

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
CENTRO UNIVERSITARIO DEL NORTE
INGENIERO GEÓLOGO

TRABAJO DE GRADUACIÓN



EVALUACIÓN GEOTÉCNICA DE LOS TALUDES DEL CORTE DE
CARRETERA UBICADO DEL KM 39 AL KM 51 DE LA CARRETERA
AL ATLÁNTICO CA-9, DEL MUNICIPIO DE SANARATE, EL
PROGRESO

JOSE ESTUARDO ALVARADO BERMUDEZ

COBÁN, ALTA VERAPAZ, FEBRERO DE 2018

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
CENTRO UNIVERSITARIO DEL NORTE
INGENIERO GEÓLOGO

TRABAJO DE GRADUACIÓN

EVALUACIÓN GEOTÉCNICA DE LOS TALUDES DEL CORTE DE
CARRETERA UBICADO DEL KM 39 AL KM 51 DE LA CARRETERA
AL ATLÁNTICO CA-9, DEL MUNICIPIO DE SANARATE, EL
PROGRESO

PRESENTADO AL HONORABLE CONSEJO DIRECTIVO DEL
CENTRO UNIVERSITARIO DEL NORTE

POR

JOSE ESTUARDO ALVARADO BERMUDEZ
CARNÉ 200940143

COMO REQUISITO PREVIO A OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO GEÓLOGO

COBÁN, ALTA VERAPAZ, FEBRERO DE 2018

AUTORIDADES UNIVERSITARIAS

RECTOR MAGNÍFICO

Dr. Carlos Guillermo Alvarado Cerezo

CONSEJO DIRECTIVO

PRESIDENTE:	Lic. Zoot. Erwin Gonzalo Eskenasy Morales
SECRETARIA:	Lcda. T.S. Floricelda Chiquín Yoj
REPRESENTANTE DE DOCENTES:	Ing. Geól. César Fernando Monterroso Rey
REPRESENTANTE DE EGRESADOS	Lic. Abg. Not. Edwin Alcides Barrios Sosa
REPRESENTANTES ESTUDIANTILES:	Mtro. Disraely Dárin Manfredy Jom Hernández Br. Karla Vanessa Barrera Rivera

COORDINADOR ACADÉMICO

Ing. Ind. Francisco David Ruiz Herrera

COORDINADOR DE LA CARRERA

Ing. Geól. Sergio David Morán Ical

COMISIÓN DE TRABAJOS DE GRADUACIÓN

COORDINADOR:	Ing. Geól. Sergio David Morán Ical
SECRETARIA:	Ing. Geól. Silvia Frine Cortez Bendfeldt
VOCAL:	Ing. Geól. Luis Alfonso Laj Hun

REVISOR DE REDACCIÓN Y ESTILO

Msc. Ing. Civil Julio Enrique Reynosa Mejía

REVISORA DE TRABAJO DE GRADUACIÓN

Ing. Geól. Silvia Friné Cortez Bendfeldt

ASESOR

Msc. Ing. Geól. Bernie Gamaliel Castillo Moeschler

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA



**CENTRO UNIVERSITARIO
DEL NORTE (CUNOR)
CARRERA GEOLOGÍA**

Código Postal 16001 – Cobán, Alta Verapaz
PBX. 79 566 600 Ext. 209
Guatemala, C. A.
c. e. geologiausac@gmail.com

Ref 15-CG-264/2017
19 de septiembre de 2017

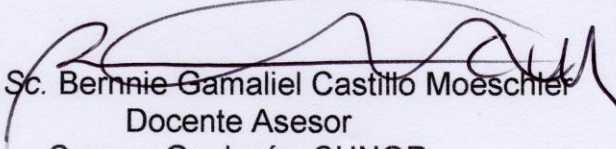
Señores
Comisión Trabajos de Graduación
Carrera Geología
CUNOR

Respetables Señores.

Por este medio informo a ustedes que he procedido a la **ASESORÍA** del informe final de Trabajo de Graduación del T.U. **GEOL. JOSE ESTUARDO ALVARADO BERMUDEZ**, carné n ° **200940143**, titulado: **“EVALUACIÓN GEOTÉCNICA DE LOS TALUDES DEL CORTE DE CARRETERA UBICADO DEL KM 39 AL KM 51 DE LA CARRETERA AL ATLÁNTICO CA-9, DEL MUNICIPIO DE SANARATE, EL PROGRESO”**, el cual considero llena los requisitos establecidos para su aprobación, por lo que someto a consideración de ustedes dicho informe.

Atentamente

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”


Ing M Sc. Bernnie Gamaliel Castillo Moeschler
Docente Asesor
Carrera Geología, CUNOR



c.c. archivo

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA



**CENTRO UNIVERSITARIO
DEL NORTE (CUNOR)
CARRERA GEOLOGÍA**

Código Postal 16001 – Cobán, Alta Verapaz
PBX. 79 566 600 Ext. 209
Guatemala, C. A.
c. e. geologiausac@gmail.com

Ref 15-CG-19/2018
09 de febrero de 2018

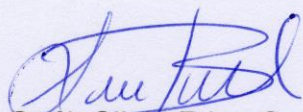
Señores
Comisión Trabajos de Graduación
Carrera Geología
CUNOR

Respetables Señores.

Por este medio informo a ustedes que he procedido a la **REVISIÓN** del informe final de Trabajo de Graduación del **T.U. GEÓL. JOSE ESTUARDO ALVARADO BERMUDEZ**, carné n ° **200940143**, titulado: **“EVALUACIÓN GEOTÉCNICA DE LOS TALUDES DEL CORTE DE CARRETERA UBICADO DEL KM 39 AL KM 51 DE LA CARRETERA AL ATLÁNTICO CA-9, DEL MUNICIPIO DE SANARATE, EL PROGRESO”**, el cual considero llena los requisitos establecidos para su aprobación, por lo que someto a consideración de ustedes dicho informe.

Atentamente

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”


Ing Geól Silvia Frine Cortez Bendfeldt
Docente Revisora
Carrera Geología
CUNOR



c.c. archivo

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA



**CENTRO UNIVERSITARIO
DEL NORTE (CUNOR)
CARRERA GEOLOGÍA**

Código Postal 16001 – Cobán, Alta Verapaz
PBX. 79 566 600 Ext. 209
Guatemala, C. A.
c. e. geologiausac@gmail.com

Ref 15-CG-40/2018
23 de febrero de 2018

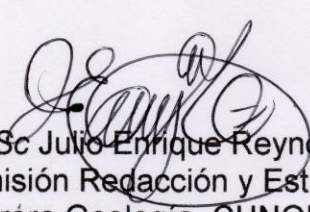
Señores
Comisión Trabajos de Graduación
Carrera Geología
CUNOR

Respetables Señores.

Por este medio remito el informe Final de Trabajo de Graduación a nivel de grado titulado: **“EVALUACIÓN GEOTÉCNICA DE LOS TALUDES DEL CORTE DE CARRETERA UBICADO DEL KM 39 AL KM 51 DE LA CARRETERA AL ATLÁNTICO CA-9, DEL MUNICIPIO DE SANARATE, EL PROGRESO”**, realizado por el T.U. GEÓL. JOSE ESTUARDO ALVARADO BERMUDEZ, carné n ° 200940143, el cual ya fue revisado por la **COMISIÓN DE REDACCIÓN Y ESTILO** de la Carrera de Geología, quienes consideramos llena los requisitos establecidos para su aprobación

Atentamente,

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”

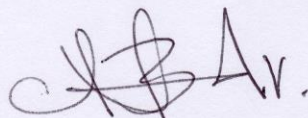

Ing Civil MSc Julio Enrique Reynosa Mejía
Comisión Redacción y Estilo
Carrera Geología, CUNOR



c.c. archivo

HONORABLE COMITÉ EXAMINADOR

En cumplimiento a lo establecido por los estatutos de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a consideración de ustedes el trabajo de graduación titulado: **“EVALUACIÓN GEOTÉCNICA DE LOS TALUDES DEL CORTE DE CARRETERA UBICADO DEL KM 39 AL KM 51 DE LA CARRETERA AL ATLÁNTICO CA-9, DEL MUNICIPIO DE SANARATE, EL PROGRESO”**, como requisito previo a optar al título profesional de Ingeniero Geólogo.



Jose Estuardo Alvarado Bermudez
Carné No. 200940143

RESPONSABILIDAD

“La responsabilidad del contenido de los trabajos de graduación es: del estudiante que opta al título, del asesor, de la Comisión de Redacción y Estilo de cada carrera y es responsable de la estructura y forma”.

Aprobado en punto SEGUNDO, Inciso 2 .4, subinciso 2.4.1 del Acta No. 17-2012 de Sesión extraordinaria del Consejo Directivo de fecha 18 de julio del año 2012.

AGRADECIMIENTOS A:

Dios creador y misericordioso, que has sido fiel a la visión escrita hace años y demuestras una vez más que tus tiempos son perfectos.

Mis padres, Aminta Aydeé y José Estuardo como recompensa al sacrificio, ejemplo, comprensión, amor y paciencia que me han otorgado por tantos años.

Mis hermanos Edgar Armando, Brayan Yosué y Luis Ronaldo, como ejemplo de dedicación y determinación en la vida.

Mi amorocha y nuestra canelita, por su comprensión y apoyo incondicional en todas aquellas noches de desvelo, las palabras de ánimo en cada contratiempo suscitado, pero sobre todo por tanto amor y cariño con el que alegran mis días.

Mis abuelitos Fidencio (†), Lidia (†) y Aydalina, con mucho cariño por su ejemplo y sabios consejos de vida.

Mis tíos Juan Carlos y Sandra Nineth, por ser como padres para mí, quienes con su consejo y ejemplo me enseñan a ser alguien de bien.

La familia Alvarado Soto por adoptarme como un hijo más durante tanto tiempo, en el cual gracias a sus consejos y apoyo incondicional, hoy logro culminar un proyecto de vida más.

Todas aquellas personas que durante mi paso por la USAC compartieron tan buenos momentos, enseñanzas y anécdotas, en especial a Ihto, Vargas, Carla, Dulce, Pablo, y Pache con quienes desde 2009 tuve la dicha de compartir tantas vivencias, que quedan para el recuerdo.

