interno, En la tabla 47 se describen los resultados del ensayo.

Fotografía 7: Desarrollo del ensayo ángulo de reposo.



Fuente: El estudio.

Tabla 48: Resultados del ensayo del ángulo de reposo.

Descripción	Muestra	Tamiz #	X (cm)	Y(cm)	Ángulo de reposo (grados)
ARENISCAS	1	# 20	7,00	5,01	35,59
		# 40	7,86	6,14	37,97
		# 60	6,21	4,62	36,66
		#100	5,61	4,29	37,42
		promedio			

Fuente: El estudio.

Propiedades físicas: El objetivo principal de este ensayo es conocer las propiedades físicas de la roca tales como: Gravedad específica aparente, Contenido de humedad, etc. Para luego combinarlas con las propiedades mecánicas, y así poder evaluar los efectos del agua y temperaturas sobre la resistencia de la roca.⁵⁰

También es importante realizar este ensayo para lograr conocer y aprender a utilizar los materiales necesarios e interpretar bien el comportamiento de la roca teniendo en cuenta los distintos cálculos que se realicen. Se analizaron 3 muestras de roca, las cuales mediante su promedio arrojaron los siguientes resultados:

⁵⁰ Citado el 5/04/2016 en: <http://www.buenastareas.com/ensayos/Propiedades-Fisicas-De-Las-Rocas/4724360.html>

Tabla 49: Resultados del ensayo de propiedades físicas.

P(g/cc)	Pd(g/cc)	Psat(g/cc)	W %	S %	n %	e	y (KN/m3)	yd (KN/m3)	ysat (KN/m3)
1,86	1,850	2,039	0,558	5,458	18,958	0,013	18,34	18,24	20,11

Fuente: El estudio.

Donde:

W %	Porcentaje de humedad	P	Densidad total de la muestra
S %	Porcentaje de saturación	Pd	Densidad seca de la muestra
n %	Porosidad	Psat	Densidad saturada de la muestra
e	Relación de vacíos		
y (KN/m3)	Densidad total		
yd (KN/m3)	Densidad seca		
ysat (KN/m3)	Densidad saturada		

Fotografía 8: Ensayo de propiedades físicas.



Fuente: El estudio.

Compresión simple: Es el ensayo de mayor uso y, en el una muestra cilíndrica de material está sometida a la presión atmosférica por los lados y axialmente se aplica una carga σ_1 . El ensayo se realiza en suelos y rocas sobre muestras inalteradas.⁵¹

El ensayo busca determinar un parámetro de resistencia a la compresión máxima. Se utilizaron 2 muestras de roca cubica debido a la friabilidad de esta, donde la relación de dimensiones de la muestra está dada por la relación del ancho de la base, y la altura de la muestra, donde:

$$2 < \frac{\text{Altura Muestra}}{\text{Ancho de la base}} < 3$$

⁵¹ Apuntes de Geotecnia básica, O. Ramírez. Capítulo 8. Página 394. 2000.

Tabla 50: Resultados del ensayo de compresión simple.

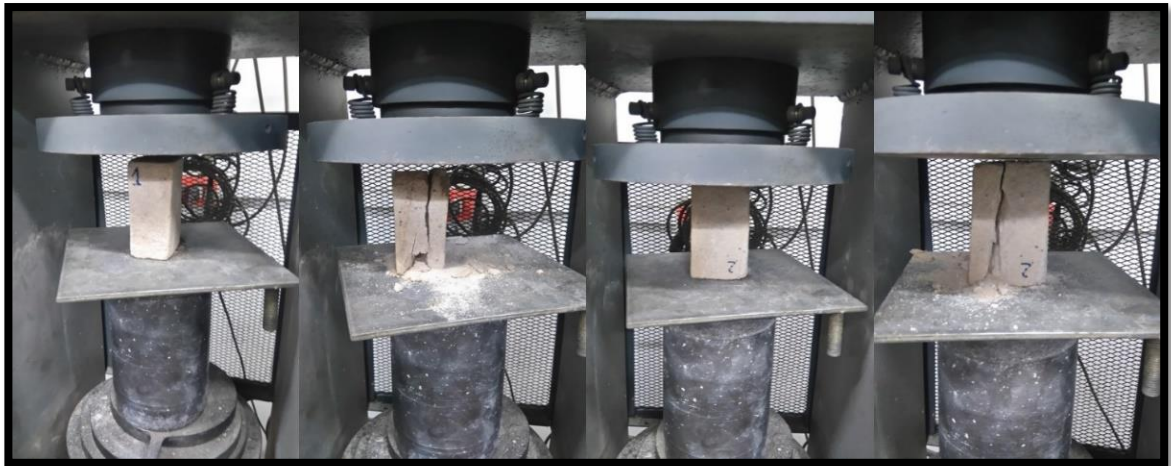
No. DE MUESTRA	M1	M2
FORMA DE MUESTRA	cubica	Cubica
ALTURA (cm)	17,7	17,88
PESO MUESTRA (gr)	390,8	557,5
AREA (cm ²)	19,664	27,145
VOLUMEN (cm ³)	348,0528	485,3526
g (gr/cm ³)	1,12281815	1,14864946
σ_{ci} (MPa)	2,44	1,44
Ei (MPa)	417,06	226,16
Resist (KN)	4,8	3,9

M1					M2				
DESP. VERTICAL x (0,01 mm)	RESIST. (KN)	DEF. UNITARIA (ϵ)	ESF. (KPa)	ESF. (MPa)	DESP. VERTICAL x (0,01 mm)	RESIST. (KN)	DEF. UNITARIA (ϵ)	ESF. (KPa)	ESF. (MPa)
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0,8	0,00028	406,83	0,41	5	1,2	0,00028	442,07	0,44
10	1	0,00056	508,54	0,51	10	1,2	0,00056	442,07	0,44
15	1,1	0,00085	559,40	0,56	15	1,3	0,00084	478,91	0,48
20	0,9	0,00113	457,69	0,46	20	1,5	0,00112	552,59	0,55
25	1,1	0,00141	559,40	0,56	25	1,7	0,00140	626,27	0,63
30	1,2	0,00169	610,25	0,61	30	1,8	0,00168	663,11	0,66
35	1,3	0,00198	661,11	0,66	35	2	0,00196	736,78	0,74
40	1,6	0,00226	813,67	0,81	40	2,1	0,00224	773,62	0,77
45	1,8	0,00254	915,38	0,92	45	2,3	0,00252	847,30	0,85
50	2,1	0,00282	1067,94	1,07	50	2,5	0,00280	920,98	0,92
55	2,4	0,00311	1220,50	1,22	55	2,6	0,00308	957,82	0,96
60	2,6	0,00339	1322,21	1,32	60	2,9	0,00336	1068,34	1,07
65	2,9	0,00367	1474,78	1,47	65	3,1	0,00364	1142,02	1,14
70	3,1	0,00395	1576,48	1,58	70	3,4	0,00391	1252,53	1,25
75	3,2	0,00424	1627,34	1,63	75	3,6	0,00419	1326,21	1,33
80	3,4	0,00452	1729,05	1,73	80	3,6	0,00447	1326,21	1,33
85	3,6	0,00480	1830,76	1,83	85	3,7	0,00475	1363,05	1,36
90	3,9	0,00508	1983,32	1,98	90	3,8	0,00503	1399,89	1,40
95	4,1	0,00537	2085,03	2,09	95	3,9	0,00531	1436,73	1,44
100	4,2	0,00565	2135,88	2,14	100	3,6	0,00559	1326,21	1,33
105	4,3	0,00593	2186,74	2,19					
110	4,5	0,00621	2288,45	2,29					
115	4,8	0,00650	2441,01	2,44					
120	4,8	0,00678	2441,01	2,44					
125	4,3	0,00706	2186,74	2,19					
130	4	0,00734	2034,17	2,03					
135	3,4	0,00763	1729,05	1,73					

Fuente: El estudio.

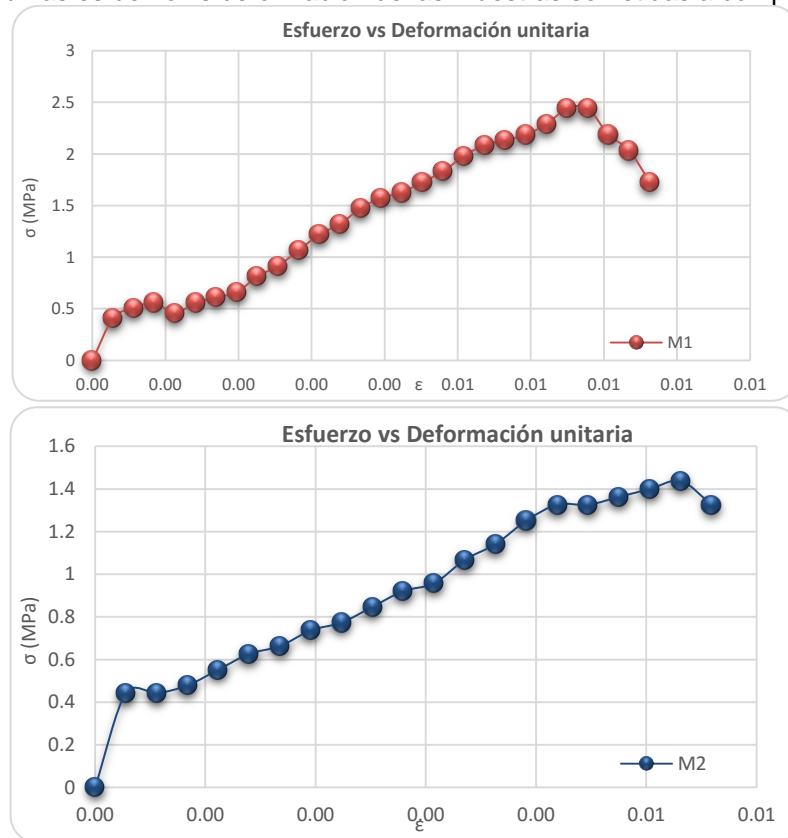
La resistencia máxima registrada por los testigos de arenisca correspondió a 4,8 KN de la muestra 1 y 3,9 KN de la muestra 2 para registrar una resistencia promedio de la roca saca de 4,35 KN, según ISRM 1981 la resistencia a la compresión simple corresponde a muy blanda, (1 – 5 Mpa)

Fotografía 9: Ensayo de compresión simple.



Fuente: El estudio.

Gráfico 9: Curvas esfuerzo vs deformación de las muestras sometidas a compresión simple.



Fuente: El estudio.

Tilt Test: Ensayo realizado para determinar el ángulo de rozamiento básico de la roca sana, donde se disponen dos testigos en este caso cúbicos, del cual se ubica

uno sobre otro de apoyo y se inclinan hasta que comiencen a deslizarse, este ángulo es medido en 10 intentos, posteriormente se repite el ensayo con el otro testigo de base.

Tabla 51: Resultados del ensayo de Tilt Test.

Descripción	Muestra	ANGULO MEDIDO	
ARENISCA	1	36	40
		43	50
		35	50
		37	42
		46	53
PROMEDIO		43,2	
ARENISCA	2	41	39
		30	35
		33	31
		39	31
		41	31
PROMEDIO		35,1	

Fuente: El estudio.

Fotografía 10: Ensayo de Tilt Test.




Fuente: El estudio.

Durabilidad y Desleimiento: Este ensayo tiene como objetivo determinar la resistencia de una muestra de roca al ablandamiento y desintegración cuando se somete a dos ciclos patrones de humedecimiento – secado.⁵²

⁵² Métodos sugeridos para la determinación del contenido de humedad, la porosidad, la densidad, la absorción, y propiedades relacionadas y las propiedades índice de expansión y desleimiento - durabilidad. Universidad Nacional - Sociedad Colombiana de Geotecnia.

Tabla 52: Resultados del ensayo de durabilidad y desleimiento.

 ENSAYO DE DURABILIDAD Y DESLEIMIENTO UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS SECCIONAL SOGAMOSO	
PROYECTO :	EVALUACION GEOLOGICA, GEOMORFOLOGICA Y GEOTECNICA PARA LA DETERMINACION DE AMENAZAS Y GENERACION DE ALERTAS TEMPRANAS EN EL DESLIZAMIENTO EL CAIRO EN EL MUNICIPIO DE SAN LUIS DE GACENO EN LA JURISDICCION DE LA CORPORACION AUTONOMA REGIONAL DE CHIVOR (CORPOCHIVOR).
LOCALIZACIÓN :	SAN LUIS DE GACENO - VEREDA EL CAIRO
MUESTRA	M1 FECHA : MARZO DE 2016
DATOS TAMBOR	
MUESTRA #	M 1
PESO TAMBOR (gr) :	1533,9
PESO TAMBOR + MUESTRA INICIAL (gr) :	2033,90
PESO TAMBOR + MUESTRA FINAL (gr) :	1887,7
DATOS MUESTRA	
PESO MUESTRA INICIAL (gr) : Wi	500,00
PESO MUESTRA FINAL (gr) : Wf	353,80
INDICE DE DURABILIDAD (%)	70,760
INDICE DE DESLEIMIENTO (%)	29,240%
COORDENADAS:	N: 1°027,662 E: 1°099,450
REALIZO: Omar E. Fajardo Estudiante Ing. Geologica	REVISO: LABORATORISTA ING. RAFAEL PEREZ ESPITIA

Fuente: El estudio.

Mediante el ensayo se determinó un índice de durabilidad en porcentaje de la muestra de arenisca correspondiente a 70,760% por tanto el porcentaje restante corresponde al desleimiento de la roca, con un valor de 29, 24%.

Figura 39: Ensayo de durabilidad y desgaste.



Fuente: El estudio.

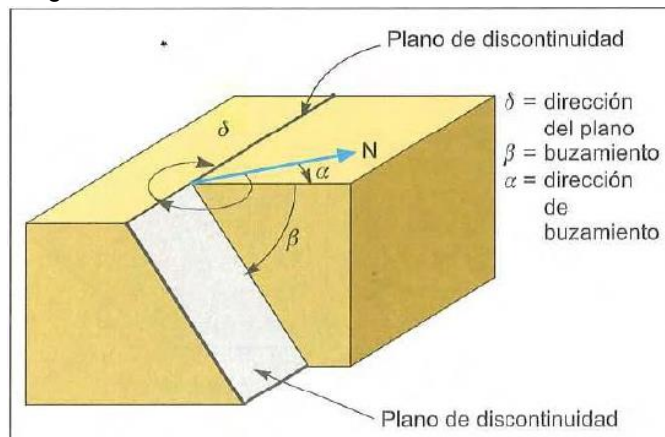
8.1.4 Análisis de discontinuidades

Las discontinuidades condicionan en una forma definitiva las propiedades y el comportamiento resistente, deformacional e hidráulico de los macizos rocosos. La resistencia al corte de las discontinuidades es el aspecto más importante en la determinación de la resistencia de los macizos rocosos duros fracturados, y para su estimación es necesario definir las características y propiedades de los planos de discontinuidad.⁵³

Para la recopilación de datos en campo se optó por el formato de toma de datos geomecánicos en campo donde se identifican parámetros para cada familia o discontinuidad, los cuales son (Ver Anexo E-3):

- **Orientación:** Dirección e inclinación de los diferentes planos de discontinuidad (Estratificación, Diaclasas, Etc.) medido en dirección de rumbo o azimut, e inclinación o buzamiento, para el posterior análisis en el Software Dips es necesario convertir este parámetro en Dip/Dip direction (Buzamiento/Dirección de Buzamiento).

Figura 40: Medida de orientación de discontinuidades.



Fuente: L.I.Gonzales de Vallejo, M. Ferrer, L. Ortuño, C. Oteo. Ingeniería Geológica.

- **Espaciado:** El espaciado entre los planos de discontinuidad condiciona el tamaño de los bloques de la matriz rocosa y, por tanto define el papel que ésta tendrá en el comportamiento mecánico del macizo rocoso, y su importancia con respecto a la influencia de las discontinuidades.⁵⁴

⁵³ L.I.Gonzales de Vallejo, M. Ferrer, L. Ortuño, C. Oteo. INGENIERIA GEOLOGICA, Madrid, 2002. Pag.246.

⁵⁴ L.I.Gonzales de Vallejo, M. Ferrer, L. Ortuño, C. Oteo. INGENIERIA GEOLOGICA, Madrid, 2002. Pag.248.

Figura 41: Espaciado de discontinuidades.




descripción	espaciado
extremadamente junto	<20mm
muy junto	20-60mm
junto	60-200mm
moderadamente junto	200-600mm
separado	600-2000mm
muy separado	2000-6000mm
extremadamente separado	>6000mm
descripción del espaciado según el ISRM, 1981	

Fuente: El estudio.

- **Continuidad:** Este parámetro hace referencia a la extensión superficial de los planos de discontinuidad medidos en dirección de rumbo y buzamiento en caso de ser posible, este parámetro es de difícil obtención en afloramientos rocosos, debido a que normalmente se observan trazas según planos aparentes.

Figura 42: Continuidad de discontinuidades.

continuidad	longitud
muy baja	< 1m
baja	1-3m
media	3-10m
alta	10-20m
muy alta	>20m
descripción de la continuidad según ISRM, 1981	

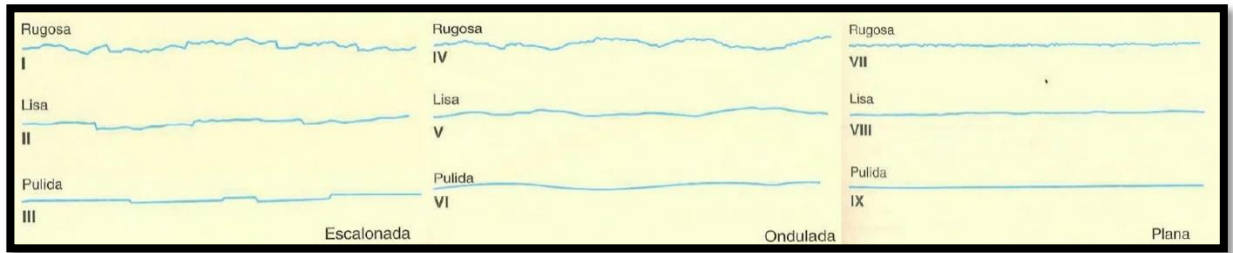


Fuente: El estudio.

- **Rugosidad:** La descripción y medida de la rugosidad tiene como principal finalidad la evaluación de la resistencia al corte de los planos, que para discontinuidades sin cohesión puede ser estimada a partir de datos de campo y expresiones empíricas.⁵⁵

⁵⁵ L.I.Gonzales de Vallejo, M. Ferrer, L. Ortuño, C. Oteo. INGENIERIA GEOLOGICA, Madrid, 2002. Pag.250.

Figura 43: Perfiles de rugosidad. La longitud de los perfiles está en el rango entre 1 y 10 metros (ISRM, 1981).



Fuente: L.I.Gonzales de Vallejo, M. Ferrer, L. Ortuño, C. Oteo. Ingeniería Geológica.

- **Abertura:** Distancia perpendicular de las paredes de las discontinuidades. La influencia de la abertura en la resistencia al corte de la discontinuidad es importante incluso en discontinuidades muy cerradas, al modificar las tensiones efectivas que actúan sobre las paredes.⁵⁶

Figura 44: Abertura de discontinuidades

Abertura	Descripción
<0,1mm	muy cerrada
0,1-0,25mm	cerrada
0,25-0,5mm	parcialmente abierta
0,5-2,5mm	abierta
2,5-10mm	moderadamente ancha
>10mm	ancha
1-10cm	muy ancha
10-100cm	extremadamente ancha
>1m	cavernosa

Descripción de la abertura según el ISRM (1981)

Fuente: El estudio.

- **Relleno:** En los planos de discontinuidad ocasionalmente se encuentran rellenos de diferente material a la matriz rocosa, los cuales pueden tener distintos materiales y propiedades físicas, mecánicas y químicas, determinando las propiedades en general de las discontinuidades, por tanto, es necesario realizar la descripción de la presencia y las propiedades de dichos materiales.

⁵⁶ L.I.Gonzales de Vallejo, M. Ferrer, L. Ortuño, C. Oteo. INGENIERIA GEOLOGICA, Madrid, 2002. Pag.253.

- **Filtraciones:** El agua en el interior de un macizo rocoso procede generalmente del flujo que circula por las discontinuidades (permeabilidad secundaria), aunque en ciertas rocas permeables las filtraciones a través de la matriz rocosa (permeabilidad primaria) pueden ser también importantes.

Tabla 53: Descripción de las filtraciones en discontinuidades.

Clase	Discontinuidades sin relleno	Discontinuidades con relleno
I	Junta muy plana y cerrada. Aparece seca y no parece posible que circule agua	Relleno muy consolidado y seco. No es posible el flujo de agua
II	Junta seca sin evidencia de flujo de agua	Relleno húmedo pero sin agua libre
III	Junta seca pero con evidencia de haber circulado agua	Relleno mojado con goteo ocasional
IV	Junta húmeda pero sin agua libre	Relleno que muestra señales de lavado, flujo de agua continuo (estimar el caudal en L/min)
V	Junta con rezume, ocasionalmente goteo pero sin flujo continuo	Relleno localmente lavado, flujo considerable según canales preferentes (estimar caudal y presión)
VI	Junta con flujo continuo de agua (estimar el caudal en L/min, y la presión)	Rellenos completamente lavados, presiones de agua elevadas

Fuente: El estudio.

8.1.5 Clasificación del macizo rocoso

La clasificación del macizo rocoso busca proporcionar una evaluación geomecánica mediante el trabajo realizado en campo y los ensayos de laboratorio, logrando así determinar la calidad del macizo rocoso y sus parámetros de resistencia, en el presente estudio se plantea la clasificación R.M.R (Bieniawski).

8.1.5.1 Obtención del RQD

El parámetro Rock Quality Designation o RQD propuesto por Deere (1967), es un índice cuantitativo de calidad de la roca basado en la recuperación de núcleos con perforación de diamante, y se define como el porcentaje representado por la sumatoria de longitudes de los tramos de núcleo de barrenos de diamante que se recuperan en longitudes enteras mayores o iguales a 100 mm, dividida entre la longitud total barrenada.⁵⁷

$$RQD (\%) = 100 * \frac{\sum(LONGITUD DE FREGMENTOS \geq 100mm)}{LONGITUD TOTAL PERFORADA}$$

En los casos donde no existen sondeos geotécnicos existe una fórmula alternativa para relacionar este valor, donde se identifican el número de discontinuidades en el macizo rocoso por m³.

$$RQD (\%) = 115 - 3.3J_v \quad PARA J_v > 4.5$$

$$RQD (\%) = 100 \quad PARA J_v \leq 4.5$$

⁵⁷ Citado el 12/04/2016 en: <http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/12527/Capitulo9.pdf>

Donde:

Jv: Numero de juntas (discontinuidades) identificadas en el macizo rocoso por m³

Tabla 54: Calidad de la roca según índice RQD.

RQD (%)	Calidad de la roca
< 25	muy mala
25 – 50	mala
50 – 75	regular
75 – 90	bueno
90 – 100	excelente

Fuente: Deere y Miller 1964.

Localmente para obtener el parámetro RQD se utilizaron promedios de los datos de discontinuidades medidas en campo, las cuales de acuerdo al número de diaclasas y el espaciamiento entre las mismas, hacen posible la obtención del parámetro Jv promedio del macizo rocoso a analizar.

Tabla 55: Obtención de Jv promedio.

Espaciamiento mm		
20-60	60-200	600-2000
Numero de discontinuidades		
20	69	26
Porcentaje		
17,4%	60,0%	22,6%
Promedio Discontinuidades * m ²		
25	7,7	0,8
Promedio * Porcentaje		
4,35	4,62	0,17
Disc*m ² (Jv)		9,14

Fuente: El estudio.

$$RQD (\%) = 115 - 3.3 * 9.14 = 84.84\%$$

Reemplazando en la formula teniendo en cuenta que $Jv > 4.5$ se obtiene el parámetro RQD (%) correspondiente a 84.84 %, porcentaje el cual se clasifica dentro de rocas de calidad buena.

8.1.5.2 Clasificación RMR

Desarrollada por Bieniawski en 1973, con actualizaciones en 1979 y 1989, constituye un sistema de clasificación de macizos rocosos que permite a su vez relacionar índices de calidad con parámetros geotécnicos del macizo y de excavación y sostenimiento en túneles.⁵⁸

⁵⁸ L.I.Gonzales de Vallejo, M. Ferrer, L. Ortuño, C. Oteo. INGENIERIA GEOLOGICA, Madrid, 2002. Pag.230.

Esta clasificación tiene en cuenta principalmente 5 parámetros:

- 1- Resistencia del material intacto:** mediante los ensayos de las 2 muestras se determinó una resistencia promedio para el material de 1,9 MPa (Ver Anexo E-2: Compresión Simple), correspondiendo al rango de 1-5 Mpa.
- 2- R.Q.D:** Teniendo en cuenta el J_v hallado previamente, el parámetro RQD correspondiente en esta clasificación es de 84,84%, el cual se clasifica en el rango RMR para el parámetro RQD de 75-90.
- 3- Distancia entre las discontinuidades:** teniendo en cuenta el Anexo E-3, las discontinuidades tienen diferentes distancias entre sí, tomando diferentes grupos, es por esto que para realizar una clasificación representativa, se tiene en cuenta la condición más crítica, siendo en este caso la distancia entre discontinuidades menor registrada, correspondiente a un espaciamiento de 60 a 200 mm con un total de 20 discontinuidades en este rango, teniendo una calificación RMR (Bieniawski 1989) de 10 puntos.
- 4- Condición de las discontinuidades:**
 - **Longitud de la discontinuidad:** Tomando en cuenta la condición más crítica de continuidad se tiene la clasificación de 1 – 3 metros, siendo una continuidad baja, cuya calificación RMR corresponde a 4 puntos.
 - **Abertura:** se midieron en campo aberturas desde los 0.5 mm hasta 100 mm, estando esta abertura preferencialmente entre 2,5 – 10 mm, es así que según la clasificación RMR esta roca tiene una calificación de abertura correspondiente a 0.
 - **Rugosidad:** en la clasificación realizada en campo las discontinuidades tienen rangos de rugosidad plana lisa a plana pulida (Slickensided) la cual se relaciona según la tabla de clasificación RMR con rugosidad suave cuya calificación es 0.
 - **Relleno:** no se identificaron rellenos de ningún tipo en las discontinuidades, por tanto la calificación correspondiente es 6.
 - **Alteración:** Superficialmente en reconocimiento en campo en general se determinó una alteración baja, correspondiente a ligeramente alterada, cuya calificación es de 5.
- 5- Agua subterránea:** mediante el reconocimiento en campo se identificó el material ligeramente húmedo, cuya calificación RMR corresponde a 10 puntos.

Estos parámetros se suman para obtener el índice de calidad RMR (Rock Mass Rating) donde la calificación de cada uno de estos parámetros tiene un valor mínimo correspondiente a 0 y máximo de 100.

$$RMR = (1) + (2) + (3) + (4) + (5)$$

Una vez identificados los factores y su calificación es posible realizar la clasificación:

$$RMR = (1) + (2) + (3) + (4) + (5)$$

$$RMR = (1) + (17) + (10) + (4 + 6 + 5) + (10)$$

$$RMR = 53$$

Tabla 56: Clasificación RMR (Bieniawski 1989).

1	Resistencia de la matriz rocosa (Mpa)	Ensayo de carga puntual	>10	10 - 4	4 - 2	2 - 1	Compresión simple (Mpa)		
		Compresión simple	>250	250 - 100	100 - 50	50 - 25	25-5	1-5	< 1
	Puntuación		15	12	7	4	2	1	0
2	R.Q.D (%)		90-100	75-90	50-75	25-50	<25		
	Puntuación		20	17	13	6	3		
3	Separación entre diaclasas (m)		>2	0,6-2	0,2-0,6	0,06-0,2	<0,06		
	Puntuación		20	15	10	8	5		
4	Estado de las discontinuidades	Longitud de la discontinuidad (m)	< 1	1 - 3	3 - 10	10 - 20	> 20		
		Puntuación	6	4	2	1	0		
		Abertura mm	Nada	< 0,1	0,1-1,0	1-5	> 5		
		Puntuación	6	5	3	1	0		
		Rugosidad	Muy rugosa	Rugosa	Ligeramente rugosa	Ondulada	Suave		
		Puntuación	6	5	3	1	0		
		Relleno	Ninguno	Relleno duro <5mm	Relleno duro >5mm	Relleno blando <5 mm	relleno blando >5mm		
		Puntuación	6	4	2	2	0		
5	Agua freática	Caudal por 10 m de túnel	Nulo	< 10 L/min	10-25 L/min	25-125 L/min	>125 L/min		
		Relación: Presión de agua/Tensión principal mayor	0	0-0,1	0,1-0,2	0,2-0,5	>0,5		
		Estado general	Seco	Ligeramente Húmedo	Húmedo	Goteando	Agua fluyendo		
Puntuación		15	10	7	4	0			

Fuente: L.I.Gonzales de Vallejo, M. Ferrer, L. Ortuño, C. Oteo. Ingeniería geológica.

Al valor hallado anteriormente se aplica la corrección por orientación de discontinuidades en taludes, las cuales se determinaron en una clasificación favorable teniendo en cuenta que, las familias predominantes de diaclasas no están generando cuñas, están en diferente dirección preferencial a la dirección e inclinación del talud, predominantemente en contra de la pendiente del terreno, siendo el descuento al valor RMR final de -5 puntos.

Tabla 57: Corrección por orientación de las discontinuidades.

Dirección y buzamiento		Muy favorables	Favorables	Medias	Desfavorables	Muy desfavorables
Puntuación	Túneles	0	-2	-5	-10	-12
	Cimentaciones	0	-2	-7	-15	-25
	Taludes	0	-5	-25	-50	-60

Fuente: L.I.Gonzales de Vallejo, M. Ferrer, L. Ortuño, C. Oteo. Ingeniería geológica.

$$RMR_{final} = RMR - \text{Correccion por orientacion}$$

$$RMR_{final} = 53 - 5 = 48$$

Según el puntaje obtenido total de la suma de los 5 parámetros de clasificación RMR con descuento de corrección por orientación de discontinuidades, se concluye una calidad del macizo rocoso correspondiente a media, cuyo rango esta entre 60 – 41.

Tabla 58: Clasificación final y calidad de macizos rocosos en relación al índice RMR.

Clase	Calidad	Valoración RMR	Cohesión	Ángulo de rozamiento
I	Muy buena	100-81	>4 Kg/cm ²	>45°
II	Buena	80-61	3-4 Kg/cm ²	35°-45°
III	Media	60-41	2-3 Kg/cm ²	25°-35°
IV	Mala	40-21	1-2 Kg/cm ²	15°-25°
V	Muy mala	<20	<1 Kg/cm ²	<15°

Fuente: L.I.Gonzales de Vallejo, M. Ferrer, L. Ortuño, C. Oteo. Ingeniería geológica.

Tabla 59: Características geotécnicas.

Clase	I	II	III	IV	V
Tiempo de mantenimiento y longitud	10 años con 15 m de vano	6 meses con 8m de vano	1 semana con 5m de vano	10 horas con 2,5 m de vano	30 minutos con 1 m de vano
Cohesión	>4 Kp/cm ²	3-4 Kp/cm ²	2-3 Kp/cm ²	1-2 Kp/cm ²	< 1 Kp/cm ²
Ángulo de rozamiento	> 45°	35°-45°	25°-35°	15°-25°	< 15°

Fuente: L.I.Gonzales de Vallejo, M. Ferrer, L. Ortuño, C. Oteo. Ingeniería geológica.

8.1.5.4 Estimacion del Geological Strength Index GSI

El GSI fue desarrollado por Hoek (1994) como corrección de problemas en el uso del índice RMR, es un sistema para la estimación de propiedades geomecánicas del macizo rocoso a partir de observaciones geológicas de campo. Las observaciones se basan en la apariencia del macizo a nivel de estructura y a nivel

de condición de la superficie. A nivel de estructura se tiene en cuenta el nivel de alteración que sufren las rocas, la unión que existe entre ellas, que viene dada por las formas y aristas que presentan, así como de su cohesión. Para las condiciones de la superficie, se tiene en cuenta si ésta está alterada, si ha sufrido erosión o qué tipo de textura presenta, y el tipo de recubrimiento existente.⁵⁹

Para determinar el GSI existe el método directo, determinado de forma visual en campo (Ver Figura 59), y el método de ajuste respecto a la clasificación RMR (1989), generalmente el GSI no se expresa en un valor neto, se expresa en un rango de valores, los cuales deben tener un valor similar medido en campo o mediante RMR(1989).

El índice RMR (1989) se relaciona con el índice GSI mediante la siguiente expresión:

$$SI: \quad RMR89 \geq 23 \quad \text{ENTONCES} \quad GSI = RMR89 - 5$$

$$SI: \quad RMR89 < 23 \quad \text{NO PUEDE ESTIMARSE GSI (POCO CONFIABLE)}$$

Para realizarse por el método de clasificación RMR (1989) es necesario volver a realizar la clasificación con superficie seca y sin corrección por orientación de diaclasas, por tanto el valor original dado anteriormente de 48, no se utiliza en este caso.

$$RMR = (1) + (17) + (10) + (4 + 6 + 5) + (15) = 58$$









$$GSI = 58 - 5 = 53$$

Según la clasificación realizada de forma directa en campo, se realizó mediante la tabla de estimación del GSI para macizos heterogéneos como Flysch (adaptada de Hoek 2006), donde a partir de la litología, estructura y condiciones superficiales de las discontinuidades, se estima un valor promedio de GSI, dando un rango.

Según su composición y textura, la clasificación litológica de la roca corresponde a areniscas con intercalaciones de limonita, mientras que las condiciones de superficie en las discontinuidades se clasifican como regulares, por tanto se da un valor de GSI correspondiente a 50 ± 5 , concordando con la clasificación según el RMR (1989) cuyo valor corresponde a 53.

⁵⁹ J. Ros Avila. Análisis comparativo de los criterios de rotura de Hoek&Brown y Mohr Coulomb en el estudio de estabilidad en macizos rocosos. Etseccpb. Barcelona. 2008. Pag 29.

Figura 45: estimación del GSI para macizos heterogéneos como Fisch, adaptada de Hoek (2006).

GSI PARA MACIZOS HETEROGENEOS COMO FLYSCH (Marinos P. and Hoek, E, 2000)													
A partir de la litología, estructura y condiciones superficiales de las discontinuidades, se estima un valor promedio del GSI. No se debe tratar de ser muy preciso. Un rango de 33-37 es mas realista que un GSI=35. Note que el criterio de Hoek - Brown no aplica a estructuras controladas por fallas, donde la orientación desfavorable de los planos de debilidad esta presente pudiendo estos dominar el comportamiento del macizo rocoso. Algunos esfuerzos en el macizo son reducidos por la presencia de agua y esta puede conducir a un ligero desplazamiento y deteriorar la calidad. La presión de agua no hace cambios en el valor de GSI y este puede tratarse con esfuerzos efectivos.		CONDICIONES DE SUPERFICIE EN LAS DISCONTINUIDADES (Planos de foliación predominantes)		MUY BUENAS		BUENAS		REGULAR		POBRE		MUY POBRE	
COMPOSICION Y ESTRUCTURA													
	A. El espesor de la capa de arenisca. El efecto del recubrimiento pelítico sobre los planos de las capas es minimizado por el efecto de confinamiento del macizo rocoso			70		60							
	B. Arenisca con intercalaciones de limolita		C. Arenisca y limolita en iguales cantidades.	50		40		A		B		C	
	D. Limolita con estratos de arenisca con estratos de		E. limolita y arcillolita con estratos de arenisca					C		D		E	
E, D, E y G pueden ser mas o menos foliadas como se ilustra, pero no cambian los esfuerzos. La deformación tectónica, fallas y perdida de continuidad implica desplazarse a las categorías F y H.										30		F	
	F. Tectónicamente deformado, intensamente foliado/fallado, material arcilloso cizallado de limolita y arcillolita con fragmentos de areniscas deformadas formando									20		G	
	G. Arcillolitas y limolitas inalteradas con o sin arenisca.		H. Limolita o arcillolita tectónicamente deformada formando una estructura caótica con paquetes de arcilla. Delgados estratos de arenisca transformada en pequeñas							10		H	

Fuente: Adaptado de Sistema GSI, Hoek (2006).