La Universidad de San Carlos de Guatemala, especialmente al Centro Universitario del Norte, por permitirme crecer y formar parte de su historia.

La carrera de Geología y cada uno de los catedráticos que la conforman, por las enseñanzas y guía en las distintas áreas de la misma, sin lo cual, no hubiese sido posible la culminación de la presente investigación.

A todos ellos, gracias.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE CONTENIDOS	i
ÍNDICE DE TABLAS	iv
ÍNDICE DE FIGURAS	v
ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS	vi
ÍNDICE DE MAPAS	vii
LISTA DE SIGLAS Y ABREVIATURAS	ix
RESUMEN	xi
INTRODUCCIÓN	1

CAPÍTULO 1 MARCO TEÓRICO

1.1	Planteamiento de problema	3
1.2	Justificación	3
1.3	Hipótesis	4
1.3.1	Variables	5
	a. Dependientes	5
	b. Independientes	5
1.4	Antecedentes	6
1.5	Objetivos	7
1.5.1	General	7
1.5.2	Específicos	7
1.6	Alcances y límites	8
1.6.1	Alcances	8
1.6.2	Límites	8
1.6.3	Localización y extensión del área	8
1.7	Accesos	11
1.8	Marco geológico regional	13
1.8.1	Estratigrafía	13
	a. Grupo El Tambor	14
1.8.2	Geología estructural	18

CAPÍTULO 2 METODOLOGÍA

2.1	Clasificación de <i>Bieniawski</i> o <i>R.M.R.</i>	25
2.2	Clasificación geomecánica Romana o sistema <i>S.M.R.</i>	30
2.3	Tipos de mecanismos de rotura en taludes	34
2.3.1	Rotura circular	34
2.3.2	Rotura planar	35
2.3.3	Rotura en cuña	37
2.3.4	Rotura por vuelco	39
2.4	Etapa de recopilación y análisis bibliográfico	41
2.5	Etapa de trabajo de campo	41
2.6	Etapa de trabajo de laboratorio	43
2.7	Etapa de gabinete	47

CAPÍTULO 3 PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

3.1	Litología	49
3.1.1	Unidad de Anfibolita	50
3.1.2	Unidad de Filita	52
3.1.3	Unidad de Basalto	53
3.1.4	Unidad de Pómez	55
3.1.5	Unidad de Coluvión	57
3.1.6	Unidad de Aluvión	58
3.1.7	Columna estratigráfica local	59
3.2	Geología estructural local	60
3.2.1	Foliación	60
	a. Foliación S_1	60
3.2.2	Lineamientos	63
3.2.3	Fracturas	65
3.2.4	Fallas	66
	a. Fallas normales	67
	b. Normales puras	69
	c. Normal dextral	70
	d. Normal sinextral	71
	e. Fallas inversas	72
	f. Inversas puras	73
	g. Inversa dextral	74
	h. Inversa sinextral	75
	i. Fallas de rumbo	76
	j. Sinextral pura	76
	k. Sinextral inversa	77
	l. Dextral pura	78
3.2.5	Análisis de fallas	79

3.3	Suelos	84
3.3.1	Suelos Salamá	85
3.3.2	Suelos Mongoy	85
3.3.3	Suelos Chuarrancho	85
3.4	Caracterización geomecánica	88
3.4.1	Ubicación de las estaciones	88
3.4.2	Resistencia de la roca	91
3.4.3	Angulo de fricción interna	92
3.4.4	Clasificación de <i>Bieniawski</i>	92
3.4.5	Clasificación Romana o sistema <i>S.M.R.</i>	99
3.4.6	Mecanismos de rotura	104
	a. Mecanismo de falla planar	104
	b. Mecanismo de falla en cuña	106
	c. Mecanismo de falla por vuelco	109
3.4.7	Análisis de estabilidad de los mecanismos de rotura	111
	a. Mecanismo planar	111
	b. Mecanismo de cuña	113
	c. Mecanismos por vuelco	116
3.4.8	Ensayos de corte directo (ASTM D 3080-04)	117
3.4.9	Macizos Rocosos Inconsistentes	119
3.4.10	Mecanismos de protección y sostenimiento	120
3.4.11	Corrección de talud	125
	CONCLUSIONES	129
	CONCLUSIÓN GENERAL	129
	CONCLUSIONES ESPECIFICAS	129
	RECOMENDACIONES	133
	BIBLIOGRAFÍA	135

ANEXOS

I	Guía de observación clasificación de <i>Bieniawski</i>	139
II	Escala de meteorización	140
III	Gráfico de las estaciones con rotura planar	141
IV	Gráfico de las estaciones con rotura en cuña	145
V	Mapa de ubicación de muestras de suelos	147
VI	Mapa de ubicación de muestras de roca	149
VII	Cartilla de resultados para la muestra de suelos 1	151
VIII	Cartilla de resultados para la muestra de suelos 2	152
IX	Cartilla de resultados para los cubos de ensayo a compresión simple	153
X	Mapa de medidas correctivas mediante Sistema <i>S.M.R.</i>	155
XI	Mapa geológico a escala 1:20 000	157

ÍNDICE DE TABLAS

1	Coordenadas <i>UTM</i> del área de estudio	8
2	Coordenadas <i>UTM</i> de los taludes en estudio	9
3	Parámetros de clasificación sistema <i>R.M.R.</i>	26
4	Sistema de ponderación de <i>R.M.R.</i> para taludes	28
5	Calidad del macizo rocoso con relación al índice <i>R.M.R.</i>	30
6	Factores de ajuste para la orientación de las juntas	32
7	Factor de ajuste por el método de excavación	33
8	Clases de estabilidad según el sistema <i>S.M.R.</i> (romana 1985)	33
9	Fallas normales puras	69
10	Fallas normales dextrales	70
11	Fallas normales sinestrales	71
12	Fallas inversas puras	73
13	Fallas inversas dextrales	74
14	Fallas inversas sinestrales	75
15	Fallas sinestrales	76
16	Fallas sinestrales inversas	77
17	Fallas Dextrales	78
18	Dinámica de esfuerzos principales para la primera asociación de fallas	81
19	Dinámica de esfuerzos principales para la segunda asociación de fallas	83
20	Ubicación de las estaciones geotécnicas	90
21	Ubicación de las estaciones geotécnicas (continuación)	91
22	Resultados del ensayo de compresión simple	91
23	Ángulo de fricción para las unidades litológicas de interés geotécnico	92
24	Ponderación promedio de parámetros <i>R.M.R.</i>	93
25	Formato para la toma de datos, estación 20a	94
26	Resultados de la calidad geotécnica según la clasificación de <i>Bieniawski</i> , sistema <i>R.M.R.</i>	96
27	Ponderación promedio de parámetros <i>R.M.R.</i> básico	99
28	Resultados de la calidad geotécnica según la clasificación romana, sistema <i>S.M.R.</i>	100
29	Estaciones y familias de discontinuidades propensas a generar rotura planar	105
30	Estaciones y familias de discontinuidades propensas a generar rotura en cuña	108
31	Factor de seguridad para las estaciones que presentaron mecanismo de rotura planar	112
32	Factor de seguridad para las estaciones que presentaron mecanismo de rotura en cuña	115
33	Ubicación de las muestras de suelo inalteradas extraídas para la realización de ensayo de corte directo	117
34	Criterio de corrección de taludes según el valor <i>S.M.R.</i>	121
35	Mecanismos correctivos para las estaciones de estudio	122
36	Corrección de buzamiento de taludes	127

ÍNDICE DE FIGURAS

1	Unidades litológicas del cuadrángulo El Progreso	17
2	Unidades litológicas del grupo El Tambor	18
3	Esquema tectónico de la Zona de Sutura Del Motagua.	19
4	Perfil <i>SW-NE</i> de la Zona De Sutura Del Motagua	20
5	Elipse de deformación para movimiento sinextral (modelo teórico Falla del Motagua)	23
6	Esquema idealizado de taludes según Cosillo 1999	29
7	Rotura circular en macizos rocosos	35
8	Rotura planar en macizos rocosos	35
9	Análisis cinemático para mecanismo de falla tipo planar	36
10	Rotura en cuña para macizos rocosos	37
11	Análisis cinemático para fallamientos en cuña	38
12	Rotura por vuelco en macizos rocosos	39
13	Análisis cinemático del mecanismo de falla por vuelco	40
14	Columna litoestratigráfica local	59
15	Roseta de proyección de los rumbos de los planos de foliación S_1 en las unidades de Anfibolita Y Filita	61
16	Modelo estructural correspondientes al plegamiento de tipo sinclinal	62
17	Modelo estructural correspondiente al pliegue anticlinal	63
18	Roseta con la proyección de los lineamientos de área de estudio	65
19	Roseta con la proyección de las direcciones de fracturamiento	65
20	Roseta representando la proyección de rumbo de plano de fallas normales	69
21	Roseta y estereograma de rumbos y planos de fallas normales puras	70
22	Roseta y estereograma con rumbos y planos de fallas normales dextrales	71
23	Roseta y estereograma de los rumbos y planos de fallas normales sinextrales	72
24	Roseta representando el rumbo de los planos de fallas inversas	73
25	Roseta y estereograma de los rumbos y planos de fallas inversas puras	74
26	Estereograma de los planos de fallas inversas dextrales	75
27	Estereograma de los planos de fallas inversas sinextrales	76
28	Estereograma del plano de falla de rumbo de tipo sinextral	77
29	Estereograma de los planos de fallas de tipo sinextral inversa	78
30	Estereograma del plano de falla de rumbo de tipo dextral	79
31	Representación de familias de fallas para el modelo dextral	80
32	Modelo estructural de fallas para la cinemática dextral	81
33	Representación de familias de fallas para el modelo sinextral	82
34	Modelo estructural de fallas para la cinemática sinextral	83
35	Disposición de suelos en el departamento de El Progreso	84
36	Grafico la configuración de los taludes en estudio	97