8.2 OBTENCION DE PARAMETROS DE MODELACION

Dentro del presente estudio en el capítulo 7 se identificaron las zonas de mayor interés, determinado por el nivel de amenaza presente en el área de estudio, es así como las zonas analizadas corresponden a las zonas identificadas como movimientos en masa, y la zona delimitada por la vía que comunica la Vereda El Cairo con el municipio de San Luis De Gaceno en el sector donde se ubica el talud de arenisca correspondiente a la Formación Areniscas Del Limbo (Tearl), talud el cual ha presentado problemas debido al corte efectuado por la construcción de la vía.

Para obtener los parámetros finales de modelación geotécnica y geomecánica en las zonas descritas, se presentan los datos de los ensayos de laboratorio previos al presente estudio, y los realizados, además de los parámetros determinados en campo (Ver tabla 60) para posteriormente mediante el software Roclab (RocScience) determinar criterios necesarios para el modelamiento de la información.

Tabla 60: Parámetros de modelación determinados mediante ensayos.

PARAMETROS EN SUELO						
coordenadas		ϕ prom.	C prom.	λ SECO Prom.	λ HUMEDO prom.	USC
X	Y					
1,099,200	1,027,998	15,22°	1,95	1,84	2,25	CL
1,099,144	1,027,942	12,41°	1,92	1,76	2,16	CL
PROMEDIOS		13,81°	1,93	1,80	2,20	
PARAMETROS EN ROCA						
coordenadas		Com. Simple (Esfuerzo MPa)	Tilt test	λ SECO Prom.	λ SAT. Prom.	Ángulo de reposo
X	Y					
1'099,450	1'027,662	2,44	35,1°	1,86	2,050	36,91°
1'099,451	1'027,663	1,44	43,2°	1,86	2,050	36,91°
PROMEDIOS		1,94	39,15°	1,86	2,050	36,91°
GSI		53				

Fuente: El estudio.

8.2.1 Obtención de parámetros de modelación en roca mediante Roclab

RocLab es un programa que permite determinar los parámetros de resistencia del macizo rocoso, de acuerdo al criterio de rotura generalizado de Hoek & Brown.

8.2.1.1 Criterio de Hoek & Brown Generalizado

Hoek & Brown introdujeron su criterio de rotura en un intento de proporcionar los datos de partida para el análisis necesario en el diseño de excavaciones subterráneas en roca competente. El criterio se dedujo a partir de los resultados de las investigaciones de Hoek de roturas frágiles de rocas intactas y de un modelo de estudio del comportamiento de macizos rocosos de Brown. El criterio partía de las propiedades de la roca intacta y entonces se introducían factores reductores de estas propiedades sobre la base de las características de un macizo rocoso diaclasado. Los autores, intentando relacionar el criterio empírico con las observaciones geológicas, por medio de uno de los sistemas de clasificación de los macizos rocosos, eligieron para este propósito el RMR (Rock Mass Rating) propuesto por Bieniawski.⁶⁰

Este se expresa como:

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci} \left(m_b \frac{\sigma'_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a$$

Donde m_b es un valor reducido de la constante del material m_i y esta dado por:

$$m_b = m_i \exp \left(\frac{GSI - 100}{28 - 14D} \right)$$

⁶⁰ E. Hoek, C. Carranza-Torres, B. Corkum. El criterio de rotura de Hoek-Brown. Consulting Engineer, University of Minnesota, RocScience Inc. Edición 2002. Pag 01.

s y a son constantes del macizo rocoso dadas por las siguientes relaciones:

$$s = \exp\left(\frac{GSI - 100}{9 - 3D}\right)$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6}\left(e^{-GSI/15} - e^{-20/3}\right)$$

D es un factor que depende del grado de alteración al que ha sido sometido el macizo rocoso por efecto de las voladuras o por la relajación de esfuerzos.⁶¹

8.2.1.2 Criterio de Mohr – Coulomb

Dado que mucho software geotécnico está aún escrito en términos del criterio de rotura de Mohr- Coulomb, es necesario determinar los ángulos de fricción y las resistencias cohesivas para cada macizo rocoso e intervalo de esfuerzos. Esto se hace ajustando una relación lineal media a la curva generada a partir de la ecuación 2 para un intervalo de esfuerzo principal menor definido por $\sigma_t < \sigma_3 < \sigma'_3 \text{max}$. El proceso de ajuste supone equilibrar las áreas por encima y por debajo de la curva de Mohr-Coulomb. Esto da lugar a las siguientes ecuaciones para el ángulo de fricción ϕ' y la resistencia cohesiva c' ⁶²:

$$\phi' = \sin^{-1} \left[\frac{6am_b(s + m_b\sigma'_{3n})^{a-1}}{2(1+a)(2+a) + 6am_b(s + m_b\sigma'_{3n})^{a-1}} \right]$$

$$c' = \frac{\sigma_{ci}[(1 + 2a)s + (1 - a)m_b\sigma'_{3n}](s + m_b\sigma'_{3n})^{a-1}}{(1 + a)(2 + a) \sqrt{1 + \frac{6am_b(s + m_b\sigma'_{3n})^{a-1}}{(1 + a)(2 + a)}}}$$

La resistencia al corte de Mohr-Coulomb τ , para un esfuerzo normal dado σ'_n , se encuentra sustituyendo estos valores de c' y ϕ' en la ecuación:

$$\tau = c' + \sigma'_n \tan \phi'$$

8.2.1.3 Análisis en RocLab

Para determinar dichos parámetros es necesario introducir los siguientes datos:

Sigci: Valor correspondiente a la compresión no confinada o compresión simple de la matriz rocosa correspondiente al valor promedio hallado de 1,94 MPa de las muestras analizadas.

⁶¹ E. Hoek, C. Carranza-Torres, B. Corkum. *El criterio de rotura de Hoek-Brown*. Consulting Engineer, University of Minnesota, RocScience Inc. Edición 2002. Pag 02.

⁶² E. Hoek, C. Carranza-Torres, B. Corkum. *El criterio de rotura de Hoek-Brown*. Consulting Engineer, University of Minnesota, RocScience Inc. Edición 2002. Pag 03.

Figura 46: Parámetro Sigci.

Field Estimate of Strength	Examples	Strength (MPa)
Specimen can only be chipped with a geological hammer.	Fresh basalt, chert, diabase, gneiss, granite, quartzite.	>250
Specimen requires many blows of a geological hammer to fracture it.	Amphibolite, sandstone, basalt, gabbro, gneiss, granodiorite, limestone, marble, rhyolite, tuff.	100-250
Specimen requires more than one blow of a geological hammer to fracture it.	Limestone, marble, phyllite, sandstone, schist, shale.	50-100
Cannot be scraped or peeled with a pocket knife, specimen can be fractured with a single blow from a geological hammer.	Claystone, coal, concrete, schist, shale, siltstone.	25-50
Can be peeled with a pocket knife with difficulty, shallow indentation made by firm blow with point of a geological hammer.	Chalk, rocksalt, potash.	5-25
Crumbles under firm blows with point of a geological hammer, can be peeled by a pocket knife.	Highly weathered or altered rock.	1-5
Indented by thumbnail.	Stiff fault gouge.	0.25-1

Uniaxial Compressive Strength (sigci): MPa

Fuente: Roclab, RocScience.

mi: Parámetro de la roca intacta, depende de la litología del material, y se determinó en este caso para la arenisca mediante los rangos dados por el programa correspondiendo a 17 ± 4 especificando el tipo de roca (sedimentaria) y su textura media.

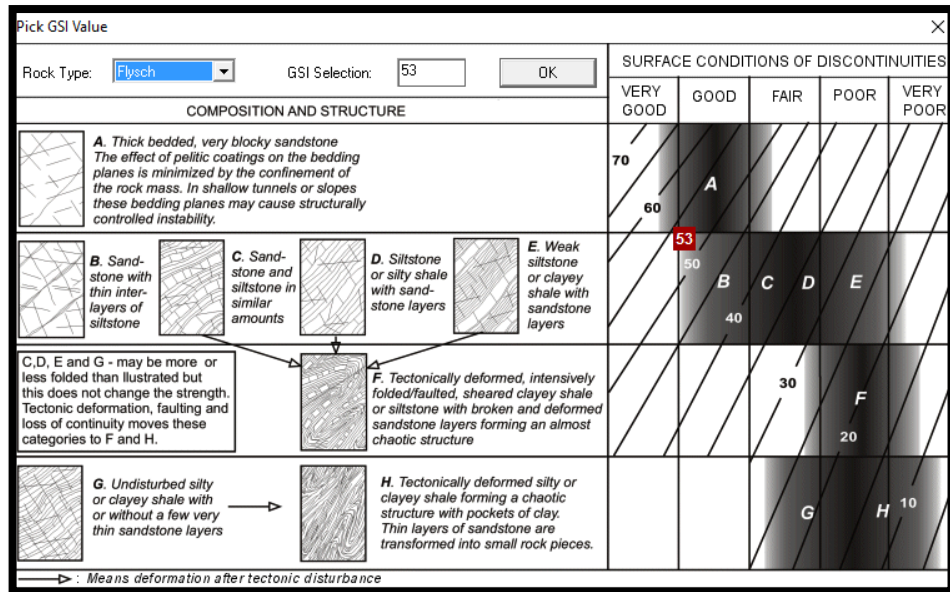
Figura 47: Parámetro mi.

List of Mi Values	Selected Mi Value
Gypsum 10 ± 2	Mi Value: <input type="text" value="17"/>
Sandstones 17 ± 4	
Sparitic Limestones 10 ± 5	
	Filter List
	<input checked="" type="checkbox"/> Rock Type
	<input checked="" type="checkbox"/> Texture
	<input checked="" type="radio"/> Sedimentary
	<input type="radio"/> Coarse
	<input type="radio"/> Igneous
	<input checked="" type="radio"/> Medium
	<input type="radio"/> Metamorphic
	<input type="radio"/> Fine
	<input type="radio"/> Very Fine
	<input type="button" value="OK"/> <input type="button" value="Cancel"/>

Fuente: RocLab, RocScience.

GSI: El Geological Strength Index o índice de resistencia geológica fue determinado en campo y mediante la clasificación RMR (Bieniawski 1989) donde se determinó un valor correspondiente a 53 dentro de la calificación dada para areniscas con intercalaciones de limolitas (recuadro B).

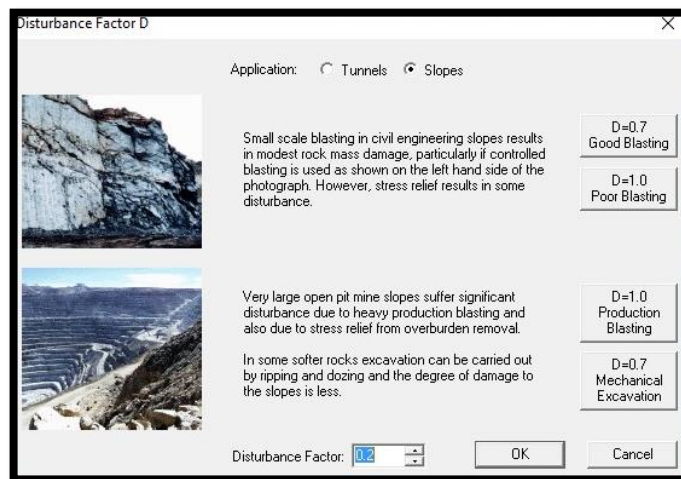
Figura 48: Parámetro GSI.



Fuente: RocLab, RocScience.

Disturbance Factor (D): El factor de disturbancia hace referencia a la alteración producto de voladuras, la clasificación se subdivide en dos grupos, túneles y taludes, en este caso es necesario analizar por medio de taludes, donde al no presentarse voladuras en la zona, el factor cuyo rango esta entre 0,0 y 1,0, se analiza como el valor 0, pero mediante el reconocimiento en campo, se evidenciaron procesos erosivos medianamente acentuados al igual que la falta de cobertura y corte del talud debido al trazo de la vía, por tanto se asignó un valor concordante con el grado de erosión natural y antrópica producida sobre el talud correspondiente a 0,2.

Figura 49: Determinación del parámetro factor de disturbancia D.



Fuente: RocLab, RocScience.

Es así como finalmente se obtienen los parámetros correspondientes al criterio de Hoek & Brown (mb,s,a), el criterio de falla de Mohr-Coulomb (Cohesión y ángulo de fricción) y los parámetros generales de la masa rocosa (ver tabla 61).

Tabla 61: Parámetros de modelación determinados mediante RocLab.

Parámetros de clasificación Hoek & Brown		
sigci	1,94	MPa
GSI	53	
mi	17	
D	0,2	
Criterio de Hoek & Brown		
mb	2,63303	2,63303
s	0,00371551	0,00371551
a	0,504656	0,504656
Rango Envolvente de Falla		
Application	General	
sig3max	0,485	MPa
Mohr-Coulomb Fit		
c	0,111081	MPa
phi	34,3855	Grados

Fuente: El estudio.

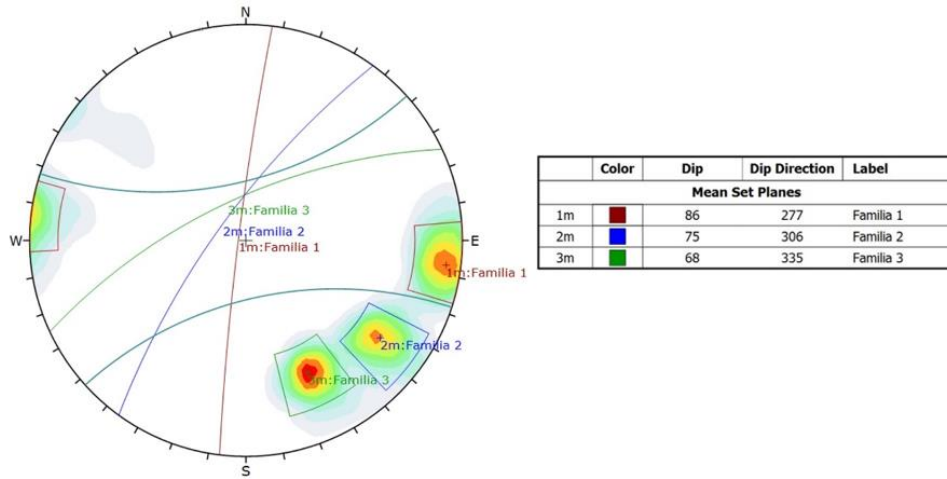
8.3 ANALISIS DE ESTABILIDAD

8.3.1 Análisis cinemático

Los diferentes mecanismos de falla en taludes están asociados a las diferentes estructuras geológicas presentes en este y la interacción entre estas de acuerdo a la pendiente que tenga el talud, las orientaciones de las mismas y el ángulo de fricción interna de las estructuras a analizar, además es importante decir que para que se de cualquiera de los mecanismos de falla, las estructuras y el talud deben cumplir con condiciones particulares dependiendo el mecanismo que se esté presentando.

En el área descrita anteriormente correspondiente al talud de areniscas, mediante la interpretación en el software Dips (6.0) se identificaron 3 familias de diaclasas las cuales tienen las siguientes características:

Figura 50: Familias de diaclasas y sus características medidas mediante Dips 6.0



Fuente: El estudio.

Parámetros de análisis: es necesario en campo realizar la toma de datos estructurales y geométricos tanto de estratos como del talud analizado, por tanto se presentan en la tabla 62 dichos datos.

Tabla 62: Datos de análisis.

Parámetros de análisis	
Buzamiento (Talud)	85
Dirección Buz. (Talud)	258
Altura del talud	30m
Inclinación sobre el talud de ladera	37°
Ancho del talud	60m
# Discontinuidades	118
Coord. Este	1'099,453
Coord. Norte	1'027,693

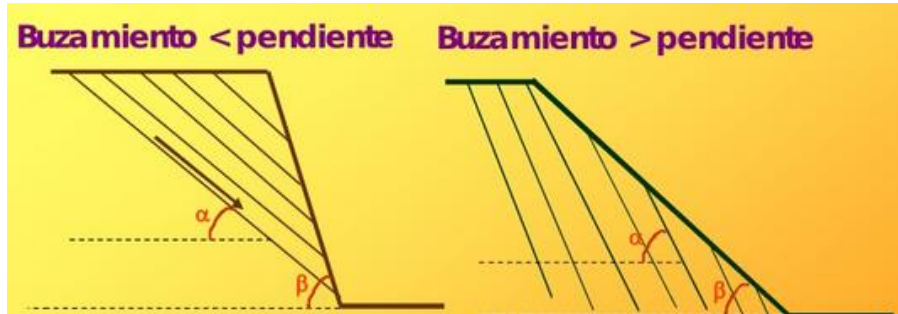
Fuente: El estudio.