37	Gráfico de la distribución de taludes según su calidad mediante el método <i>S.M.R.</i>	102
38	Posibilidad de mecanismo planar, estación 8d	104
39	Determinación del plano sobre el cual se desarrolla el deslizamiento en el caso de rotura en cuña	107
40	Determinación del plano sobre el cual se desarrolla el deslizamiento en el caso de rotura en vuelco	110
41	Gráfico de la tendencia de estabilidad de los taludes	113
42	Determinación del factor de seguridad para cuñas	114
43	Gráfico de la tendencia de estabilidad de los taludes	116
44	Modelo ideal de taludes y cortes de carretera, para la muestra no. 1	118
45	Modelo ideal de taludes y cortes de carretera, para la muestra no. 2	119
46	Ciclográfica conteniendo la aureola de resurgimiento, cono de fricción y talud	126
47	Diagrama estereográfico de la corrección del talud	126

ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS

1	Medición De <i>R.Q.D.</i> por medio del conteo de discontinuidades con el uso de un marco de 1 mt ² .	27
2	Extracción y recubrimiento con parafina de muestra de suelo inalterada	42
3	Levantamiento de topografía a detalle mediante estación total	43
4	Cubos y máquina para ensayos de resistencia a compresión	44
5	Unidad de Anfibolita sobre la carretera CA-9	50
6	Unidad de Anfibolita fracturada	51
7	Unidad de Filita con lentes de cuarzo	52
8	Unidad de Basaltos	53
9	Unidad de Basaltos sobreyaciendo a la Unidad de Anfibolita	54
10	Unidad de Basaltos con plano de fractura	55
11	Unidad de Pómez en contacto con la Unidad de Anfibolita	56
12	Unidad de Coluvión compuesta por rocas basálticas y rocas anfibolíticas	57
13	Unidad Aluvional sobre el recorrido del río Los Plátanos	58
14	Evidencia de estrías	66
15	Evidencia de gradas	67
16	Desplazamiento normal de vetas	68
17	Falla de tipo inversa	72
18	Talud utilizado para la extracción de muestra de suelo inalterado	117
19	Talud constituido por macizos rocosos inconsistentes	120

ÍNDICE DE MAPAS

1	Localización del área de estudio	10
2	Accesos al área de estudio	12
3	Mapa de lineamientos del área de estudio	64
4	Distribución de suelos en el área de estudio	87
5	Mapa de estaciones geotécnicas	89
6	Zonificación calidad geotécnica sistema <i>R.M.R.</i>	98
7	Zonificación calidad geotécnica sistema <i>S.M.R.</i>	103

LISTA DE ABREVIATURAS Y SIGLAS

Aj	Dirección de buzamiento de las discontinuidades
As	Dirección de buzamiento del talud
Bs	Buzamiento de talud
CA	Carretera al Atlántico
CII	Centro de Investigación de Ingeniería
IGN	Instituto Geográfico Nacional
km ²	Kilómetro cuadrado
Lim	Limolitas
m	Metro
mm	Milímetro
msnm	Metros sobre nivel del mar
Qa	Aluvión
P/T	Presión y temperatura
<i>R.M.R.</i>	<i>Rock Mass Rating</i>
<i>S.M.R.</i>	<i>Slope Mass Rating</i>
<i>U.T.M.</i>	Sistemas de coordenadas transversal de <i>Mercater</i>
<i>W.G.S.</i>	Sistema geodésico mundial

RESUMEN

El problema establecido en base a lo observado sobre la carretera CA-9, fue determinar la calidad geotécnica de los macizos rocosos ubicados entre los kilómetros 39 y 51 de dicho tramo carretero. La calidad geotécnica fue determinada en base a los sistemas *RMR* (*Rock Mass Rating* o calidad del macizo rocoso) y *SMR* (*Slope Mass Rating* o clasificación de la pendiente del macizo), al obtener los resultados se proponen algunas medidas de corrección o protección para los taludes.

En base a los parámetros utilizados en el sistema *RMR* se establecieron 2 tipos de calidad geotécnica para los macizos rocosos, los cuales fueron: media y mala. También se utilizó el sistema *SMR* en el cual se establecieron 4 calidades geotécnicas: muy mala, mala, normal y buena, según esta categorización.

Litológicamente se delimitaron 6 unidades de las cuales 4 entran en contacto con el tramo carretero, estas fueron: Unidad de Anfibolita, Unidad de Basalto, Unidad de Ceniza y Unidad de Aluvión, aunque dentro del área de estudio también se delimitaron las unidades de Coluvión y Filita. Estructuralmente mediante fallas se describieron 2 cinemáticas dentro del área, siendo una de tipo dextral cuyos esfuerzos son: $\sigma_1 = 330^\circ$ & $\sigma_3 = 240^\circ$, mientras que la otra genera un modelo de tipo sinextral cuyos esfuerzos son: $\sigma_1 = 025^\circ$ & $\sigma_3 = 295^\circ$.

Con el uso de diagramas estereográficos se determinaron los mecanismos de rotura que afectan a los macizos rocosos. Se realizó una clasificación en base a las roturas encontradas; la Unidad de Anfibolita es la más afectada por dichas roturas,

seguida por la Unidad de Basalto. El mecanismo de rotura más predominante en el área fue el de tipo planar.

Posterior al análisis en conjunto de lo antes mencionado se propuso las medidas correctivas más apropiadas para mejorar la calidad geotécnica de los taludes entre las cuales destacan la aplicación de hormigón echado, la implementación de bulones y el factor correctivo de corte o reducción del ángulo del talud.

INTRODUCCIÓN

El presente documento lleva como título “EVALUACIÓN GEOTÉCNICA DE LOS TALUDES DEL CORTE DE CARRETERA UBICADO DEL KM 39 AL KM 51 DE LA CARRETERA AL ATLÁNTICO CA-9, DEL MUNICIPIO DE SANARATE, EL PROGRESO”. La carretera en estudio presenta una longitud de 12 km, la cual conecta la ciudad de Guatemala con el nor-orienté del país.

Para determinar la calidad geotécnica de los macizos rocosos se utilizó la clasificación de *Bieniawski* o sistema *R.M.R.* También se utilizó la clasificación Romana o sistema *S.M.R.* para taludes, con el fin de tener un contraste de ambas y una clasificación promedio para los macizos y así obtener un mejor criterio para la propuesta de medidas correctivas.

Por medio de diagramas estereográficos se determinó la posibilidad de ocurrencia y estabilidad de los mecanismos de rotura que afectan a los macizos rocosos. Así mismo se realizó una delimitación de las características litológicas y estructurales del área de estudio para relacionarla con la calidad que presentan los taludes en estudio. Por último se propusieron medidas correctivas para los macizos rocosos y suelos evaluados.

CAPÍTULO 1

MARCO TEÓRICO

1.1 PLANTEAMIENTO DE PROBLEMA

Mediante visitas previas realizadas al tramo carretero en estudio se observaron taludes que presentaban deficiencias, generaban caídas de rocas y deslizamientos sobre la carretera, tanto en los macizos rocosos como en los taludes conformados por suelos, generados por las diferentes condiciones litológicas, estructurales y geotécnicas que afectan a los taludes, por lo que a partir de esto se planteó la siguiente interrogante:

¿Qué calidad geotécnica presentan los macizos rocosos y los suelos de los taludes ubicados en el segmento carretero del km 39 al km 51 de la ruta CA-9 y que medidas correctivas se pueden aplicar para su mitigación?

1.2 JUSTIFICACIÓN

El área de estudio se caracteriza por ser una carretera que conecta la parte norte y oriente de Guatemala con la ciudad capital, años anteriores se encontraba en proceso de ampliación, sin embargo en la misma no fueron tomados en cuenta aspectos geológicos y geotécnicos, lo que provocó que en varios segmentos de dicha carretera se evidenciaran deslizamientos y desprendimientos de rocas, los cuales ponen en peligro a los transeúntes que circulan por el lugar.

Por lo expuesto anteriormente, se consideró necesario el desarrollo de un estudio geotécnico para este tramo carretero, con la finalidad de generar

información de los parámetros y propiedades geomecánicas de los macizos rocosos con la condicionante que tendrían ciertas áreas por la combinación de los macizos con suelos, obtener además información como la calidad de los macizos, condicionantes estructurales y/o litológicos de los taludes, entre otros, los cuales ayudaran proponer la corrección adecuada para cada uno de los taludes estudiados.

Para el estudio de los macizos rocosos se utilizó las metodologías de *Bieniawski* o sistema *R.M.R.*, sistema Romano o *S.M.R.* y análisis mediante esterofalsillas, mientras que los parámetros de los suelos fueron analizados mediante el método de corte directo, los cuales se evaluaron para determinar las medidas de mitigación más acorde en base a las características del talud.

1.3 HIPÓTESIS

Los taludes de macizos rocosos encontrados dentro de las secciones delimitadas por los kilómetros: 39 al 40 y 48 al 51 presentan una buena calidad geotécnica, por lo que un simple saneado mantendría los taludes estables. Mientras que los taludes de macizos rocosos de las secciones delimitadas por los kilómetros: 41 al 42 y 46 al 48 presentan una calidad geotécnica media, debido principalmente a la meteorización de los taludes. La sección de taludes más crítica fue encontrada dentro del segmento de carretera delimitado por el kilómetro 43 al 45, donde la calidad del macizo rocoso es muy baja debido a que los taludes fueron afectados por una alta actividad antrópica combinada con aspectos de carácter estructural, se estableció que la medida correctiva apropiada es el uso de muros anclados.

Por su parte el talud de suelo estudiado en el kilómetro 47 no presento mayor problema por lo que realizar una corrección de 5° al corte de talud generaría su ángulo de corte sea el óptimo. Mientras que el talud de suelo estudiado en el kilómetro 44 presentó altas deficiencias por lo que además de corregir el ángulo óptimo del talud se estableció el uso de biomanta, para evitar

que se presenten más deslizamientos de suelo y no generar contaminación visual.

1.3.1 VARIABLES

Las variables se dividen en dos grupos: dependientes e independientes:

a) Dependientes: Dentro de las variables dependientes se estableció el índice de calidad geotécnica de cada uno de los macizos rocosos, según las discontinuidades y características que éstas presentan. Por su parte los suelos varían en función a las características y constitución de los mismos.

Las variables dependientes, están restringidas en base a las características o variables independientes de los macizos rocosos.

b) Independientes: Las variables independientes, fueron las características que presentan las discontinuidades (fallas, fracturas, contactos litológicos, etc.) y del macizo rocoso, variables que se hacen mención en función a la clasificación de *Bieniawski*: resistencia a la comprensión simple, espaciado entre continuidades, apertura entre discontinuidades y la continuidad de éstas según el rumbo y buzamiento que presenten, rugosidad de las paredes, dureza de las caras, relleno entre discontinuidades, presencia de agua en el macizo rocoso y orientación de las discontinuidades. Por su parte los suelos presentan variables independientes como el ángulo de fricción interna y la cohesión del suelo, además la humedad y la capacidad de drenar de los suelos.