Mecanismo de falla planar: Mecanismo característico en taludes de roca y se da bajo las siguientes condiciones:

- Cuando la inclinación del talud es mayor que la inclinación del plano de deslizamiento, representado por:

$$\beta > \alpha > \varphi$$

Figura 51: esquema inclinación de talud vs estratos.

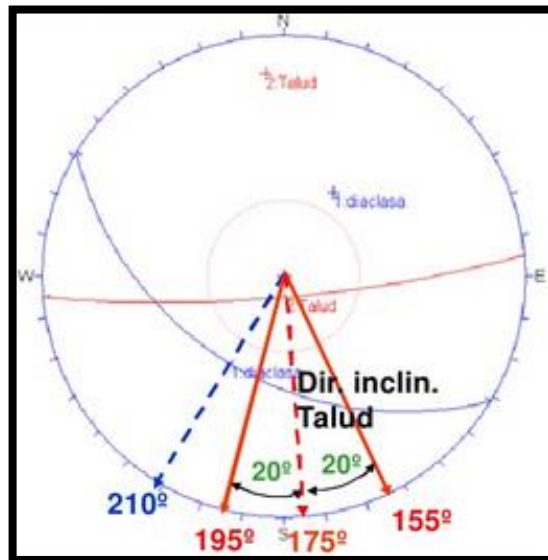


Fuente: Presentación, Geología estructural e interpretación de datos, estabilidad de taludes, Ing. Msc. Jairo Martin Espitia.

- Cuando la inclinación de la superficie de falla (α) sea mayor que el ángulo de fricción interna (Φ) a lo largo de la discontinuidad, representado por:

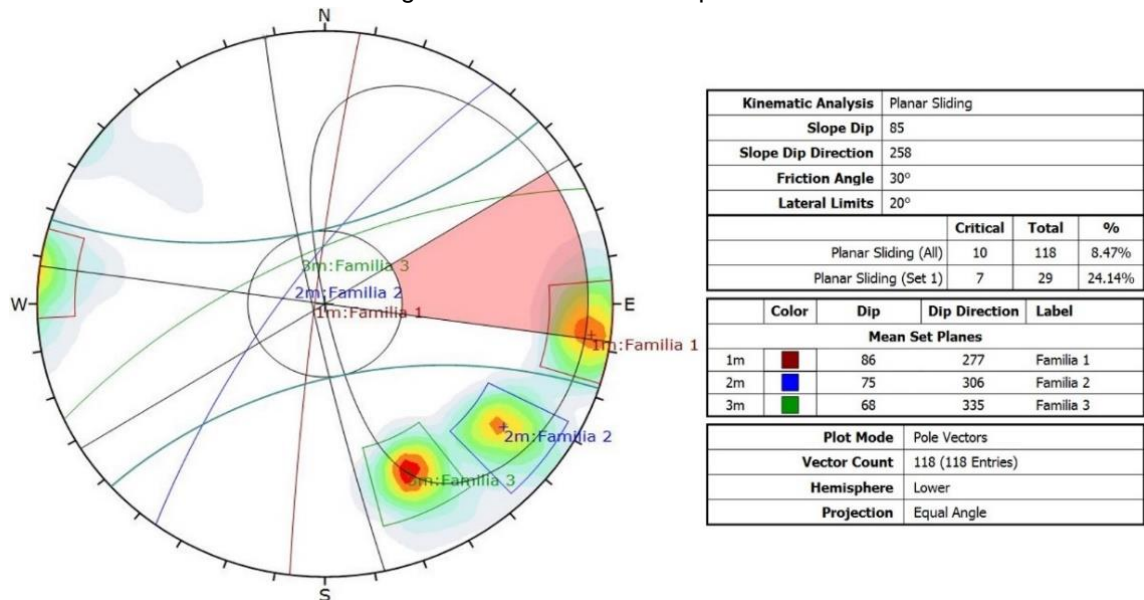
$$\alpha > \Phi$$
- La tolerancia o los límites laterales en los que se puede generar está es de 20° en la dirección de inclinación del talud.

Figura 52: esquema inclinación de talud vs estratos.



Fuente: Presentación, Geología estructural e interpretación de datos, estabilidad de taludes, Ing. Msc. Jairo Martin Espitia.

Figura 53: Análisis de falla planar.



Fuente: El estudio.

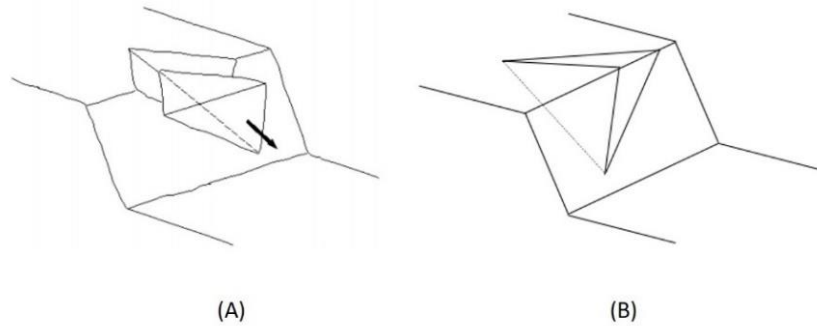
Mediante el análisis de falla planar se determinó que la Familia 1 se encuentra en parte dentro de la zona de falla crítica, pero no cumple la condición de falla planar, debido a que el buzamiento de las discontinuidades tienen una inclinación superior a 80° concordando con el ángulo de inclinación del talud, por tanto se determinó que no es posible la falla planar en las discontinuidades medidas.

Mecanismo de falla por cuña: La rotura en cuña es un tipo de deslizamiento translacional que está controlado por dos o más discontinuidades (estratificación, esquistosidad, diaclasas, fallas, etc). Este tipo de deslizamientos generalmente se dan en macizos rocosos resistentes, con discontinuidades bien marcadas.⁶³

La cuña al estar formada por la intersección de dos planos de discontinuidades puede ser de dos tipos dependiendo de la orientación de dichas discontinuidades, la primera se denomina cuña directa, cuando las discontinuidades llevan sentido diferente, y la segunda se denomina cuña inversa, y ocurre cuando las discontinuidades llevan la misma dirección en distinto ángulo de inclinación.

⁶³ R. O. Pedro, A. M. Leandro, *Mecánica de rocas: fundamentos e ingeniería de taludes*. E.T.S.I. Minas (UPM). Madrid. 2004. Pag. 298.

Figura 54: Tipos de cuña posibles.

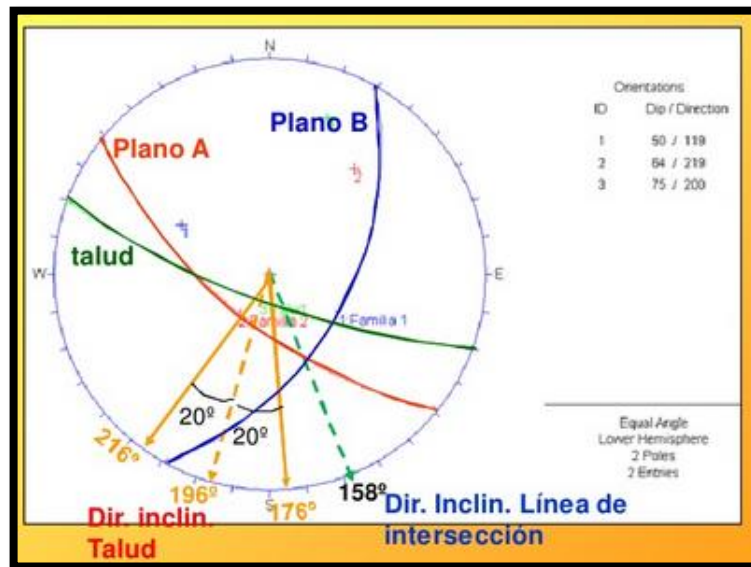


(A) Vista de una cuña directa, (B) Vista de una cuña inversa en perspectiva

Fuente: R. O. Pedro, A. M. Leandro, Mecánica de rocas: fundamentos e ingeniería de taludes.

La tolerancia o límites laterales tomados en este caso corresponden a 20° en la dirección del deslizamiento de la cuña respecto a la dirección de inclinación del talud.

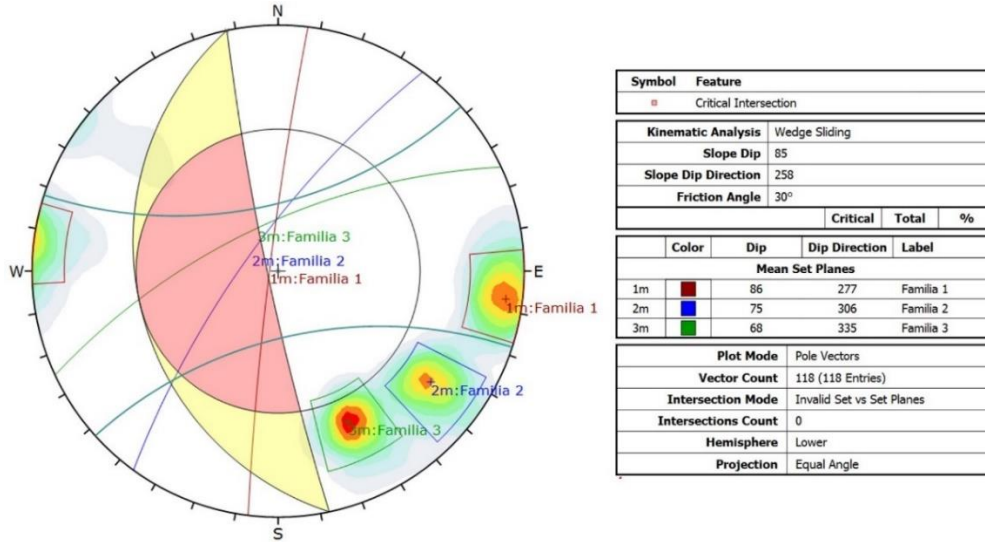
Figura 55: Representación estereográfica de la tolerancia de falla en cuña.



Fuente: Presentación, Geología estructural e interpretación de datos, estabilidad de taludes, Ing. Msc. Jairo Martin Espitia.

Mediante la interpretación en el software, de los datos correspondientes a dirección, inclinación del talud, y las discontinuidades medidas en campo se determinó que no es posible la falla en cuña en el macizo rocoso, debido a que la intersección de los planos mayores de las familias de discontinuidades, tienen direcciones alejadas de la zona crítica definida por la orientación, inclinación y cono de fricción del talud.

Figura 56: Análisis de falla en cuña.



Fuente: El estudio.

Según el análisis el porcentaje corresponde a 0%, esto se debe a la ubicación de la zona crítica, la cual se encuentra limitada en color rosa, donde no se determinó ninguna intersección de discontinuidades, por tanto según los datos en campo, se descarta este tipo de falla.

Mecanismo de falla por volteo: Las roturas por volteo de taludes aparecen principalmente cuando el rumbo del plano de discontinuidad: falla, estratificación, etc., coincide aproximadamente con el del plano del talud y además tiene un fuerte buzamiento hacia el interior del macizo rocoso. Cuando el macizo rocoso presenta un conjunto de paquetes que quedan en voladizo, se produce el vuelco por flexión (Figura 52.a.); además, se puede aparecer una familia de discontinuidades conjugada con la principal produciéndose en este caso un vuelco de bloques (Figura 52.b.) o un vuelco de bloques por flexión (Figura 52.c.).⁶⁴

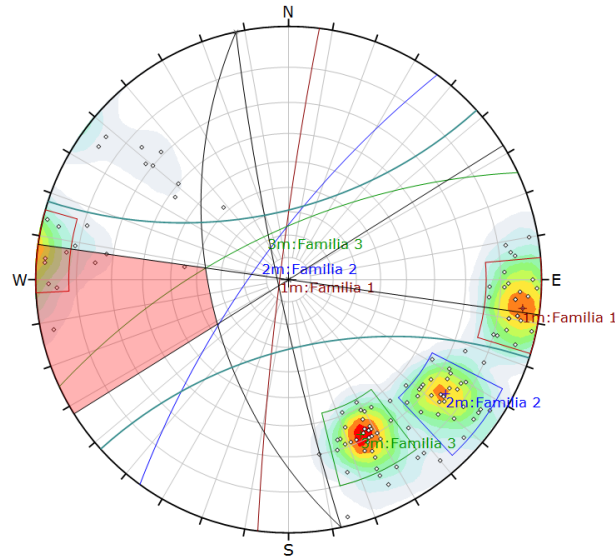
Figura 57: Tipos de rotura por vuelco.



Fuente: R. O. Pedro, A. M. Leandro, Mecánica de rocas: fundamentos e ingeniería de taludes.

⁶⁴ R. O. Pedro, A. M. Leandro, Mecánica de rocas: fundamentos e ingeniería de taludes. E.T.S.I. Minas (UPM). Madrid. 2004. Pag. 298.

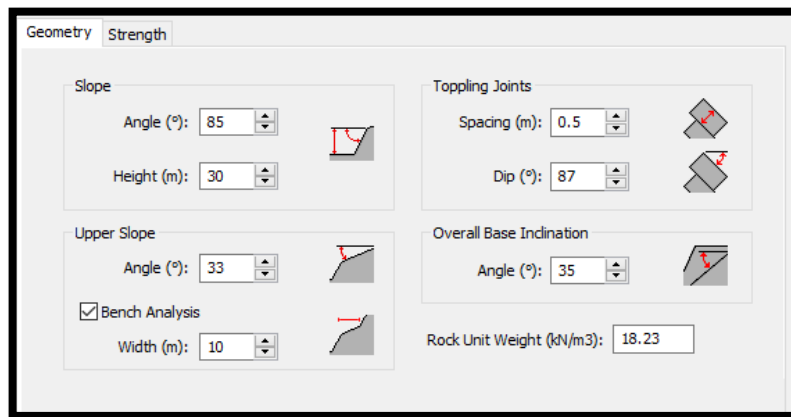
Figura 58: determinación de falla por volteo o toppling mediante Dips.



Fuente: El estudio.

Localmente mediante el análisis de discontinuidades se determinó que la familia 1 al tener ángulo de buzamiento superior a los 80 grados, en dirección oeste, puede presentar volteo de bloques, o por flexión de estratos, localizando polos dentro de la zona crítica de falla, por tanto se realiza el análisis de modelamiento mediante el software RocTopp (RocScience) donde se indican los siguientes parámetros de la roca:

Figura 59: Parámetros de modelación mediante RocTopp.



Fuente: El estudio.

Donde:

Angle Slope: ángulo con respecto a la horizontal de inclinación del talud.

Height slope: altura del talud medido en metros.

Upper Slope Angle: ángulo con respecto a la horizontal medido en grados de la cara superior del talud.

Toppling Joins Spacing: distancia promedio entre bloques generados por el plano de estratificación o en este caso por la familia de discontinuidades.

Toppling Joins Dip: Corresponde al ángulo de inclinación de los bloques generados por los planos de discontinuidad.

Overall Base Inclination: base inclinada necesaria para que se genere el volteo, este parámetro en este caso 35° tiene relación directa con la cara superficial del talud y su ángulo, cuya diferencia es mínima.

Rock Unit Weight: peso unitario del material determinado mediante el ensayo de propiedades físicas, en kN/m³.

El análisis de factor de seguridad por volteo se realizó mediante los parámetros del mecanismo de falla de Mohr-Coulomb, para este estudio se requiere conocer los datos correspondientes al ángulo de fricción descrito mediante el ensayo de tilt test, cuyo valor promedio de las muestras es de 39,1°, la cohesión para materiales granulares como areniscas de este tipo por lo general tienden a cero, en este caso se asumió un valor cercano a este, correspondiente a 84 kPa o 0.9 Kg/cm².

Para el análisis pseudoestático es necesario tener cuenta los coeficientes de aceleración sísmica horizontal (A_h) y vertical (A_v), siendo 0.35 y 0.30 respectivamente, parámetro el cual se tomó como 2/3 del valor dado por la norma NSR-10 como factor de corrección.

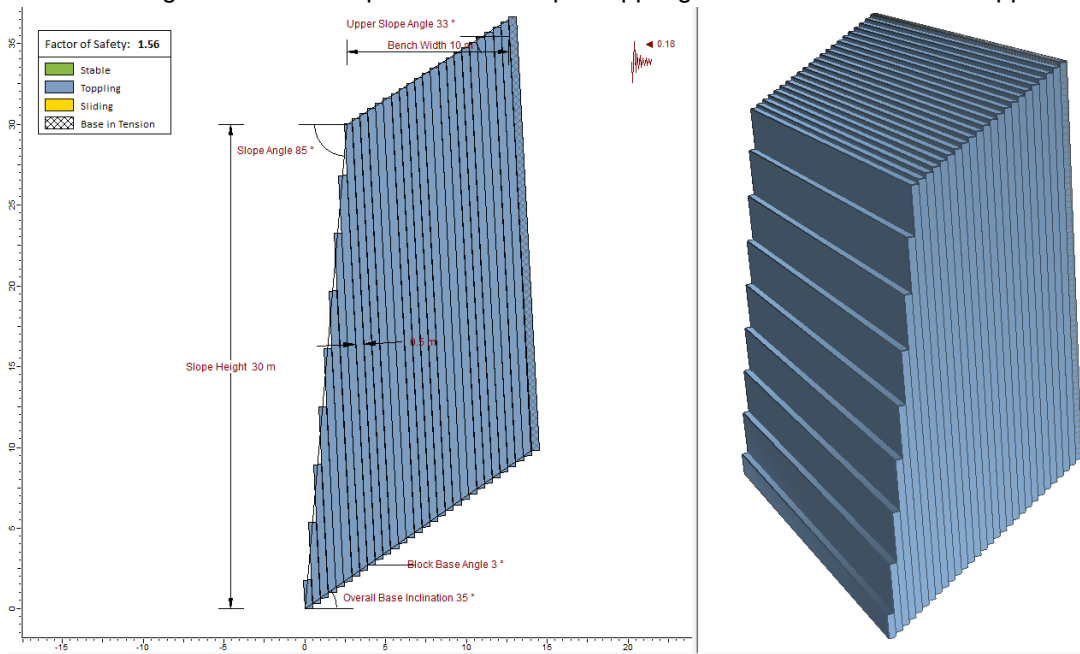
Figura 60: Coeficientes de aceleración sísmica para el departamento de Boyacá.

Departamento de Boyacá						
Municipio	Código Municipio	A_h	A_v	Zona de Amenaza Sísmica	A_e	A_d
Tunja	15001	0.20	0.20	Intermedia	0.15	0.07
Almeida	15022	0.25	0.25	Alta	0.16	0.08
Aquitania	15047	0.25	0.30	Alta	0.16	0.08
Arcabuco	15051	0.20	0.20	Intermedia	0.09	0.05
Belén	15087	0.25	0.25	Alta	0.16	0.08
San José de Pare	15664	0.15	0.20	Intermedia	0.11	0.06
San Luis de Gaceno	15667	0.35	0.30	Alta	0.16	0.07
San Mateo	15673	0.25	0.25	Alta	0.16	0.08

Fuente: Título A, NSR-10.

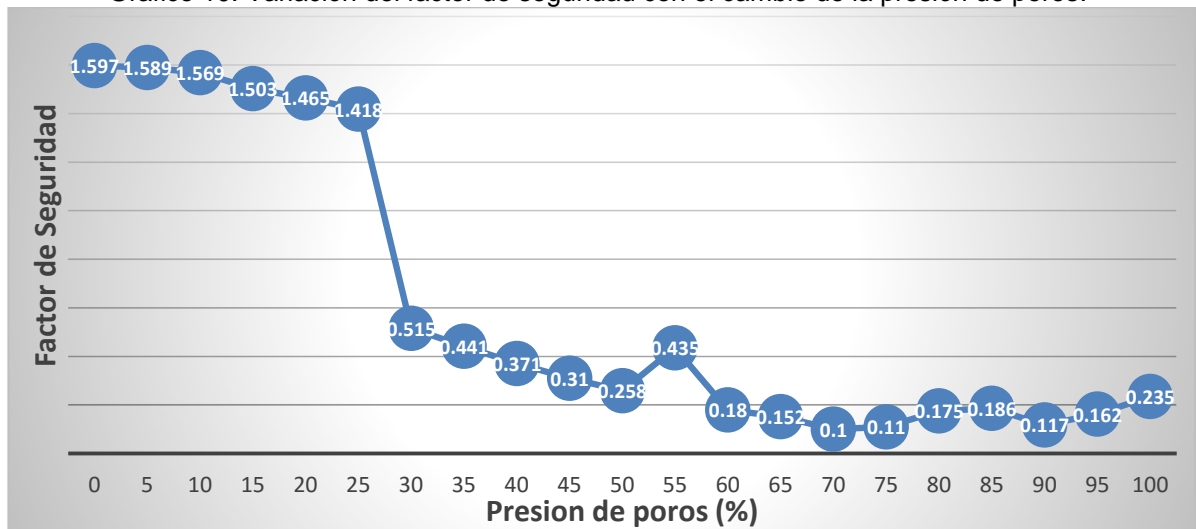
En el primer escenario de modelación mediante el software, se obtuvo un factor de seguridad aceptable de 1.56, donde se asume la roca sin presión de poros. Posteriormente se implementó la presión de poros al análisis, donde se asignaron valores en porcentaje de 0 a 100% aumentando cada 5%. Los resultados de la variación del estudio se plasman en el Gráfico 10.

Figura 61: Análisis pseudoestático por toppling o volteo mediante RocTopple.



Fuente: El estudio.

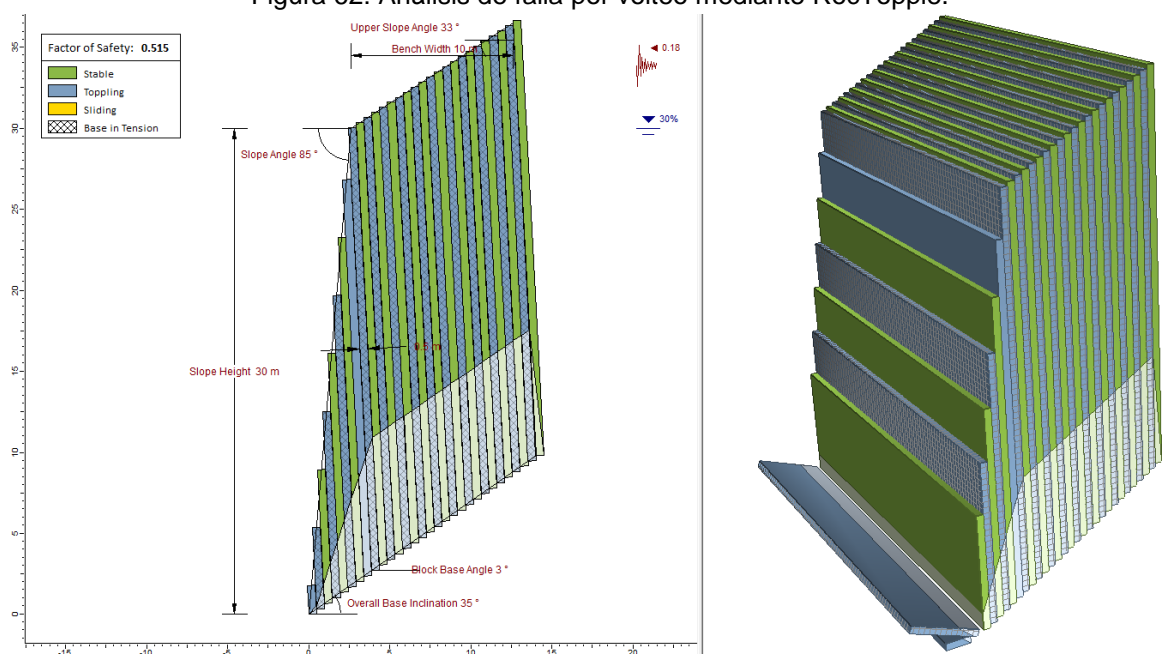
Grafico 10: Variación del factor de seguridad con el cambio de la presión de poros.



Fuente: El estudio.

En el Grafico 10 se determinaron los diferentes factores de seguridad mediante análisis pseudoestático, donde un factor de seguridad inferior a 1,2 se interpreta como condición de falla para cortes en taludes viales. Por tanto el talud al someterse a una presión de poros superior al 25% se encuentra en condición de falla por volteo, y el análisis con la presión de poros al 100% determino un factor de seguridad de 0.235, valor muy por debajo de los límites aceptables.

Figura 62: Análisis de falla por volteo mediante RocTopple.



Fuente: El estudio.

8.3.2 Análisis estructuralmente no controlado

8.3.2.1 Modelamiento geológico

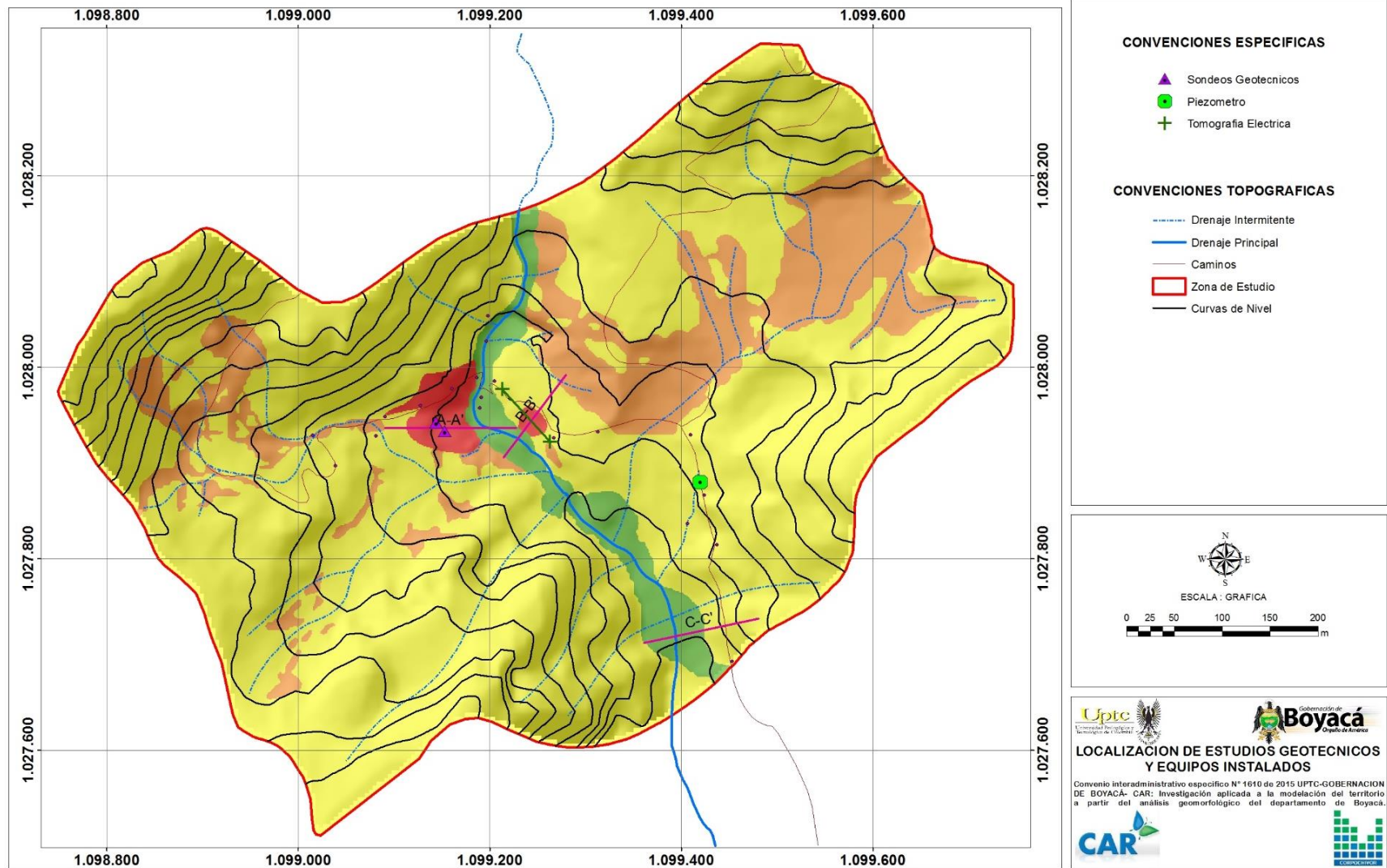
Para la realización del análisis de estabilidad, se plantearon 3 perfiles geotécnicos y litológicos, indicando las características intrínsecas del terreno (Ver Tabla 63), en los sectores delimitados en la zonificación de amenazas como amenaza alta a muy alta, y las zonas delimitadas por parte de la Corporación Autónoma Regional de Chivor (CORPOCHIVOR) como zonas de prioridad, los perfiles geológicos se describen a continuación:

Tabla 63: Perfiles geotécnicos planteados

Perfil	Punto	Coordenadas	
		Este (m)	Norte (m)
A-A'	A	1099090	1027936
	A'	1099227	1027936
B-B'	B	1099279	1027981
	B'	1099214	1027906
C-C'	C	1099480	1027737
	C'	1099410	1027722

Fuente: El estudio.

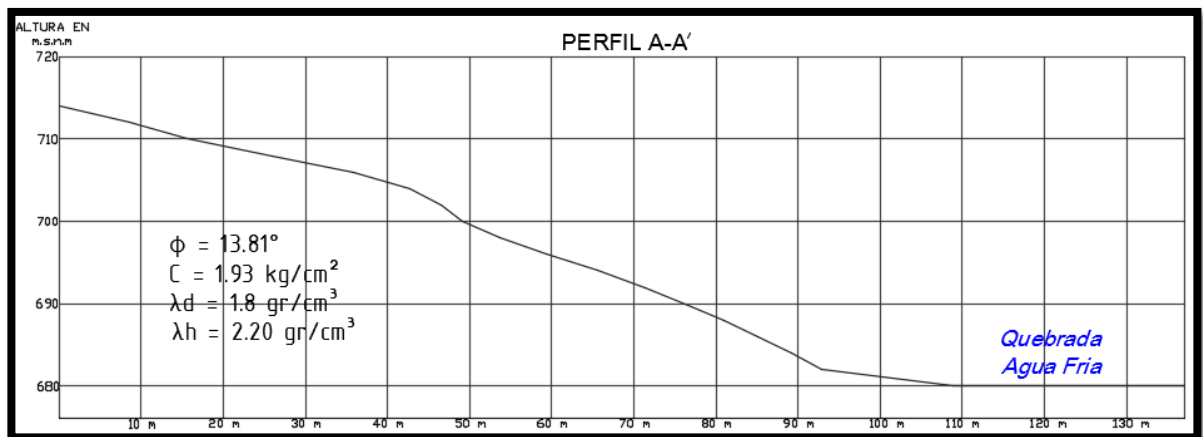
Figura 63: Ubicación de perfiles, estudios geotécnicos y equipos.



Fuente: El estudio.

Perfil 1: el perfil 1 (A-A') corresponde a la zona comprendida entre las coordenadas descritas en la tabla 63, cuyos parámetros físicos y mecánicos asignados se determinaron mediante dos sondeos geotécnicos realizados por la Corporación Corpochivor, los cuales determinaron una misma capa arcillo-arenosa con fragmentos rocosos característicos del depósito coluvial presente en esta zona, por tanto se determinó un valor promedio de los ensayos realizados a las muestras de estos dos sondeos para realizar el análisis estructuralmente no controlado en este sector.

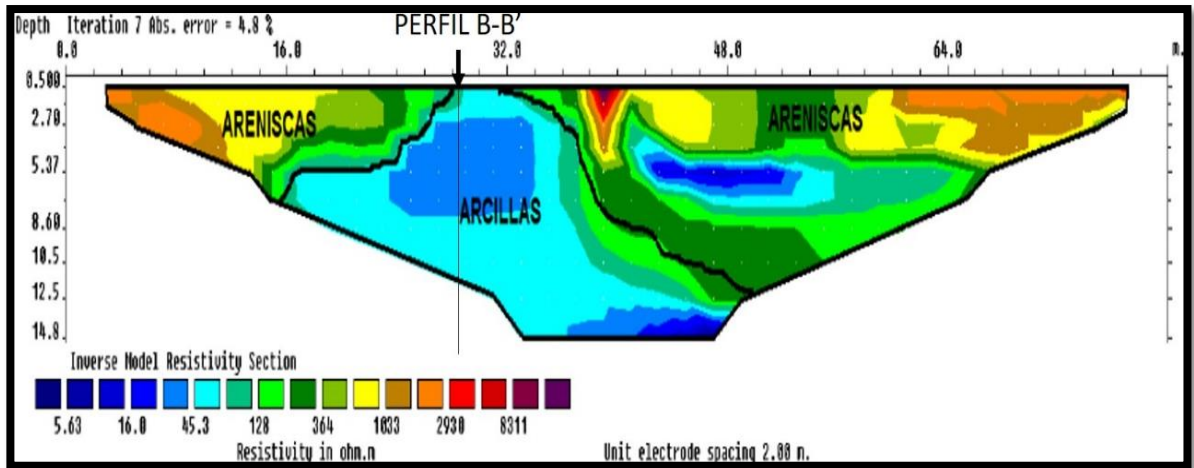
Figura 64: Perfil A-A'



Fuente: El estudio.

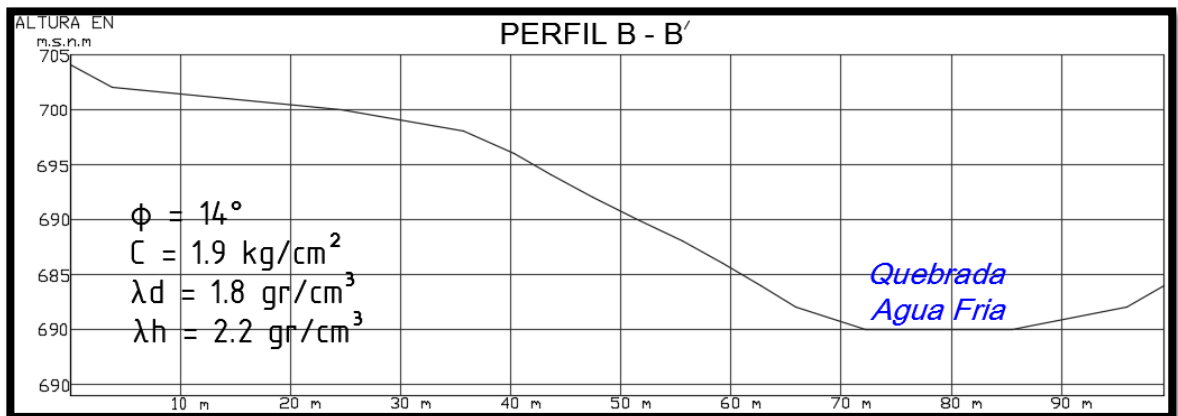
Perfil 2: mediante el análisis de la información geoelectrica, la interpretación de la información concluyo un perfil litológico correspondiente a la zona del perfil 2 (B-B'), el cual está ubicado perpendicular a la dirección de registro de la tomografía eléctrica realizada por la Corporación (Corpochivor), el lugar donde corta el perfil B-B' con la tomografía eléctrica corresponde a la zona delimitada por arcillas, dentro del depósito de tipo coluvial mencionado en el Capítulo 2. La información geoelectrica al ser un método indirecto no permite la determinación directa de parámetros físicos y mecánicos de los materiales, pero puede determinar de acuerdo a los rangos de resistividad aparente de los materiales, las litologías presentes en la zona, por tanto en la zona comprendida como arcillas, se asumieron los mismos datos parámetros de resistencia al corte y propiedades físicas las cuales tienen similares características por presentarse sobre el mismo deposito coluvial en ladera, a distancia cercana del perfil 1.