1.4 ANTECEDENTES

Actualmente no hay información referente a la evaluación de macizos rocosos (geotécnica) en el área de estudio. Sin embargo se encontró información en función a la litología del área:

Marlon Coy (2012), en su Trabajo Final de Campo titulado: GEOLOGÍA EN EL PROGRESO: Análisis litológico, estructural y geomorfológico en un área de 16 km² a escala 1:20 000 en alrededores de aldea Sinaca al Noreste de San Antonio la Paz. Explica parte de la geología del área de estudio desde el punto de vista litológico y estructural, información que serviría como base para definir si además de los parámetros geotécnicos, dentro del área de estudio también afectan parámetros puramente geológicos.

Así mismo se consideraron otros documentos en los cuales se explica la diferente metodología a poder aplicarse dentro del área de estudio:

Allan Cosillo (1999) en su documento “consideraciones Geológico-Geotécnicas para el diseño de taludes en macizos rocosos” describe los diferentes parámetros geotécnicos que deben ser considerados en la elaboración de un estudio de taludes, así como los diferentes parámetros geomecánicos que influyen en la dinámica que presentan los taludes.

Ludger Suarez-Burgos (2016) en su documento “Análisis de estabilidad de taludes” explica los diferentes métodos de análisis de taludes aplicables tanto para macizos rocosos como para suelos, en los que se explican mecanismos de roturas, casos especiales de roturas en taludes, trabajo en función a taludes, casos que son fácilmente aplicados al área de estudio.

1.5 OBJETIVOS

1.5.1 General

Determinar la calidad de los macizos rocosos, para establecer las medidas correctivas aplicables en los diferentes taludes en el tramo carretero de la CA-9, del km 39 al km 51, Sanarate, El Progreso.

1.5.2 Específicos

- a) Delimitar los parámetros geomecánicos de los macizos rocosos tales como rugosidad, apertura, continuidad de las fracturas, entre otras, evaluados mediante los métodos *R.M.R.*, *S.M.R.* y esterofalsillas, a escala 1:1.
- b) Definir los parámetros geomecánicos de los suelos mediante corte directo para determinar la cohesión y ángulo de fricción interna, y su relación en la inestabilidad de los taludes a trabajar.
- c) Establecer medidas correctivas de estabilidad para cada macizo rocoso mediante un análisis cinemático, con base a elaboración e interpretación de falsillas de *Wulff*.
- d) Proponer las medidas de mitigación ingenieriles adecuadas a los taludes en estudio, en función de la clasificación geotécnica *S.M.R.* de los macizos rocosos.
- e) Delimitar las unidades litológicas y estructuras geológicas del cuadrángulo de estudio, mediante un cartografiado geológico a escala 1:20 000.

1.6 ALCANCES Y LÍMITES

1.6.1 Alcances: Los alcances fueron de tipo explicativo, ya el tema genera una problemática nacional, donde se pretende exponer cuáles son las características que no fueron consideradas al momento de realizar la ampliación de la carretera, al evaluar las distintas variables medidas a través de las metodologías especificadas en los objetivos se unificaron criterios para realizar las conclusiones finales.

1.6.2 Límites: El área de estudio tiene un límite espacial de 12 km lineales delimitados dentro de un área de 24 km², y un límite temporal de 8 meses.

1.6.3 Localización y extensión del área: El tramo carretero de estudio se encuentra ubicado al sur del municipio de Sanarate, El Progreso, en la hoja topográfica del Instituto Geográfico Nacional (IGN) de 1996, con el nombre de Sanarate 2160 II, a escala 1: 50 000 la cual está delimitado por el sistema de coordenadas *UTM WGS 84*, Edición 2- NIMA y número de serie E754, las coordenadas con ubicación geográfica, se muestran en la tabla 1 y se encuentran representadas en el mapa 1, la cual abarca un área de 24 km².

TABLA 1
COORDENADAS *UTM* DEL ÁREA DE ESTUDIO

VÉRTICE	X	Y	PROYECCIÓN
A	791000	1639000	<i>UTM WGS 84</i>
B	791000	1636000	
C	799000	1639000	
D	799000	1636000	

Fuente: Investigación de campo, enero 2017.

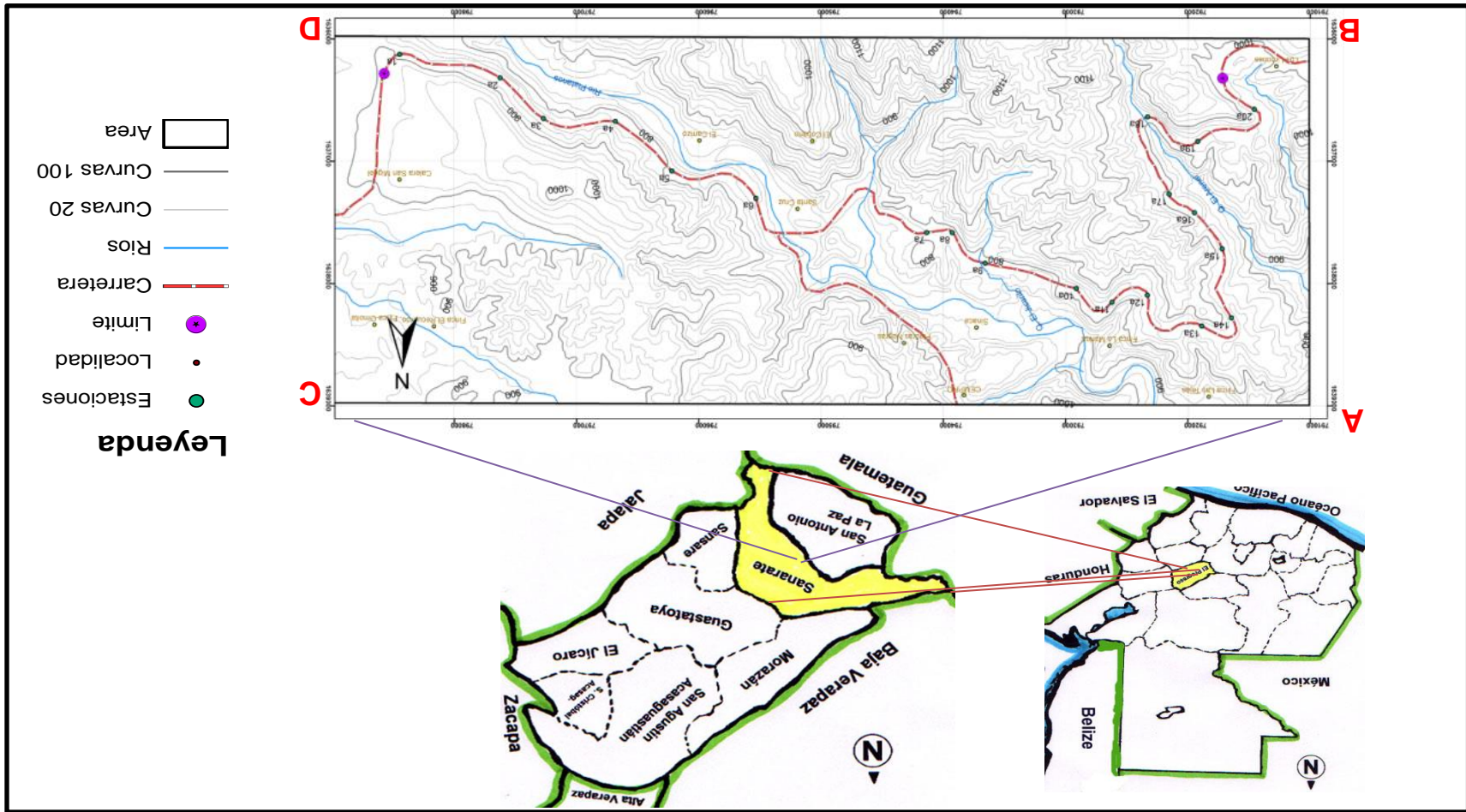
En la tabla 2 se muestran las coordenadas de los taludes estudiados, los cuales fueron divididos por segmentos con fin de realizarles una mejor interpretación de los datos al obtener de sus propiedades geomecánicas.

TABLA 2
COORDENADAS UTM DE LOS TALUDES EN ESTUDIO

ESTACIÓN	X	Y	PROYECCIÓN
1	798450	1636123	<i>UTM WGS 84</i>
2	797635	1636311	
3	797275	1636650	
4	796690	1636674	
5	796221	1637079	
6	795540	1637302	
7	794140	1637581	
8	793939	1637581	
9	793661	1637833	
10	792910	1638034	
11	792622	1638148	
12	792328	1638088	
13	791886	1638346	
14	791649	1638282	
15	791714	1637715	
16	791947	1637415	
17	792153	1637277	
18	792334	1636639	
19	791920	1636833	
20	791459	1636572	

Fuente: Investigación de campo, Enero 2017

MAPA 1
LOCALIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO



Fuente: Investigación de campo, 2017.

1.7 ACCESOS

El área se localiza en el municipio de Sanarate, del departamento de El Progreso. Se encuentra a 39 km de la ciudad de Guatemala, y a 164 km de la ciudad de Cobán, Alta Verapaz.

Para acceder desde la ciudad de Guatemala se viaja por la carretera CA-9 hasta llegar al Km 39 de dicha carretera. Ahora bien si la ruta es vía Cobán se viaja por la carretera CA-14 hasta llegar al cruce de El Rancho, que se encuentra en el departamento de El Progreso, en donde se toma la carretera CA-9 hasta llegar al km 39 de la misma, rumbo a la ciudad de Guatemala. (Mapa 2)

MAPA 2 ACCESOS AL ÁREA DE ESTUDIO



Fuente: Modificado a partir de Google Maps. 2017.