Figura 65: Interpretación de resistividad mediante estudio tomografico.



Fuente: El estudio.

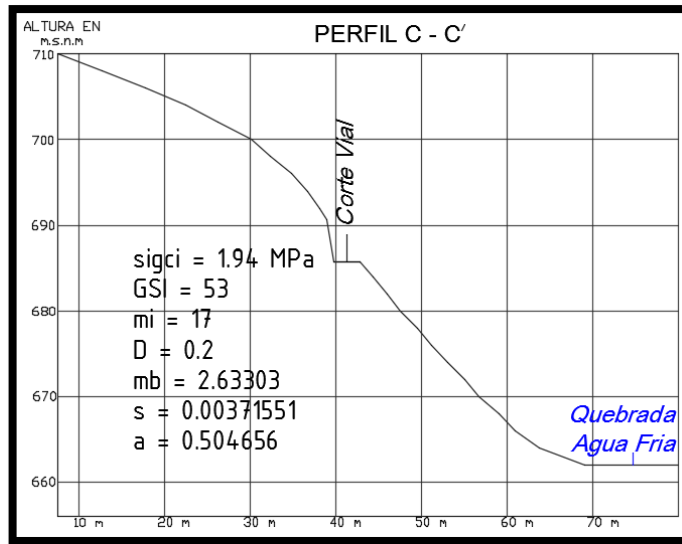
Figura 66: Perfil B-B'



Fuente: El estudio.

Perfil 3: Mediante los datos obtenidos en los ensayos de laboratorio y parámetros hallados en campo, se determinaron las propiedades físicas y mecánicas de los materiales correspondientes al talud en roca de arenisca sobre la Formación Areniscas Del Limbo (Tearl).

Figura 67: Perfil C-C'.



Fuente: El estudio.

8.3.2.2 Análisis de estabilidad

Tiene como finalidad verificar las condiciones actuales de estabilidad de la Vereda El Cairo, mediante la exploración del terreno de forma directa e indirecta, al ser una zona compuesta por diferentes movimientos se realizaron diferentes análisis de estabilidad donde se describen los cálculos de equilibrio límite.

Modelamiento del comportamiento hidráulico:

Respecto al agua subterránea, se consideró su efecto con el coeficiente Ru , coeficiente que se define como:

$$Ru = \frac{u}{\sigma_v}$$

Donde:

u : Presión de poros en la base de la dovela

σ_v : Esfuerzo vertical total en la base de la dovela

El coeficiente Ru se expresa en rangos, siendo cero el valor mínimo correspondiente a terrenos secos y 0,5 el valor correspondiente a terrenos saturados.

Análisis por el método de equilibrio límite:

Se describe en términos de factor de seguridad (F.S) el cual se asume es el mismo en todo el plano de falla, o un promedio total del valor de la superficie, se expresa como:

$$FS = \frac{\text{Fuerzas Resistentes}}{\text{Fuerzas Actuantes}}$$

Mediante este método se procede a realizar el análisis de estabilidad mediante el software Slide (RocScience), con los métodos Bishop simplificado, Janbú simplificado y Janbú corregido, también se realizó el análisis pseudoestático, donde con los valores de aceleración sísmica descritos en la Figura 74, se determinó el componente sísmico, cuyo ajuste se describe de la siguiente manera:

Tabla 64: Coeficientes de reducción de aceleración sísmica.

MATERIAL	Kts/amax Mínimo	Análisis de Amplificación Mínimo
Suelos enrocados y macizos rocosos muy fracturados (RQD<50%)	0,8	Ninguno
Macizos rocosos (RQD>50%)	1	Ninguno
Todos los materiales térreos	0,67	Amplificación de onda unidimensional en dos columnas
Todos los materiales térreos	0,5	Amplificación de onda bidimensional

Fuente: Tabla H.5.2-1 Título H NSR – 2010.

Teniendo en cuenta el material completamente terreo con amplificación de onda bidimensional se tiene un factor de reducción de 0,5:

$$K = Kst * A_a = 0.5 * 0.35 = 0.175 \approx 0.18$$

$$K = Kst * A_v = 0.5 * 0.30 = 0.15$$

8.3.2.3 Resultados

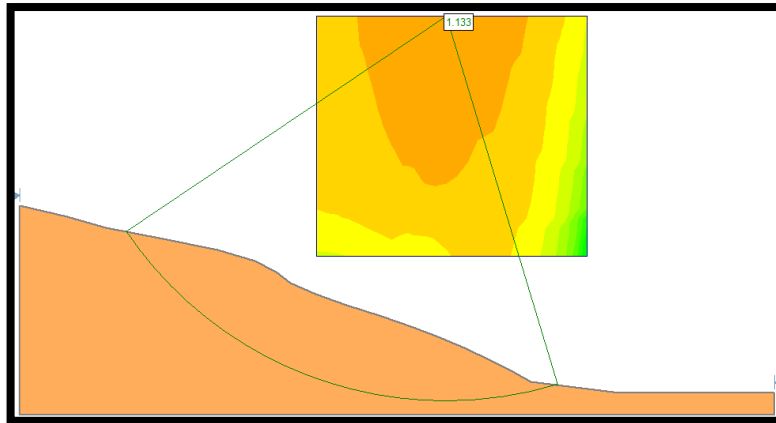
Perfil A-A': Bajo condiciones normales cuenta con un factor de seguridad muy próximo a 1, lo cual es un valor muy bajo, comprobando el movimiento identificado en campo, en la Tabla 65 se anexan los resultados en cada uno de los métodos descritos.

Tabla 65: Resultados del análisis de estabilidad en el corte A-A.'

Condición	Seco	Normal	Critica	Saturado	Análisis Pseudoestático
Ru	0	0,1	0,3	0,5	0,5 + Sismo
Bishop Simplificado	1,113	1,04	0,866	0,688	0,476
Janbú Simplificado	1,045	0,956	0,791	0,624	0,425
Janbú Corregido	1,118	1,023	0,846	0,669	0,455

Fuente: El estudio.

Figura 68: Análisis de estabilidad $R_u=0$ en el corte A-A'.



Fuente: El estudio.

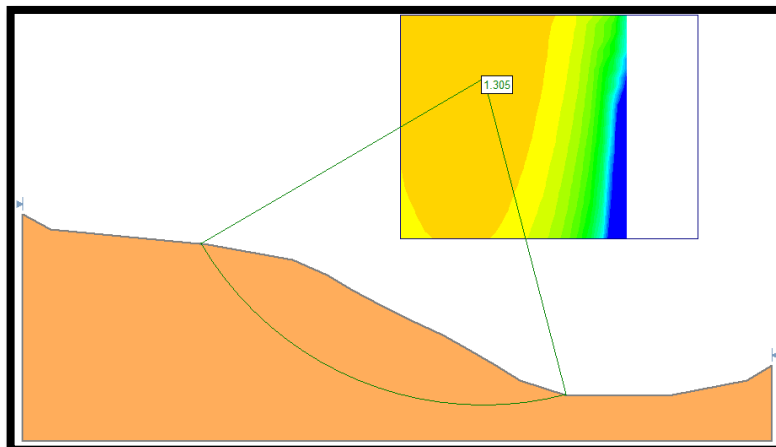
Perfil B-B': Bajo condiciones secas y normales, en promedio el factor de seguridad (FS) supera el valor de 1,2 lo que corresponde a un valor aceptable en taludes, pero en condiciones críticas, saturadas y mediante el análisis Pseudoestatico el factor de seguridad es inferior a 1, por tanto el sistema se encuentra en condición de falla bajo estas condiciones.

Tabla 66: Resultados del análisis de estabilidad en el corte B-B'.

Condición	Seco	Normal	Crítica	Saturado	Análisis Pseudoestatico
Ru	0	0,1	0,3	0,5	0,5 + Sismo
Bishop Simplificado	1,305	1,221	1,046	0,868	0,608
Janbú Simplificado	1,209	1,125	0,954	0,781	0,538
Janbú Corregido	1,296	1,208	1,027	0,843	0,579

Fuente: El estudio.

Figura 69: Análisis de estabilidad $R_u=0$ en el corte B-B'.



Fuente: El estudio.

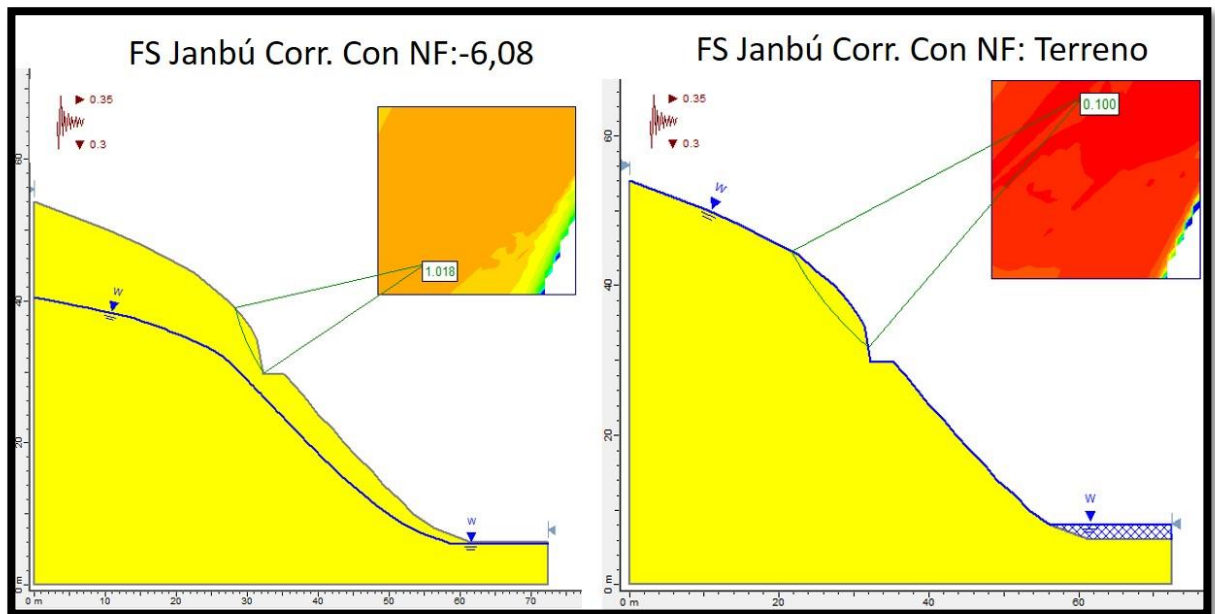
Perfil C-C': En este perfil, la zona de falla crítica corresponde al talud abierto por el trazado de la vía que comunica la Vereda El Cairo con el casco urbano del Municipio de San Luis De Gaceno, por tanto en los factores de seguridad determinados se observa, que la variación de este valor se presenta únicamente cuando el nivel freático supera el nivel base del talud tanto en análisis con el factor sismo o sin él.

Tabla 67: Factores de seguridad del corte C-C'

N.F.	Método de análisis			pseudostático (Sismo)			Observ.
	Bishop Simp.	Janbú Simp.	Janbú Corr.	Bishop Simp.	Janbú Simp.	Janbú Corr.	
6,08	1,861	1,785	1,894	1,037	0,996	1,018	N.F. Mínimo medido
4,05	1,861	1,785	1,894	1,037	0,996	1,018	N.F. Máximo medido
0	0,134	0,131	0,134	0,1	0,088	0,091	Nivel Terreno
Sin N.F	1,861	1,785	1,894	1,037	0,996	1,018	condición seca

Fuente: El estudio.

Figura 70: Determinación del factor de seguridad FS mediante Slide.



Fuente: El estudio.

9. PLAN DE MONITOREO

El monitoreo tiene como objetivo realizar un seguimiento al comportamiento de zonas inestables o deslizamientos, mediante la instrumentación de diferentes tipos y así lograr determinar algunos parámetros geotécnicos los cuales determinan los posibles mecanismos de falla presentes.

Anterior al presente estudio, en La Vereda El Cairo, se instalaron equipos de medición piezométrica y topográfica, de los cuales se identificaron falencias en la toma de datos y la frecuencia de las mediciones, por tanto se plantea un plan de monitoreo que permita determinar la evolución de los movimientos en el tiempo.

9.1 EQUIPOS INSTALADOS

9.1.1 Equipos de medición de desplazamiento

En el área de estudio, para la medición del desplazamiento del terreno se cuenta con 5 puntos fijos (mojones) en las siguientes coordenadas

Tabla 68: Descripción de mojones en el área de estudio.

Municipio	Sector	Nombre Mojón	Coordenadas	
			Este	Norte
San Luis De Gaceno	El Cairo	M49	1099425,51	1027814,81
San Luis De Gaceno	El Cairo	M51	1099434,84	1027787,51
San Luis De Gaceno	El Cairo	M52	1099412,71	1027850,95
San Luis De Gaceno	El Cairo	M53	1099389,85	1027917,41
San Luis De Gaceno	El Cairo	M54	1099401,13	1027886,38

Fuente: Mejorar la capacidad de respuesta de la comunidad ante emergencias por fenómenos de remoción en masa en los municipios de Garagoa, La Capilla, San Luis de Gaceno, Santa María, Sutatenza y Tenza, de la jurisdicción de corpochivor.

9.1.2 Equipos de medición de niveles freáticos

Se realizó la perforación e instalación de un equipo de observación piezométrica, la cual determina la profundidad a la que se encuentra la tabla de agua (nivel freático), las características del equipo se especifican en el Anexo F-1.

Fotografía 11: Piezómetro en la Vereda El Cairo,Coordenadas: E: 1'099.418; N: 1'027.880.



Fuente: El estudio.

9.2 ANALISIS Y PROCESAMIENTO DE LA INFORMACION DE MONITOREO

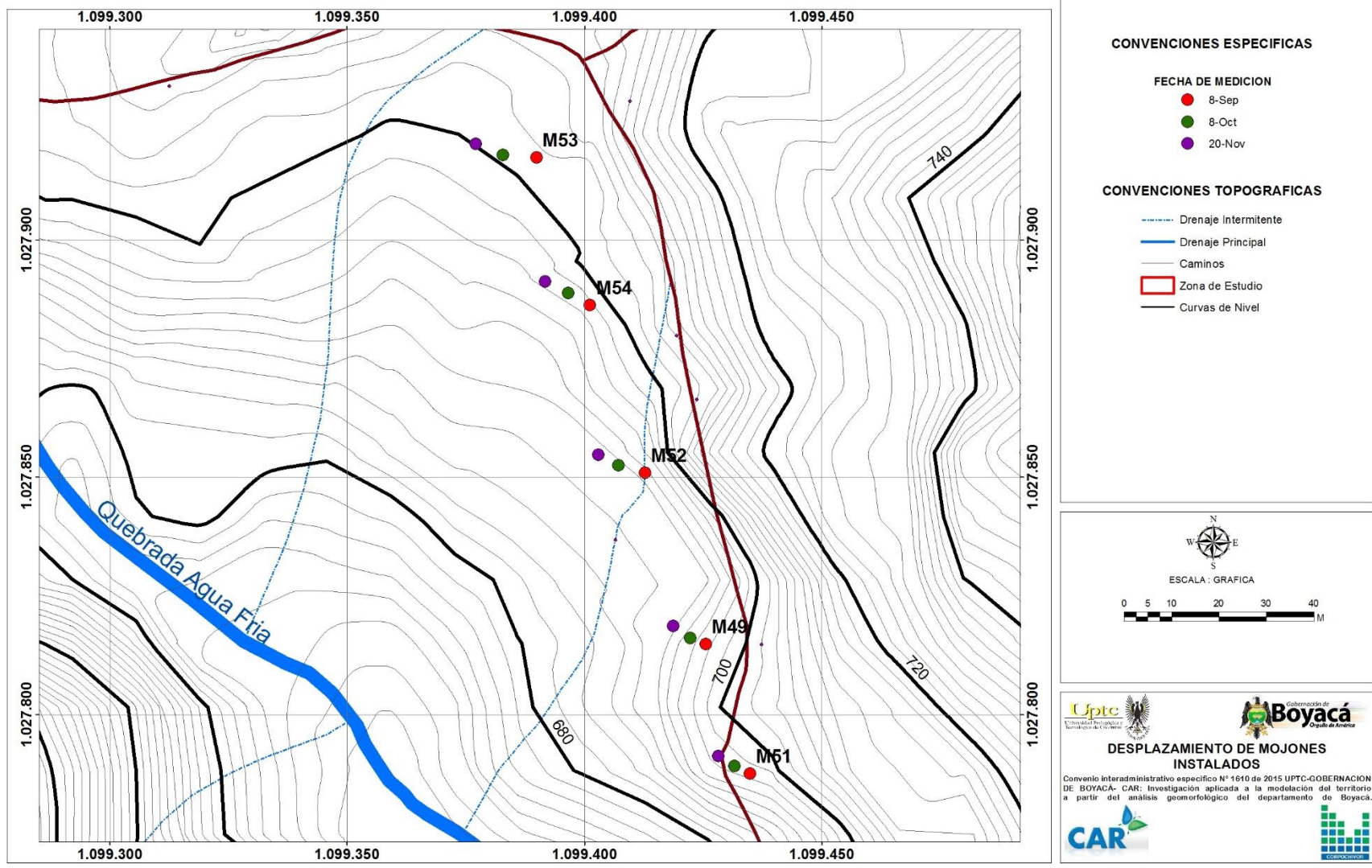
Vectores de desplazamiento: Según las mediciones realizadas, se cuenta con 3 valores de desplazamiento de mojones, en periodos mensuales, donde los valores muestran un desplazamiento acelerado correspondiente a un rango de 0.1 a 0.18 m por día. El movimiento analizado aumenta progresivamente la tasa de desplazamiento hacia la zona norte, en la Tabla 69 se especifican los movimientos y su dirección.

Tabla 69: Control de mojones en San Luis De Gaceno.

X	Y	Fecha	Mojón	Desp. Este (m)	Desp. Norte (m)	Desp. Neto (m)	Desp. Total.	Dirección desplazamiento	desplazamiento total por día (m)
1099434,84	1027787,51	8-sep	M54	0	0	0		-	
1099425,51	1027814,81	8-sep	M53	0	0	0		-	
1099412,71	1027850,95	8-sep	M49	0	0	0		-	
1099401,13	1027886,38	8-sep	M51	0	0	0		-	
1099389,85	1027917,41	8-sep	M52	0	0	0		-	
1099431,63	1027789,13	8-oct	M54	3,21	1,62	3,6		NW	
1099422,21	1027816,1	8-oct	M53	3,3	1,29	3,5		NW	
1099407,13	1027852,51	8-oct	M49	5,58	1,56	5,8		NW	
1099396,53	1027888,89	8-oct	M51	4,6	2,51	5,2		NW	
1099382,82	1027918	8-oct	M52	7,03	0,59	7,1		NW	
1099428,21	1027791,29	20-nov	M54	3,42	2,16	4,0	7,6	NW	0,10
1099418,69	1027818,68	20-nov	M53	3,52	2,58	4,4	7,9	NW	0,11
1099402,86	1027854,79	20-nov	M49	4,27	2,28	4,8	10,6	NW	0,15
1099391,7	1027891,3	20-nov	M51	4,83	2,41	5,4	10,6	NW	0,15
1099377,02	1027920,28	20-nov	M52	5,8	2,28	6,2	13,3	NW	0,18

Fuente: Mejorar la capacidad de respuesta de la comunidad ante emergencias por fenómenos de remoción en masa en los municipios de Garagoa, La Capilla, San Luis de Gaceno, Santa María, Sutatenza y Tenza, de la jurisdicción de Corpochivor.

Figura 71: Control de desplazamiento de mojones.



Fuente: El estudio.

Control Piezométrico: La información correspondiente a la medición de nivel freático, tiene concordancia con los registros de precipitación, se evidencia disminución de nivel durante los días de precipitación baja o nula, y aumento de nivel durante los días de precipitación, por tanto se determinó que la información piezométrica es válida (Ver Anexo F-2).

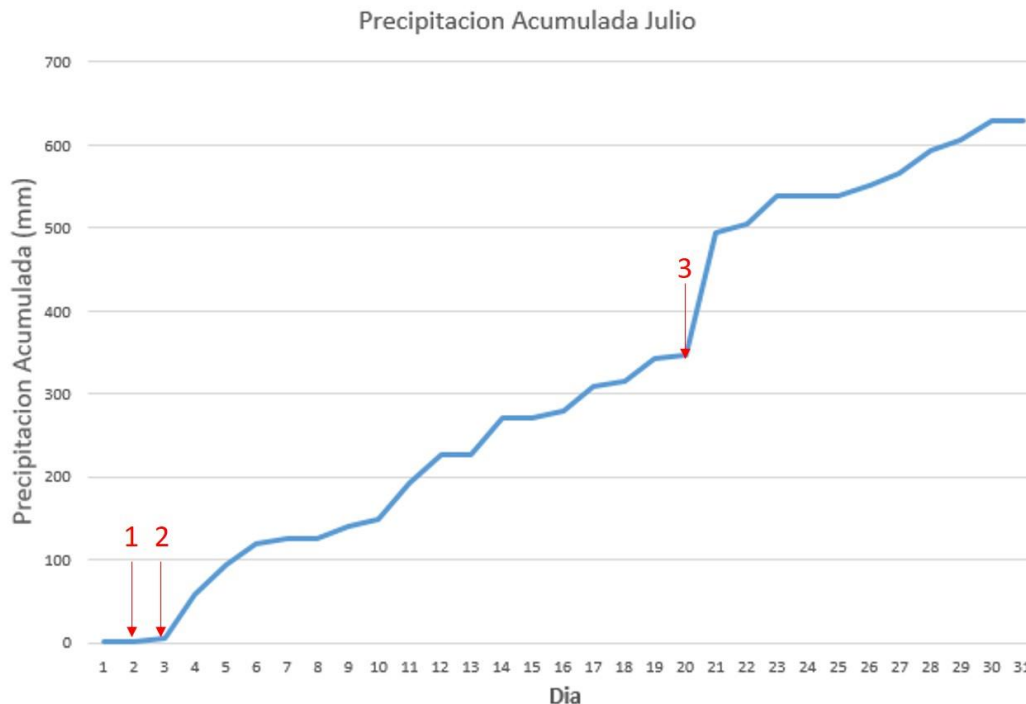
Se evidencia en las mediciones piezométricas la aleatoriedad de la toma de datos, donde en el mes de julio se realizaron 3 mediciones piezométricas, 2 de estas en días consecutivos, lo cual representa una redundancia de información, con un dato cuya variación corresponde a 0,02 metros en profundidad de la tabla de agua, mientras que en los meses de septiembre y noviembre se recolecto únicamente un dato mensual (Ver Tabla 70).

Tabla 70: Comparación de precipitación acumulada y N.F.

DIA	PRECIPITACION ACUMULADA (mm)						MEDICION N.F. (m)					
	JULIO	AGOST	SEPT	OCTUB	NOV	DIC	JULIO	AGOST	SEPT	OCTUB	NOV	DIC
1	1,7	0,5	42,8	2,8	11,3	6,8						
2	1,7	6,1	50,8	16	11,7	9,4	4,36					5,38
3	6,5	71,5	50,8	21,9	20,4	21,3	4,32					
4	59,2	72,1	51,6	35,6	23	21,3		4,56				
5	93,8	76,4	90,7	35,6	72	21,3			4,27	5,82		
6	120,4	97,7	98,8	35,6	72,4	21,3						
7	125	121,1	98,8	45,6	85	21,3						
8	125	122,7	124,3	45,6	91,3	21,3						
9	139,7	122,7	199,1	45,6	93,1	21,3					4,38	
10	148	130,3	228,1	47,6	94,2	21,3						
11	193,3	163,4	232	109	94,2	21,3						
12	226,8	215,4	232	125,9	94,2	21,3						
13	226,8	220,4	232	125,9	119,6	21,3				4,25		
14	271	230,5	247	130,3	128,2	24,9						5,68
15	271	239,8	247	138,2	143	26,1						
16	279,5	274	269	159,2	143	42,7						
17	309,9	279,8	269,1	162,8	159,3	73,8						
18	315,3	308	269,1	187	159,3	81,4						
19	341,8	308	336,3	199,3	178,2	81,6				4,05		
20	346	318,4	336,3	199,3	180,1	81,6						
21	494	326,4	336,3	199,3	180,6	81,6	4,41					
22	504	327,5	347,3	221,4	188,2	89,4						
23	538,2	342,5	347,3	238,6	216,5	89,4						
24	538,2	347	347,3	309,7	218	89,4		4,65				
25	538,2	370,6	347,3	321,2	218	89,4						
26	550,6	370,6	347,3	326,7	218	89,4						
27	566,2	376,9	347,3	334,5	218	89,4						
28	592,7	376,9	348	334,5	218	89,4						
29	605	379,8	352,3	334,8	244,2	90,7						
30	630,2	379,8	356,5	334,8	244,3	115						
31	630,2	406,5		334,8		129,7						

Fuente: El estudio.

Figura 72: Precipitación acumulada Julio/2015 y localización de monitoreo.



Fuente: El estudio.

Se aprecia en la figura 70 las 3 mediciones registradas durante el mes de Julio de 2015 donde la variación entre las mediciones 1 y 2 varían con un aumento, debido a la precipitación baja el día 3 de Julio y en la medición 3 una disminución del nivel debido al tramo casi horizontal de la recta en ese punto, producto de bajas o nulas precipitaciones los días anteriores.

9.3 PROPUESTA DE PLAN DE MONITOREO

Para realizar la planeación de un programa de instrumentación y monitoreo es necesario determinar el tipo de medición que se requiere, corroborar la validez de las teorías propuestas del comportamiento de los movimientos y la cuantificación de los procesos dinámicos de estos.

9.3.1 Control topográfico de los movimientos

Instalación de equipos: Se requiere monitorear las zonas comprendidas por los movimientos en masa analizados en el presente estudio, por tanto se plantea:

- instalación de mojones de control topográfico en las zonas descritas como movimientos en masa, cuya distribución adecuada corresponde a la ubicación de

líneas transversales a la dirección del movimiento, tanto en la parte alta como baja e intermedia de este.

- Localizar los sitios estables para la colocación de puntos de referencia, estos sitios deben estar sobre roca o suelo estable fuera del área delimitada como movimientos en masa o amenaza alta de ocurrencia de estos.
- Localizar los puntos de origen de coordenadas estableciendo la sesión de amarre de los mojones definidos como puntos de referencia con las bases permanentes del IGAC más cercanas, en la Tabla 71 se sugieren los puntos de origen y el tiempo de rastreo mínimo.

Tabla 71: Estaciones de origen de coordenadas permanentes y tiempo de rastreo sugerido.

Estación	Distancia (Km)	T Rastreo	Operando
GARA	33	1h53m	Si
TUNA	79	4h12m	Si
ABPW	92	4h50m	Si
VIVI	97	5h5m	Si
BOGA	103	5h24m	Si
BOGT	103	5h24m	Si

Fuente: IGAC.

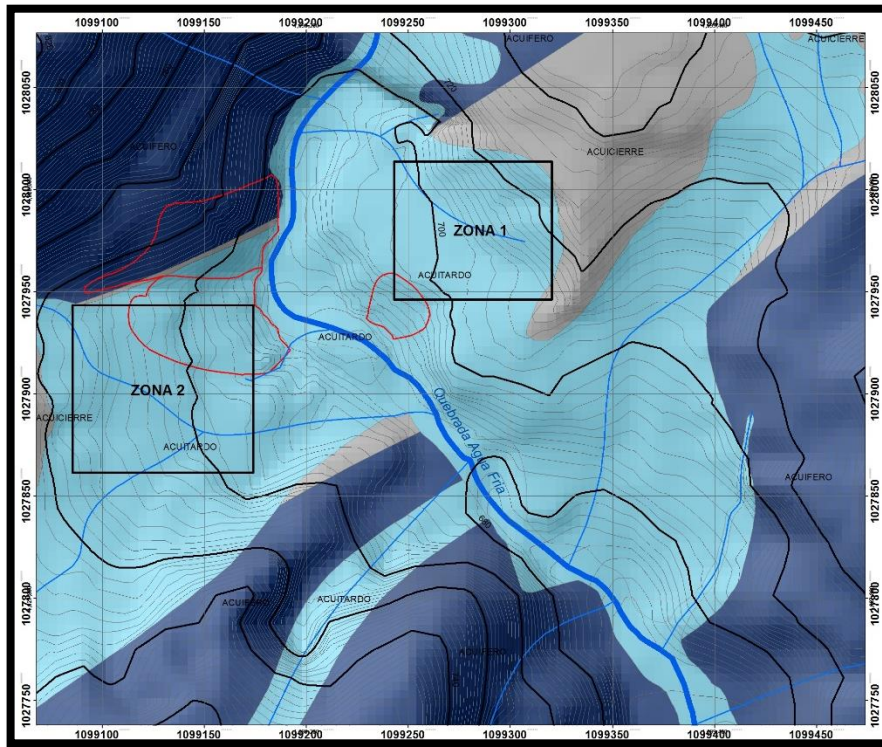
Captura y procesamiento de la información: Para la interpretación de la información de control topográfica de los mojones instalados previamente y los propuestos, se recomienda:

- Uso de equipos de precisión submétrica para la captura de coordenadas de los mojones.
- Certificados de calibración vigente a la fecha de la captura de datos.
- Uso de sistemas de coordenadas estándar y vigentes por el IGAC (MAGNA-SIRGAS).
- Captura de datos con un valor PDOP (Dilución de la precisión en la posición) máximo permitido por debajo de 5.

Se plantea igualmente en la Tabla 72 un ajuste del formato de captura de datos en campo que describe las características de la información requerida.

- Instalación de 1 piezómetro de observación como mínimo en los sectores comprendidos entre las coordenadas descritas en la Figura 71 (Zona 1 y Zona 2).

Figura 74: Zonas planteadas para instalación de piezómetros de observación.



Fuente: El estudio.

Captura y procesamiento de la información: Se requiere realizar la captura de datos piezométrico en periodos de tiempo equivalentes, por tanto es necesario determinar los tiempos y procedimientos para la medición, así como el procesamiento de los niveles medidos y se recomiendan los siguientes criterios:

- Realizar la toma de datos en periodos iguales, dos o tres mediciones mensuales.
- Especificar las condiciones meteorológicas de los días próximos a la medición.
- Repetir las mediciones en los meses siguientes en el mismo periodo de tiempo de los meses anteriores.
- En el caso de instalarse más piezómetros de observación, realizar la medición simultáneamente o en el menor lapso de tiempo posible entre mediciones.
- Realizar las mediciones de fluctuaciones de nivel freático en periodos iguales con el control topográfico.

10. METODOLOGIA DE SISTEMA DE ALERTA TEMPRANA POR DESLIZAMIENTOS

Mediante su programa de trabajo, la Corporación Autónoma Regional de Chivor tiene la necesidad de conocer, monitorear e intervenir ante la ocurrencia de movimientos en masa, los cuales tienen una afectación sobre las comunidades y la infraestructura de la cual disponen, es así como nace la necesidad de diseñar metodologías para determinar los factores que determinan los movimientos en masa, la metodología de sistema de alerta temprana por deslizamientos propuesta por Corpochivor se expone en este capítulo, y la aplicación a la zona de estudio como calibración del método.

10.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Por la condición estructural y genética del terreno sobre los que han sido construidos los municipios de la jurisdicción, éstos han generado diversos fenómenos de remoción en masa que al desgarrar generan amenaza y hacen vulnerable comunidades enteras e infraestructura regional. Al no existir método certero que permita activar un sistema de alerta temprana, salvo pareceres intuitivos, observaciones directas o descripciones del fenómeno de remoción en masa, una vez sucede el evento, es imprescindible acceder a un sistema de monitoreo de piezómetros y mojones con los que cuenta la Corporación, que permitirá definir un método de alerta pragmático que anticipa el evento, dando así la posibilidad de respuesta temprana por parte de las comunidades rurales y municipales.

10.2 DESCRIPION DEL METODO

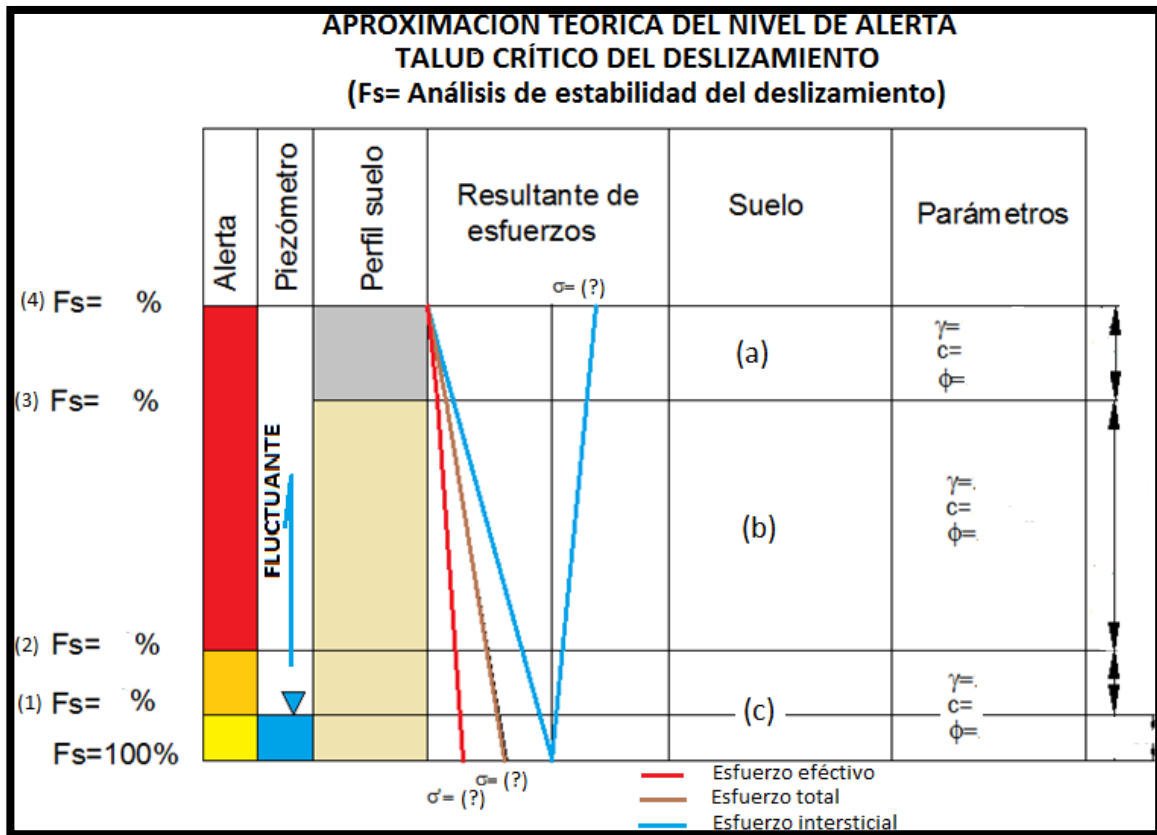
Para la determinación de los niveles de alerta, se toma el factor de seguridad como patrón diferenciador, este define la susceptibilidad de la amenaza, partiendo de su condición actual de estabilidad. En tal sentido, se construye el perfil de esfuerzos efectivos (σ') disponibles, que es inversamente proporcional al aumento de presión de poros generado por la presencia del agua (presión intersticial), para el que se construye un gráfico de aproximación teórica del nivel de alerta (Ver gráfico 11) y cuyo efecto implica de manera directa el factor de seguridad por cambio del nivel Piezométrico. En otras palabras, las fluctuaciones del nivel freático medido en campo definen la proporcionalidad en que el factor de seguridad aumenta o disminuye, determinando así estados de alerta para cuando se sobrepasa ciertos valores del factor de seguridad disponible.