1.8 MARCO GEOLÓGICO REGIONAL

1.8.1 Estratigrafía

La estratigrafía regional del área está compuesta por rocas ígneas y metamórficas, pertenecientes al Bloque Chortís, las cuales no poseen una correlación entre sí. (figura 1)

Regionalmente Pérez Bol, cita acerca de la estratigrafía del bloque Chortí:

“El bloque Chortí contiene las exposiciones de rocas metamórficas y rocas pre-Mesozoicas más extensas y ampliamente distribuidas de la placa del Caribe. Las rocas metamórficas expuestas en diferentes áreas son bastante diversas, revelan complejas historias y pueden no ser correlativas a través del bloque. Así, el bloque Chortí en sí mismo, puede ser un mosaico de pequeños fragmentos de corteza de origen diverso.”¹

En el área de investigación se observaron flujos de basaltos, con una dirección *NW*, éstos sobreyacen a la Unidad de Anfibolita. Dicha Unidad de Basaltos se presentan al sureste del área y en la parte este central.

Pérez Bol, menciona lo siguiente acerca de la edad de unidades de roca sedimentarias e ígneas ubicadas en el bloque Chortí:

¹ Pérez Bol, Édgar Rolando. *Léxico Estratigráfico del Bloque Chortí en Guatemala*. Cobán 2000., p. 8

“El Terciario está caracterizado por depósitos de capas rojas posiblemente Miocenas o aún más antiguas, rocas sedimentarias marino-restringidas sobre el lado caribeño del bloque y flujos de lava extensos y de gran espesor. Basaltos y andesitas de posible edad Oligocena ocurren en la base e ignimbritas riolíticas del Mioceno al Plioceno, ocurren en las partes media y superior.”²

Las formaciones más generalizadas que se encuentra en el área de estudio son:

a. Grupo El Tambor

El Grupo El Tambor se considera como un cuerpo alóctono cabalgado, que antiguamente constituía la parte superior de una pequeña cuenca oceánica, el cual se encuentra constituido por varios tipos de cuerpos de roca, algunos relacionados entre sí y otros no. (Ver figura 2)

Lawrence D., define petrográficamente las unidades del grupo el Tambor como:

Rocas verdes, metachert, filita de cuarzo- clorita moscovita carbonácea, esquisto de actinolita- albita-epidota y esquisto de hornblenda-oligoclasa-epidota, Las facies metamórficas reconocidas están definidas sobre la base de ensambles en las rocas meta-volcánicas³

Donelly describe como se expone el grupo El Tambor y su composición litológica general:

“El Grupo el Tambor se extiende en el centro de Guatemala. La mayoría de las ocurrencias están dentro de la zona de sutura de

² Pérez Bol, Édgar Rolando. *Léxico Estratigráfico del Bloque Chortí en Guatemala*. Cobán 2000., p. 8

³ *Lawrence, David P. 1975, Petrology and Structural Geology of the Sanarate-El Progreso Area, Guatemala. PhD, State University of New York at Binghamton.*

Motagua, pero cuerpos alóctonos grandes también se localizan cerca de 20 km al sur y 50 km al norte de la zona. La litología dominante es serpentinita, pero son abundantes las grawacas, así como lavas en almohadillas y fragmentos de diques de diabasa. Equivalentes metamórficos, que son predominantemente anfibolitas, incluyen algunas eclogitas encerradas en serpentinita, forman grandes áreas de afloramiento adyacentes a la zona de sutura Motagua. Materiales sedimentarios asociados incluyen grawacas gruesas (algunos de los cuales son volcanoclásticas) que por lo menos en parte, están inter-estratificadas con flujos basálticos⁴. (Figura 1)

Dentro del área de estudio fueron diferenciadas unidades litológicas las cuales se relacionan con el Grupo El Tambor, entre las que resaltan la Unidad de Anfibolitas, la Unidad de Basaltos, la Unidad de Filitas, depósitos pomáceos, entre otros, de los cuales se verificó y citó la información preexistente de las mismas.

Donnelly T., hace referencia y describe la Unidad de Anfibolita Sansare como:

“La unidad más baja de Lawrence, la *anfíbolita Sansare*, que es de casi 3000 m de espesor, se considera como una acumulación metamorfizada de sedimentos, libres de flujos basálticos, estratigráficamente debajo, pero en continuidad con el resto de El Tambor, se excluye aquí de la secuencia estratigráfica normal y se considera una porción fallada de materiales originalmente similares con una relación estratigráfica incierta.”⁵

Donnelly T., acota acerca de la Unidad de Anfibolita Sansare:

“En los afloramientos esta moteada de negro a verde muy oscuro, con capas ricas en plagioclasa con foliación paralela no común.”⁶

⁴ *Donnelly, T., Northern Central America; The Maya and Chortis Blocks, p. 14-15*

⁵ *Ibidem*

⁶ *ibidem*

Para lo cual Pérez Bol, menciona sobre el producto de la cizalla:

“Dentro de las unidades metavolcánicas aunque hay pocas zonas de cizalla; hay algunas bastante cizalladas, estas últimas son gradacionales a esquistos de actinolita verde, que es la facies de esquistos verdes equivalente de los metavolcánicos multicolores. Los esquistos de actinolita varían de verde claro a oscuro, de altamente laminar a masivos, sin capas. Las capas, donde están presentes, reflejan una variación de porcentaje de albita, formándose capas blancas a verde claro intercaladas con oscuras de unos 3mm a 10cm de espesor⁷.

Pérez Bol, acota sobre las unidades de filita:

Consisten principalmente de capas alternas de cuarzo y cuarzo-clorita-moscovita-grafito-albita, del orden de 0.3 a 10cm. Vetas de cuarzo atravesadas son comunes como lo es la presencia de incipiente laminación transversal del primer conjunto. La formación de una segunda dirección de capas metamórficas está acompañada por la formación de *boudines* a partir de las capas originales de cuarzo.⁸

En el área de investigación se observó rocas ígneas tanto de origen intrusivo denominados como diques y la otra de origen efusivos que son flujos basálticos.

Pérez Bol, cita lo siguiente acerca de la formación de las unidades ígneas: “Las rocas intrusivas y basálticas pueden ser atribuidas al Jurásico Superior-Cretácico, mientras que la secuencia clástica-carbonática puede ser del Cretácico Inferior (*Beccaluva et al., 1995*)”⁹

⁷ Pérez Bol, Édgar Rolando. *Léxico Estratigráfico del Bloque Chortí en Guatemala*. Cobán 2000., p. 139-140

⁸ *Ibidem*

⁹ *Ibidem*

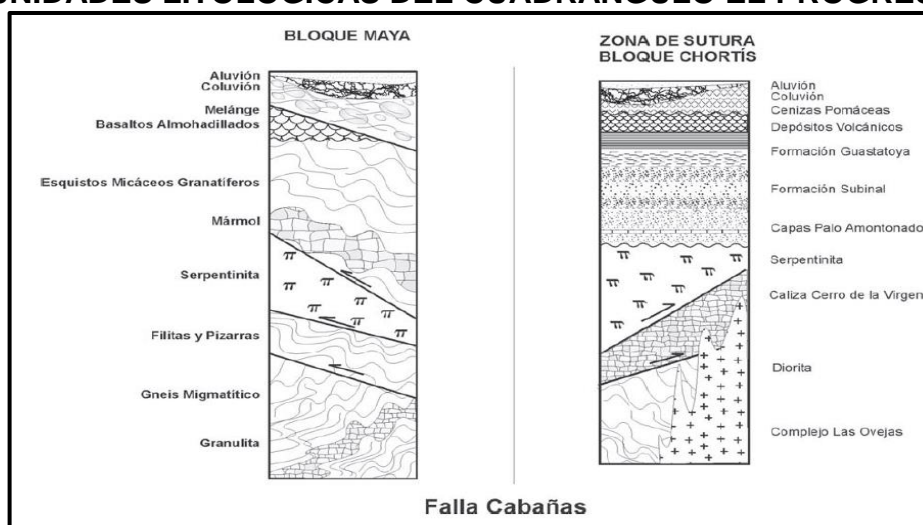
Dentro del grupo El Tambor se logró observar la presencia de diques con cierta deformación, para lo cual Pérez Bol acota la diferencia entre estas estructuras ígneas.

Los diques pueden ser reconocidos relativamente fáciles en el campo por el tamaño de grano, el cual es más grueso que los de los flujos meta-basálticos, las relaciones ligeramente atravesadas a la estratificación de rocas El Tambor, y por la menor intensidad de plegamiento de los diques¹⁰ (figura 2)

Pérez bol acota lo siguiente acerca de la caracterización de rocas intrusivas:

Existen dos tipos principales de rocas intrusivas, con algunas composiciones intermedias; hay basaltos diabásicos portadores de cuarzo a andesitas. Pequeños *stocks* de diorita también están presentes. La mineralogía de los diques de basalto es plagioclasa y piroxeno, con cantidades menores de hornblenda y cuarzo.¹¹

FIGURA 1
UNIDADES LITOLÓGICAS DEL CUADRÁNGULO EL PROGRESO

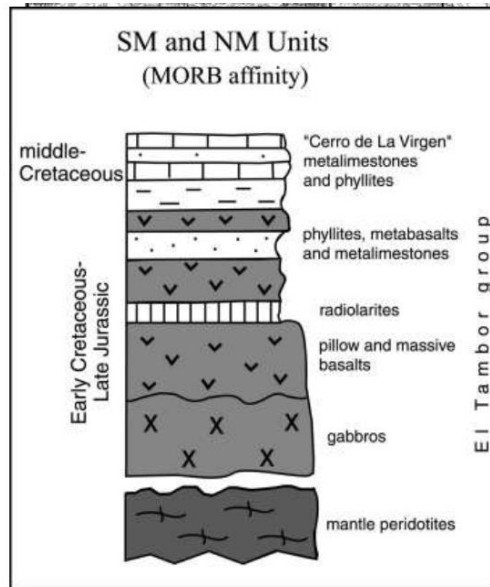


Fuente: Tomada de Mauricio Chiquin Y., Cartografía geológica del cuadrángulo El Progreso escala 1:50,000. Año 2003.