Mediante la toma de lecturas, tanto de los cambios del nivel Piezométrico, como del desplazamiento de los mojones, al contar con un gran número de éstas, se hace un recálculo de los factores de seguridad con la información real obtenida, de los cuales

se hará una caracterización estandarizada que permita relacionarlos con los niveles de alerta específicos.

Con esta información se recalcula el factor de seguridad, si existe movimiento significa que el factor de seguridad a tomado un valor menor de 1, por lo tanto se ha encontrado un nivel freático para el cual se establece el nivel de alerta roja. Es importante aclarar que el nivel normal de alerta es amarillo (por tratarse de un deslizamiento) y que el procedimiento conlleva al establecimiento del nivel naranja (movimiento casi imperceptible) y el rojo (movimiento notorio).

Grafico 11: Aproximación teórica de nivel de alerta.



Fuente: Método de activación de un sistema de alerta temprana por deslizamientos, Corpochivor.

Instrumentación:

1. Piezómetros: Medición periódica del Nivel freático
2. Mojones: Medición de desplazamiento superficial
3. Inclínómetro

Calibración del monitoreo:

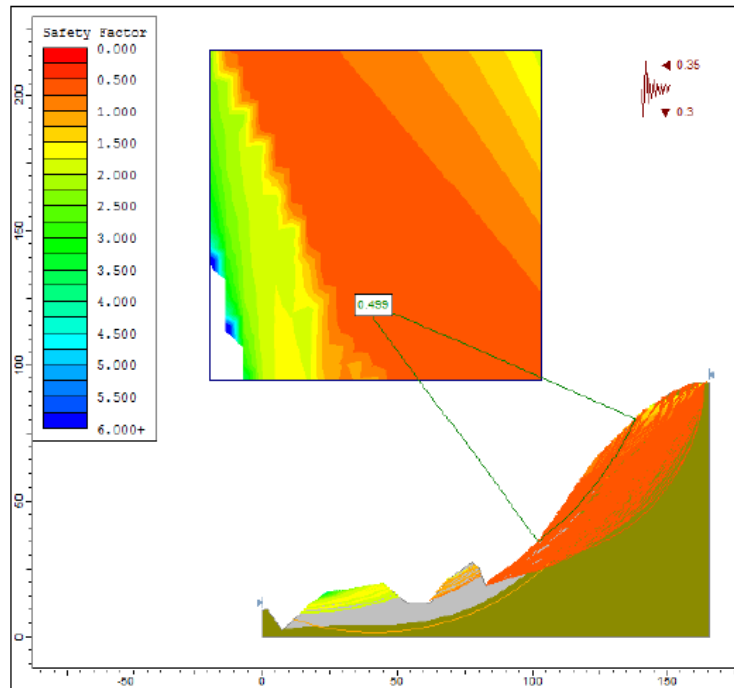
Se trata de medir las fluctuaciones del nivel freático y desplazamientos superficiales relacionándolos con eventos climáticos y sísmicos, que pongan en evidencia su interrelación; concretando así de manera pragmática las condiciones que generen la activación de sistema de alerta temprana por deslizamiento, para cuando se superen ciertos valores definidos por la instrumentación.

10.3 APLICACIÓN AL AREA DE ESTUDIO

Del gráfico de solución se observa: Talud con esfuerzo disponible en condición seca de 127.70KN/m², decayendo a 58.13 KN/m² en estado saturado, trayendo como resultado una disminución del 72% en FS (factor de seguridad). Así las cosas con un FS por debajo del tolerable (<1.5 para el caso en que haya viviendas) al descender de este límite indicaría ya un estado de emergencia.

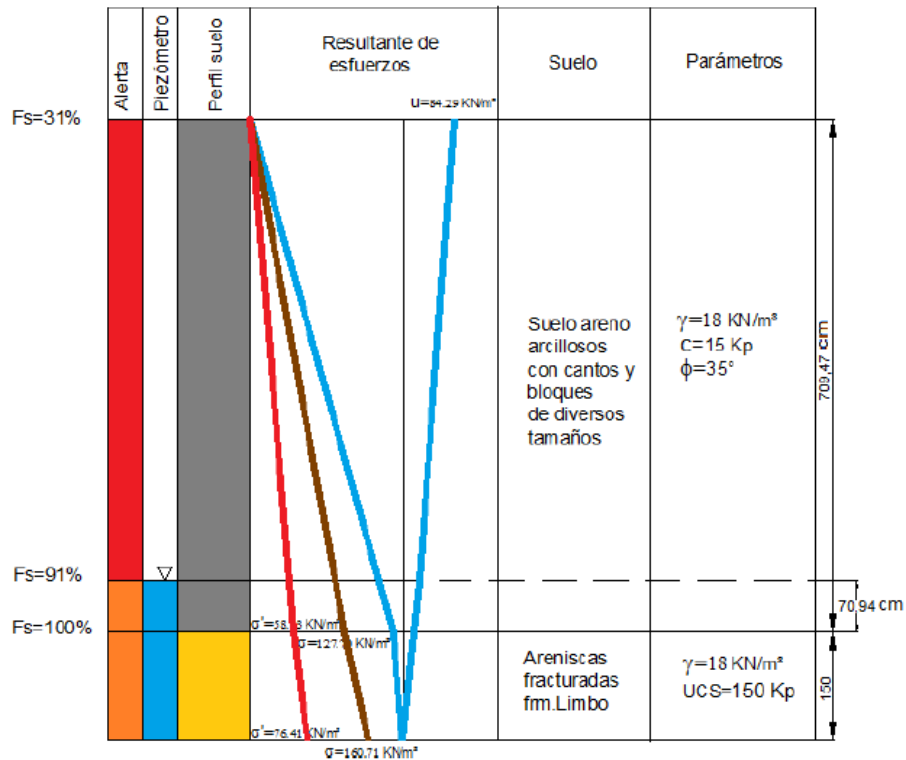
En nuestro caso, para un FS de 0.5 (ver gráfico de análisis de estabilidad) indicaría, que el talud definido por el círculo de falla estaría en movimiento y con descenso del 10% podría generar decaimientos, que llevaría al colapso instantáneo de la estructura del suelo. En tal sentido estos estados concretan límites de la alerta entre Naranja y Roja, cuya definición parte del estado deducido de inestabilidad.

Figura 75: Análisis de estabilidad del talud Vereda el Cairo, municipio de San Luis de Gaceno.



Fuente: Método de activación de un sistema de alerta temprana por deslizamientos, Corpochivor.

Figura 76: Análisis de estabilidad del talud Vereda el Cairo, municipio de San Luis de Gaceno.
 PRIMERA APROXIMACION TEORICA DEL NIVEL DE ALERTA
 TALUD CRÍTICO VEREDA EL CAIRO, MUNICIPIO DE SAN LUIS
 ($F_s=0.5$)



Fuente: Método de activación de un sistema de alerta temprana por deslizamientos, Corpochivor.

10.4 CALIBRACION DEL METODO

Mediante el análisis de estabilidad realizado al corte C-C', al contar con información piezométrica, se realizó el análisis tomando los niveles freáticos máximos y mínimos registrados, al igual que la condición de saturación total (Nivel del terreno) y condición seca, donde se puede observar que mediante el análisis pseudoestático, se registró el factor de seguridad crítico, siendo el valor inferior a 1 en todas las condiciones de saturación mencionadas; Es así, que se valida la información registrada por el análisis realizado por Corpochivor en el talud descrito, donde a pesar de la variación del factor de seguridad, teniendo en cuenta que se determinaron capas que registran valores distintos en cuanto a parámetros físicos y de resistencia de los materiales, pero que igualmente registran condición de falla, haciendo posible la correlación de dicha información, ya que en los dos casos se presenta la falla, cuyo valor piezómetro más bajo registró movimiento en los mojones.

CONCLUSIONES

Según la evaluación geológica, el área inestable en la Vereda el Cairo se encuentra limitada por el tectonismo en la zona, especialmente la presencia de bifurcación de la Falla Tesalia W, la cual limita la Formación Areniscas del Limbo (Tearl), Formación Arcillas Del Limbo (Teal), y Formación Dura y Plaenners (Ksgdp), las cuales están presentando movimientos.

Hidrológicamente se determinó un comportamiento monomodal cuyo pico corresponde al mes de junio con 542 mm/año, con un periodo de recarga de acuíferos de los meses de Abril a Octubre, haciendo indispensable el control especialmente a estos meses, siendo los meses de junio, julio y agosto meses que representan una amenaza potencial de ocurrencia de movimientos en masa. El comportamiento hidrometeorológico muestra que hacia el casco urbano del Municipio de San Luis De Gaceno se presentan las precipitaciones en menor grado, siendo mayor el grado de evaporación y temperatura. La precipitación aumenta hacia el NW, por tal razón hacia esa zona se acentúa la humedad relativa.

Según la evaluación geomorfológica, el área está delimitada en mayor parte por unidades estructurales, seguida por unidades denudaciones, cuyo comportamiento delimita las zonas inestables identificadas mediante el trabajo de campo.

Según la zonificación de susceptibilidad la mayor parte del área de estudio corresponde a susceptibilidad media a alta con un porcentaje de 94.39%, diferenciándose las zonas descritas como movimientos en masa con susceptibilidad muy alta, zonas donde se ubican caminos veredales e infraestructura, como el puente de la Quebrada Agua Fría, por lo que se definen como zonas prioritarias para estudios a detalle.

Se determinó mediante la zonificación de amenazas que los efectos detonantes en este sector son de gran importancia, por encontrarse dentro del rango más alto, tanto climáticamente como sísmicamente. Cuya acción determina realmente la inestabilidad de las zonas descritas como movimientos en masa y generan la inestabilidad en nuevos sectores.

Geotécnicamente se logró determinar que las areniscas encontradas en el talud rocoso en el sector suroriental del área de estudio, debe su inestabilidad a la disposición de las discontinuidades encontradas y a las propiedades mecánicas de la roca, cuyos valores de resistencia son bajos, encontrándose en promedio un valor

de compresión simple de 1,94 MPa, y los sectores correspondientes a los movimientos en masa, al encontrarse sobre depósitos de tipo coluvial, adquieren comportamientos muy heterogéneos, haciendo difícil determinar un parámetro de resistencia general para todo el movimiento, por lo que se hace necesario promediar los valores resultantes de los diferentes ensayos realizados en dichos lugares.

Según lo descrito en el plan del monitoreo realizado en el sector, se determinaron periodos de tiempo de toma de datos aleatorios, los cuales al no ser constantes, dificultan el proceso de relacionar los diferentes datos tanto topográficos como hidrológicos, por tanto se plantea la relación entre la toma de datos topográficos y piezométricos, donde el monitoreo corresponde al análisis independiente de los 3 movimientos analizados en el presente estudio.

La aplicación de la metodología propuesta por la corporación autónoma regional de Chivor, Corpochivor, depende de la instalación de equipos de monitoreo independiente en cada uno de los movimientos en masa descritos, por tanto la aplicación de la metodología se encuentra en periodo de revisión con base en el perfil determinado en la metodología, cuya relación con el presente estudio se demostró con el corte C-C' al encontrar los dos taludes en condición de falla entrando en alerta roja con los niveles piezométricos medidos.

RECOMENDACIONES

Se recomienda ampliar la zona comprendida por la topografía a detalle, debido a la ocurrencia de movimientos en masa en sectores fuera del área delimitada como zona de estudio, movimientos que fueron inventariados pero al no contar con datos topográficos no fueron analizados.

Se recomienda un estudio proyectado al análisis del comportamiento del puente de la Quebrada Agua Fría, con el fin de determinar la estabilidad de la estructura, debido a que esta se encuentra cimentada sobre una zona determinada en el presente estudio como zona de falla con movimientos activos.

Se recomienda un estudio de cobertura de la tierra y taxonómico de suelos detallado en el área de estudio, donde se obtengan datos locales correspondientes a dichos atributos, y ajustar esos datos a la zonificación de susceptibilidad por movimientos en masa con el fin de disminuir el margen de error producto del factor de escala del estudio.

Se recomienda la aplicación de la zonificación de amenazas para la identificación de zonas potencialmente inestables para el diseño de obras de infraestructura, y cualquier tipo de actividad antrópica.

Se recomienda la restricción de actividades que requieren riegos en las laderas de amenaza alta y muy alta de ocurrencia de movimientos en masa, y el tratamiento de aguas superficiales y de infiltración.

Se recomienda el diseño de obras de contención, rehabilitación y drenaje de las zonas descritas como movimientos en masa.

Se recomiendan una evaluación de riesgos y vulnerabilidad en el área de estudio, debido a la amenaza inminente de presentarse movimientos en masa.

Se recomienda la instalación de equipos de control topográfico y piezómetro en las zonas descritas, con el fin de monitorear de forma independiente los movimientos que se presentan y poder aplicar la metodología de alerta temprana planteada por Corpochivor a estos movimientos.

Se recomienda la captura de datos correspondientes al monitoreo en periodos de tiempo equivalentes y realizar simultáneamente el control topográfico y piezométrico.

BIBLIOGRAFIA

República de Colombia. Decreto 1807 del 19 septiembre de 2014. "Por el cual se reglamenta el artículo 189 del Decreto Ley 019 de 2012 en lo relativo a la incorporación de la gestión del riesgo en los planes de ordenamiento territorial y se dictan otras disposiciones". Ministerio de vivienda, ciudad y territorio.

SERVICIO GEOLOGICO COLOMBIANO. Geología de la plancha 229 – Gachala, Bogota.2013.

Rodríguez E. Ballesteros E. Bettin M. Ángel C. Componente Hidrológico. Universidad Nacional de Colombia, Corpochivor, Corpoboyacá.

A.A. Sokolov, T.G. Chapman, Métodos de cálculo del Balance Hídrico. Guía Internacional de Investigación y Métodos, Instituto de Hidrología de España. 1981.

M.Hang, M.Segovia. Estimación del Valor del Número de Curva (CN) a Través de Imágenes Satelitales Landsat5-tm. Departamento De Hidraulica UNNE.Chaco.

M.Velez, C. Ortiz, M.Vargas. LAS AGUAS SUBTERRANEAS un enfoque práctico. Instituto Colombiano De Geología y Minería INGEOMINAS. Universidad Nacional De Colombia. Bogotá, Colombia 2011.

Y.E.Araque, Y.A.Meneses, Modelo Hidrogeologico conceptual de la afectación de la recarga en la acumulación de gas metano asociado al carbón (CBM), caso Sinclinal de Umbita (Boyacá, Colombia), Proyecto de grado para obtener el título del Ingeniero Geólogo, UPTC, Sogamoso. 2015.

Servicio Geológico Colombiano (SGC). Propuesta metodológica sistemática para la generación de mapas geomorfológicos analíticos aplicados a la zonificación de amenaza por movimientos en masa escala 1:100.000. Bogotá D.C. Febrero de 2012.

Servicio Geológico Colombiano (SGC). Documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza relativa por movimientos en masa escala 1:100.000. Vol. 2. Bogotá. Agosto de 2013.

Servicio Geológico Colombiano (SGC). Subdirección de Amenazas Geológicas. Zonificación de amenazas por movimientos en masa: estandarización de geoformas de ambiente fluvial y lagunar. Bogotá. Mayo de 2013.

Servicio Geológico Colombiano (SGC). Zonificación de amenazas por movimientos en masa: estandarización de geoformas de ambiente estructural. Subdirección de Amenazas Geológicas. Bogotá. Mayo de 2013.

UPTC – Corpochivor. Elaboración de estudio de riesgo (amenaza y vulnerabilidad) y diseño de obras de estabilización en la vereda el Carmen, Municipio de San Luis De Gaceno, jurisdicción de la corporación autónoma regional de Chivor (Corpochivor). – convenio nº 038 del 2012.

O. Ramírez. Apuntes de Geotecnia básica, Capítulo 8. 2000.

Universidad Nacional - Sociedad Colombiana de Geotecnia. Métodos sugeridos para la determinación del contenido de humedad, la porosidad, la densidad, la absorción, y propiedades relacionadas y las propiedades índice de expansión y desleimiento - durabilidad.

L.I.Gonzales de Vallejo, M. Ferrer, L. Ortuño, C. Oteo. INGENIERIA GEOLOGICA, Madrid, 2002.

J. Ros Avila. Análisis comparativo de los criterios de rotura de Hoek&Brown y Mohr Coulomb en el estudio de estabilidad en macizos rocosos. Etseccpb. Barcelona. 2008.

E. Hoek, C. Carranza-Torres, B. Corkum. El criterio de rotura de Hoek-Brown. Consulting Engineer, University of Minnesota, RocScience Inc. Edición 2002.

J. M. Espitia. Presentación, Geología estructural e interpretación de datos, estabilidad de taludes.

R. O. Pedro, A. M. Leandro, Mecánica de rocas: fundamentos e ingeniería de taludes. E.T.S.I. Minas (UPM). Madrid. 2004.

Corpochivor. Mejorar la capacidad de respuesta de la comunidad ante emergencias por fenómenos de remoción en masa en los municipios de Garagoa, La Capilla, San Luis de Gaceno, Santa María, Sutatenza y Tenza, de la jurisdicción de Corpochivor.

Corpochivor. Metodología de sistema de alerta temprana por deslizamientos.