¹⁰ Pérez Bol, Édgar Rolando. *Léxico Estratigráfico del Bloque Chortí en Guatemala*. Cobán 2000., p. 139-140

¹¹ *Ibidem*

FIGURA 2
UNIDADES LITOLÓGICAS DEL GRUPO EL TAMBOR

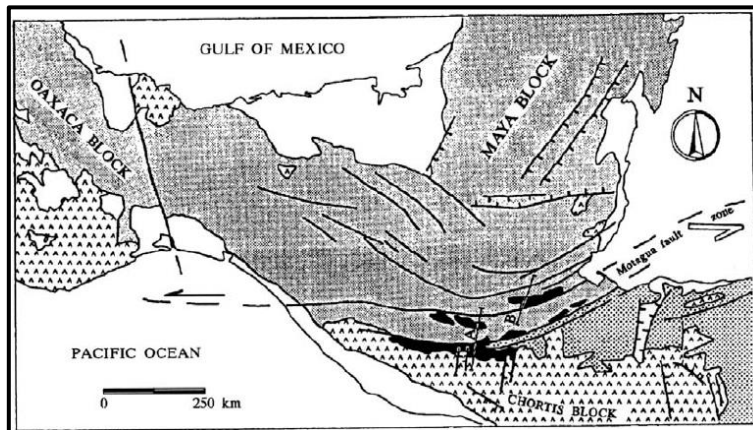


Fuente: Tomada de *Giuseppe Giunta, The Motagua suture zone in Guatemala. Año 2002.*

1.8.2 Geología estructural

Tectónicamente, Guatemala se encuentra constituida por la interacción de tres placas tectónicas que son: la del Caribe la cual subduce a la placa de Cocos, dicha subducción es la generadora de la cadena volcánica ubicada al sur de Guatemala. La placa de Norteamérica genera un movimiento sinextral con respecto de la placa del Caribe, dicho movimiento es visible y se encuentra ubicado en la zona de sutura del Motagua, además cabe mencionar que en esta zona se encuentra la unión entre dos bloques. (figura 3)

FIGURA 3
ESQUEMA TECTÓNICO DE LA ZONA DE SUTURA DEL MOTAGUA



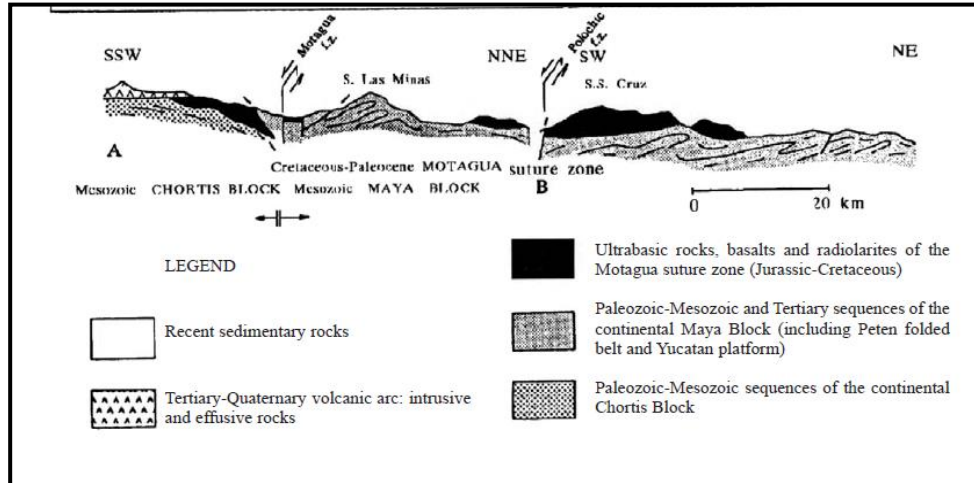
Fuente: Tomada de Giunta G., Geología de las márgenes de la placa del Caribe: Generalidades en Guatemala, Año 2002

En lo que refiere a la tectónica del área, ésta regida por la falla del Motagua (figura 4) la cual tiene un movimiento de tipo sinextral, dicha falla se encuentra ubicada al norte de área de investigación y se propone que es la principal generadora de las estructuras geológicas ubicadas en el área.

Finch y *Dengo* en el documento de “*The Suture Motagua*” acotan sobre las fallas transformantes: “Que en Guatemala, las unidades ofiolíticas afloran a lo largo de las fallas transformadas de Polochic y Motagua”¹²

¹² *Giunta, G., Et. al Geología de las márgenes de la placa del Caribe: Generalidades en Guatemala, Costa Rica, La Española y resultados preliminares del análisis de una transversal en la cordillera de la costa de Venezuela.*

FIGURA 4
PERFIL SW-NE DE LA ZONA DE SUTURA DEL MOTAGUA



Fuente: Tomada de Giunta G., Geología de las márgenes de la placa del Caribe: Generalidades en Guatemala, Año 2002.

Guatemala se encuentra compuesta por dos bloques de roca, que antiguamente se encontraban separados, pero debido a un transporte tectónico existió una colisión entre ambos, se generó así una zona de sutura. El área de investigación al que se le hace énfasis en el presente informe se encuentra ubicada al sur de la zona de sutura del Motagua, dentro del Bloque Chortís.

Giunta acota sobre la colisión de los dos bloques:

“Estas últimas fallas (Polochic y Motagua) representan secciones discretas del Terciario Tardío que están sobreimpuestas a una zona de sutura del Mesozoico-Terciario originada por la colisión transpresiva de los bloques continentales Maya (México meridional, Guatemala septentrional y Belice) y Chortis (Guatemala, Honduras, El Salvador y Nicaragua), con la consiguiente destrucción de un área oceánica interpuesta entre ellos”¹³.

¹³ *Giunta, G., Et. al* Geología de las márgenes de la placa del Caribe: Generalidades en Guatemala, Costa Rica, La Española y resultados preliminares del análisis de una transversal en la cordillera de la costa de Venezuela.

En la parte norte del área de investigación se observaron 3 unidades de roca que muestran evidencia de cizallamiento, la primera es la Unidad de Basaltos las cuales mostraban estructuras de pseudo-foliación que es una estructura indicadora de cizallamiento, también las Unidades de Filitas y Anfibolita se muestran con un cierto grado de cizalla.

Giunta menciona sobre la generación de zonas de cizalla como resultado de la colisión de los bloques:

“Los residuos deformados de esta área afloran en una ancha zona de cizalla, asociada a cuerpos abudados, ubicados a lo largo de fallas, o como unidades tectónicas abducidas sobre el bloque Maya, con vergencia generalmente septentrional (Verapaz, Sierra de Santa Cruz, Valle del Motagua, Juan de Paz) y sobre el Bloque Chortís con vergencia meridional (El Tambor).”¹⁴

En el área se observó afloramientos de anfibolita que es una roca muy antigua y generada a alta presión, lo que indica que el área de investigación se encuentra en una zona de falla, como evidencia se observaron afloramientos con presencia de fallas que fueron de utilidad para la emanación de fluidos hidrotermales.

Harlow, puntualiza lo siguiente acerca de algunas unidades ubicadas a los lados del valle del Motagua: “40 km a cada lado del valle del río Motagua, se encuentra una frontera de zona de fallas complicadas que parte dos bloques donde existen rocas de alta P / T.”¹⁵

Weyl, comenta lo siguiente acerca de la coalición de los bloques Maya y Chortís:

¹⁴ Giunta, G., Et.a l Geología de las márgenes de la placa del Caribe: Generalidades en Guatemala, Costa Rica, La Española y resultados preliminares del análisis de una transversal en la cordillera de la costa de Venezuela.

¹⁵ *George E. Harlow, et al. High-pressure, metasomatic rocks along the Motagua Fault Zone, Guatemala pag. 6*

*“La interacción entre bloques Maya y Chortí, empezó durante la colisión del Maastrichtiano (orógeno laramidico), la cual dio como resultado un relieve accidentado en los márgenes de cada bloque. La división entre los bloques es la zona de sutura Motagua.”*¹⁶

Pérez Bol, comenta acerca de la configuración actual de la tectónica regional y de la cinemática de los bloques:

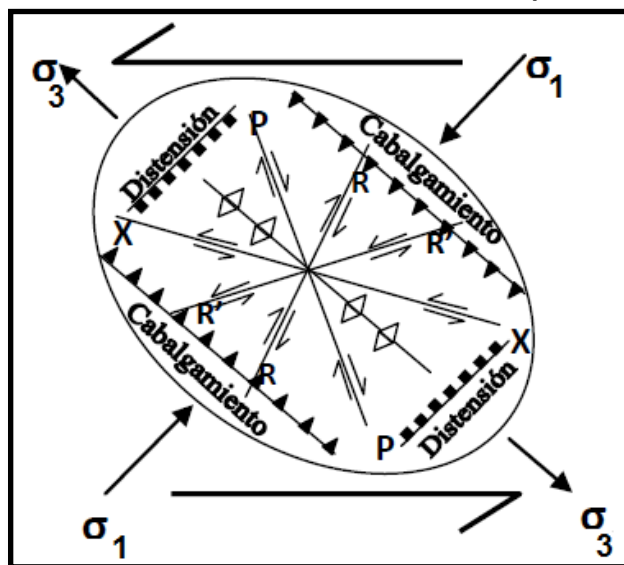
“En la configuración tectónica regional el bloque Chortí limita con el bloque Maya al NW, con el bloque Chorotega al SE y con la Placa de Cocos, al Sur. La interacción de las placas produce dos localidades de triple unión e intensa actividad tectónica, principalmente en las zonas de falla y la cadena volcánica asociada a la Fosa Mesoamericana. El bloque Chortí es el mejor ejemplo de terreno alóctono en la región caribeña. Las reconstrucciones Mesozoicas más aceptadas de la historia cinemática del bloque, sitúan su posición original hacia el Oeste, en continuidad con rocas de basamento del Sur de México. Esto implica un desplazamiento de unos 1 100 a 1 200 km, hasta su posición actual (Dengo, 1985; Azema et al., 1985; Donnelly et al., 1990a; Debrabant, et al., 1996; Nelson, 1997).”¹⁷

La zona de sutura del Motagua se caracteriza por tener una elipse de deformación de tipo sinistral (figura 5).

¹⁶ Weyl, R. *Geology of Central America. Geologisch-paleontologist Institut Der Universitat Gie Ben USA 1980*

¹⁷ Pérez Bol, Édgar Rolando. *Léxico Estratigráfico del Bloque Chortí en Guatemala.*

FIGURA 5
ELIPSE DE DEFORMACIÓN PARA MOVIMIENTO SINISTRAL (MODELO
TEÓRICO FALLA MOTAGUA)



Fuente: Tomada de *The mapping of geological structures*, Ken McClay, Department of Geology, Royal Holloway University of London, Elipse de Deformacion, Sinistral

CAPÍTULO 2 METODOLOGÍA

En este capítulo se describen las metodologías utilizadas para la clasificación geomecánica de los taludes estudiados dentro del área de investigación, así como de la geología local. También se describe en los cuadros los valores utilizados por estas clasificaciones y las ponderaciones estimadas basadas en las metodologías descritas.

2.1 CLASIFICACIÓN DE *BIENIAWSKI* O *R.M.R. (ROCK MASS RATING)*

Los parámetros que se utilizan en esta metodología, son generalmente estructurales, agregados algunos aspectos hidrológicos y físicos, estos fueron:

1. Resistencia a la comprensión simple de la roca intacta, es decir de la parte de la roca que no presenta discontinuidades estructurales.
2. *R.Q.D.* parámetro de gran interés, ya que sirve para seleccionar el revestimiento de los taludes. (fotografía 1)
3. Espaciado de las diaclasas o discontinuidades, que es la distancia medida entre los planos de discontinuidades de cada familia.
4. Naturaleza de las diaclasas, el cual consiste en considerar parámetros como: apertura de las caras de las discontinuidades, continuidad de las diaclasas o discontinuidad según su rumbo y buzamiento, rugosidad, dureza de las caras de la discontinuidad y relleno de las juntas.
5. Presencia del agua, en un macizo rocoso diaclasado, el agua tiene gran influencia sobre su comportamiento, la descripción deberá de indicar si se encuentra completamente seco, húmedo, agua a presión moderada y agua a presión fuerte.
6. Orientación de las discontinuidades.¹⁸ (en este caso para taludes)

¹⁸Bongiorno, Francisco, Et. Al. Clasificaciones geomecánicas de los macizos rocosos según: Bieniawski, Barton, Romana, Hoek y Brown. Facultad de Ingeniería. Escuela de Geología. Universidad de los Andes. 2 012.

En la tabla 3 se detallan las ponderaciones para cada uno de los parámetros mencionados; en el mismo se tienen los intervalos en los cuales se divide cada uno de los parámetros para realizar la sumatoria y así obtener la clasificación geotécnica para los macizos rocosos.

TABLA 3
PARÁMETROS DE CLASIFICACIÓN SISTEMA R.M.R.

1	Resistencia de la matriz rocosa (Mpa)	Ensayo de carga puntual	> 10	10 - 4	4 - 2	2 - 1	<1	
		C. Simple	> 250	250 - 100	100 - 50	50 - 25	<25	
	Puntuación		15	12	7	4	2	
2	R.Q.D. (%)		100 - 90	90 - 75	75 - 50	50 - 25	< 25	
	Puntuación		20	17	13	6	3	
3	Separación entre diaclasas (m)		> 2	2 - 0.6	0.6 - 0.2	0.2 - 0.06	< 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	1 - 5	> 5	
		Puntuación		6	5	3	1	0
		Rugosidad	Muy rugosa	Rugosa	Lig. rugosa	Ondulada	Suave	
		Puntuación		6	5	3	1	0
		Relleno	Ninguno	Relleno duro < 5 mm	Relleno duro > 5 mm	Relleno blando < 5 mm	Relleno blando > 5 mm	
		Puntuación		6	4	2	2	0
		Alteración	Inalterada	Lig. alterada	Mod. alterada	Muy alterada	Descompuesta	
		Puntuación		6	5	3	1	0
5	Húmedad		Seco	Lig. húmedo	Húmedo	Goteando	Agua fluyendo	
	Puntuación		15	10	7	4	0	

Fuente: Rodríguez, Javier Alfonso. Ingeniería Geológica: Caracterización de macizos rocosos. Facultad de Geología (Petrología y Geoquímica). Universidad de Oviedo, 2007.

Posterior a obtener el valor de cada uno de los incisos anteriores, para definir el índice *R.M.R.* de *Bieniawski*, se realizó lo siguiente:

1. Se sumaron las 5 variables o parámetros calculados, dando como resultado un valor índice.
2. El parámetro 6, se refiere a la orientación de las discontinuidades, en el cual se evalúa el buzamiento de las discontinuidades, si estos se

presentan de manera favorable, desfavorable o neutra respecto al talud en estudio (figura 6). Cosillo (2012), propone un sistema de ponderación en base a la metodología de *R.M.R.* de *Bieniawski* aplicado para taludes. (tabla 4)

FOTOGRAFÍA 1
MEDICIÓN DE R.Q.D. POR MEDIO DEL CONTEO DE DISCONTINUIDADES CON
EL USO DE UN MARCO DE 1 MT².



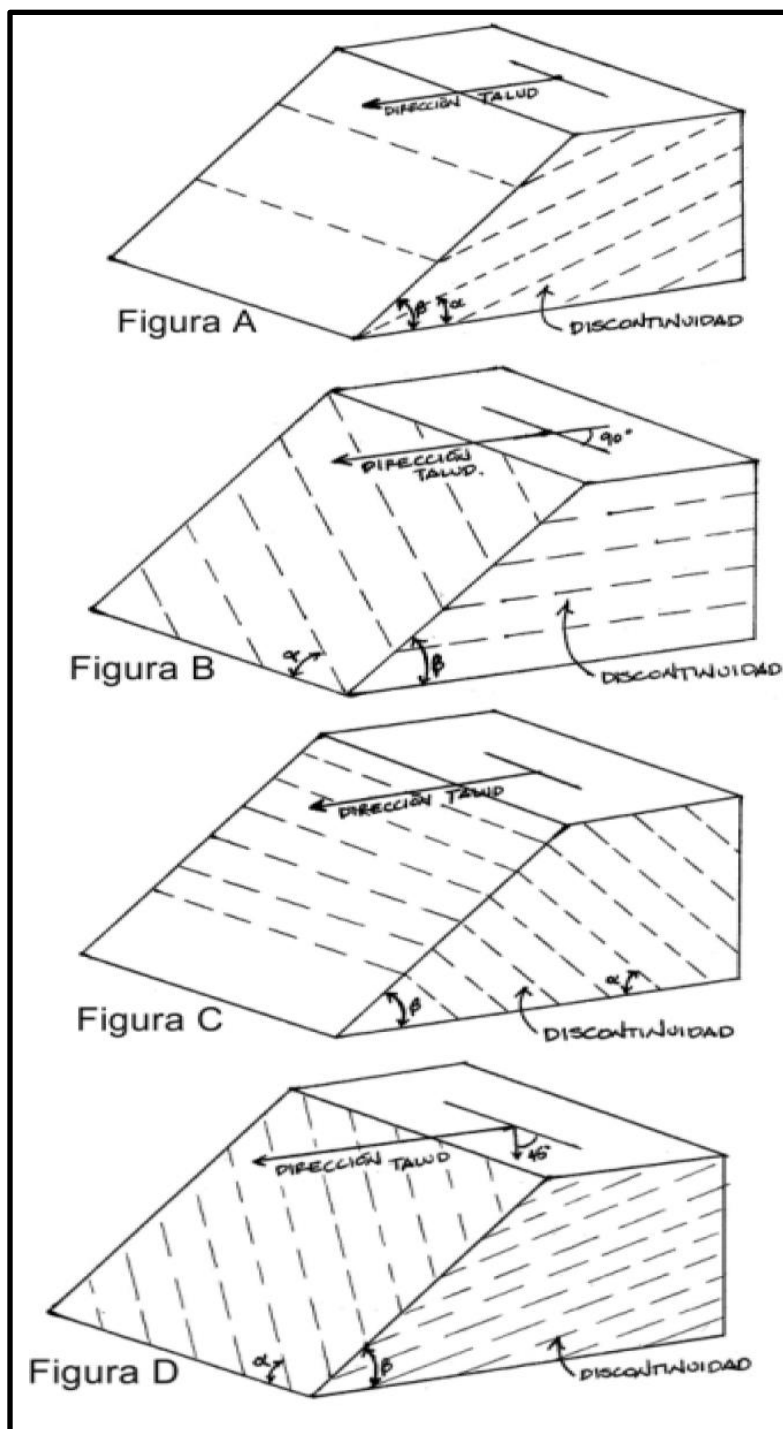
Tomada por: Bermudez J. 2017

TABLA 4
SISTEMA DE PONDERACIÓN DE R.M.R. PARA TALUDES

Geometría	Buzamiento	Designación	Pts.
Dirección de la discontinuidad paralelo a la dirección del talud ($\pm 20^\circ$ de la dirección del talud) figura A	De la discontinuidad menor a la del talud	Muy desfavorable	-60
	De la discontinuidad igual a la del talud	Desfavorable	-50
	De la discontinuidad mayor a la del talud	Favorable	-5
	De la discontinuidad casi horizontal	Muy favorable	0
Dirección de la discontinuidad contraria a la del talud (contrabuzamiento) ($\pm 20^\circ$ de la dirección del talud) figura C	De la discontinuidad mayor o igual a la del talud	Regular	-25
	De la discontinuidad menor a la del talud	Muy favorable	0
Dirección de la discontinuidad perpendicular a la dirección del talud ($\pm 20^\circ$ de la dirección del talud) figura B	Con rango de 0 a 90°	Favorable	-5
Dirección de la discontinuidad a 45° de la dirección del talud y favor a este ($\pm 10^\circ$ de la dirección del talud) figura D	Con rango de 0 a 90°	Regular	-25
Dirección de la discontinuidad a 45° de la dirección del talud y contraria a este ($\pm 10^\circ$ de la dirección del talud) figura D	Con rango de 0 a 90°	favorable	-5

Fuente: Cosillo, Allan. Consideraciones geológicas - geotécnicas para el diseño de taludes en macizos rocosos. Trabajo de graduación, facultad de Ingeniería. Guatemala, USAC, 1999.

FIGURA 6
ESQUEMA IDEALIZADO DE TALUDES SEGÚN COSILLO 1999



Fuente: Cosillo, Allan. Consideraciones geológicas - geotécnicas para el diseño de taludes en macizos rocosos. Trabajo de graduación, facultad de Ingeniería. Guatemala, USAC, 1999.

Luego de obtener un valor índice de la orientación de las discontinuidades, ese se le sustrajo al valor índice obtenido cuando se sumaron los 5 primeros parámetros, al realizar dicha operación se obtiene el índice *R.M.R.* y se busca ese valor en la tabla 5, tabla donde se muestra la ponderación para el macizo, esto según cada uno de los valores a obtenerse y la sumatoria de los mismos para cada uno de los macizos rocosos en el área de estudio.

TABLA 5
CALIDAD DEL MACIZO ROCOSO CON RELACIÓN AL ÍNDICE *R.M.R.*

CLASE	CALIDAD	VALORACIÓN R.M.R.	COHESIÓN	ÁNGULO DE ROZAMIENTO
I	MUY BUENA	100-81	4 kg/cm ²	➤ 45 ⁰
II	BUENA	80-61	3-4 kg/cm ²	35 ⁰ - 45 ⁰
III	MEDIA	60-41	2-3 kg/cm ²	25 ⁰ - 35 ⁰
IV	MALA	40-21	1-2 kg/cm ²	15 ⁰ - 25 ⁰
V	MUY MALA	<20	<1 kg/cm ²	➤ 15 ⁰

Fuente: Bongiorno, Francisco, Et. Al. Clasificaciones geomecánicas de los macizos rocosos según: Bieniawski, Barton, Romana, Hoek y Brown. Facultad de Ingeniería. Escuela de Geología. Universidad de los Andes. 2012.

2.2 CLASIFICACIÓN GEOMECÁNICA ROMANA O SISTEMA *S.M.R.* (SLOPE MASS RATING) PARA TALUDES

La clasificación *S.M.R.* es un método que determina los factores de ajuste para aplicar adecuadamente la clasificación de *Bieniawski* exclusivamente a los taludes.

En esta clasificación se considera el mecanismo de falla para los taludes, los cuales pueden ocurrir según formas muy diferentes, está subordinada por las discontinuidades y se produce según las superficies formadas por las juntas.

El índice *S.M.R.* para taludes se determina de la siguiente manera:

Se obtiene del índice *R.M.R.* básico al sumar un factor de ajuste, en función de la orientación de las juntas y un factor de excavación que depende del método utilizado para la realización del talud. La fórmula que define el sistema *S.M.R.* Es la siguiente:

$$S.M.R. = R.M.R._{(básico)} + (F1 * F2 * F3) + F4$$

Al referirse al *R.M.R.* básico, éste se obtiene de las suma de las valoraciones correspondientes a cinco parámetros tales como: Resistencia a compresión simple, *R.Q.D.*, separación de las discontinuidades, condición de las discontinuidades y flujo de agua en las discontinuidades, se obtiene un valor entre 1 - 100.

En el caso de los factores de corrección, se basan en la relación que presentan las discontinuidades respecto al talud, según el rumbo y buzamiento de las mismas. Estos se amplían a continuación:

F1: depende del paralelismo entre el rumbo de las juntas y de las caras del talud, varía entre 1,00 (Cuando ambos rumbos son paralelos) y 0,15 (cuando el ángulo entre rumbos es mayor a 30° y las probabilidad de falla es muy baja). Estos valores, se ajustan a la siguiente expresión:

$$F1 = (1 - \text{Sen} (a_j - a_s))^2$$

Siendo a_j el valor del buzamiento de la junta y a_s el buzamiento del talud.

F2: depende del buzamiento de la discontinuidad en la rotura plana. Varía entre 1 (para las juntas con buzamiento superior a 45°) y 0,15) para juntas con buzamiento inferior a 20°. Puede ajustarse según la siguiente relación:

$$F2 = \text{tg}^2 b_j$$

Donde b_j es el valor del buzamiento de la discontinuidad.

F3: refleja la relación entre el buzamiento de la junta y el talud. Se han mantenido los valores propuestos por Bieniawski en 1976, que son siempre negativos.

El factor F3 hace referencia a la tabla 6, el cual es utilizado en el sistema *R.M.R.* como factor de corrección.

TABLA 6
FACTORES DE AJUSTE PARA LA ORIENTACIÓN DE LAS JUNTAS

Caso	Muy Favorable	Favorable	Normal	Desfavorable	Muy desfavorable
P $ a_j - a_s $ T $ a_j - a_s - 180^\circ $	$> 30^\circ$	$30^\circ - 20^\circ$	$20^\circ - 10^\circ$	$10^\circ - 5^\circ$	$< 5^\circ$
P/T F1	0,15	0,40	0,70	0,85	1,00
P $ b_j $ T F2	$< 20^\circ$	$20^\circ - 30^\circ$	$30^\circ - 35^\circ$	$35^\circ - 45^\circ$	$> 45^\circ$
P F2 T F2	0,15 1	0,40 1	0,70 1	0,85 1	1,00 1
P $b_j - b_s$ T $b_j + b_s$	$> 10^\circ$ $< 110^\circ$	$10^\circ - 0^\circ$ $110^\circ - 120^\circ$	0° $> 120^\circ$	$0^\circ - (-10^\circ)$ -	$< -10^\circ$ -
P/T F3	0	-6	-25	-50	-60

Fuente: *Bongiorno*, Francisco, Et. Al. Clasificaciones geomecánicas de los macizos rocosos según: *Bieniawski*, *Barton*, *Romana*, *Hoek y Brown*. Facultad de Ingeniería. Escuela de Geología. Universidad de los Andes. 2012.

Donde cada abreviatura hace relación a:

P = Rotura planar

T = Rotura por vuelco

a_s = Dirección de buzamiento del talud

b_s = Buzamiento del talud

a_j = Dirección de buzamiento de las discontinuidades

b_j = Buzamiento de las juntas

F4: es un ajuste que depende del tipo de excavación que haya tenido el talud. Esta va desde un talud natural hasta una voladura mecanizada, los cuales arrojan valores según el tipo de excavación. (tabla 7)

TABLA 7
FACTOR DE AJUSTE POR EL MÉTODO DE EXCAVACIÓN

Método	Talud natural	Precorte	Voladura suave	Voladura mecanizada	Voladura deficiente
F4	+15	+10	+8	0	-8

Fuente: Bongiorno, Francisco, Et. Al. Clasificaciones geomecánicas de los macizos rocosos según: *Bieniawski, Barton, Romana, Hoek y Brown*. Facultad de Ingeniería. Escuela de Geología. Universidad de los Andes. 2012.

Según la ponderación de cada uno de los aspectos que se deben tomar en el sistema *S.M.R.*, se realiza el producto de los tres primeros factores y se suman al valor *R.M.R.* y el factor según método de excavación. Al tener el resultado de la sumatoria se obtiene el índice *S.M.R.* para los taludes, los cuales están descritos en la tabla 8:

TABLA 8
CLASES DE ESTABILIDAD SEGÚN EL S.M.R. (ROMANA 1985)

Clase No.	V	IV	III	II	I
SMR	0 – 20	21 – 40	41 – 60	61 – 80	81 – 100
Descripción	Muy mala	Mala	Normal	Buena	Muy buena
Estabilidad	Totalmente inestable	Inestable	Parcialmente inestable	Estable	Totalmente estable
Fallas o roturas	Grandes roturas por planos continuos o por masa	Juntas o grandes cuñas	Algunas juntas o muchas cuñas	Algunos bloques	Ninguna
Tratamiento	Reexcavación	Corrección	Sistemático	Ocasional	Ninguno

Fuente: Bongiorno, Francisco, Et. Al. Clasificaciones geomecánicas de los macizos rocosos según: *Bieniawski, Barton, Romana, Hoek y Brown*. Facultad de Ingeniería. Escuela de Geología. Universidad de los Andes. 2012.

2.3 TIPOS DE MECANISMOS DE ROTURA EN TALUDES

Los diferentes tipos de rotura o mecanismos de falla están condicionados por el grado de fracturación de los macizos rocosos, también por la distribución y orientación de las discontinuidades con respecto al talud, queda así la estabilidad definida por los parámetros resistentes de las discontinuidades de la matriz rocosa.

Se tienen contemplados diferentes tipos de rotura a encontrarse al evaluar los taludes, dentro de los cuales destacan los de tipo circular, planar, cuña y volteo, según las discontinuidades que afecten al macizo rocoso.

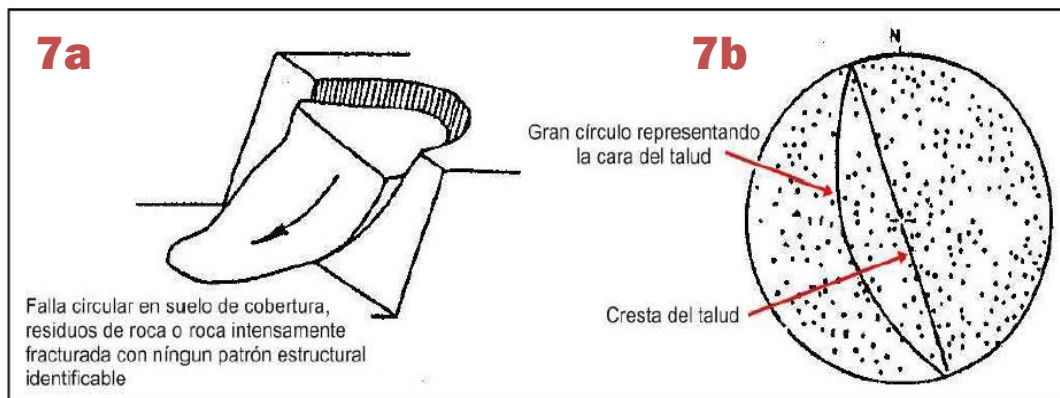
Para la determinación y clasificación de los diferentes tipos de roturas se utilizan modelos estereográficos por medio de falsillas equiareales y equiángulares. Estos tipos de rotura son descritos a continuación:

2.3.1 Rotura circular

Se observan en macizos rocosos los cuales presentan discontinuidades sin una orientación bien definida, varios planos interceptándose entre sí fragmentando el macizo.

En la figura 7a se tiene la forma de rotura de tipo circular con una superficie curva. Mientras que la figura 7b muestra la representación estereográfica, en el cual se observa la forma desordenada de los polos de los planos de discontinuidades del macizo rocoso.

FIGURA 7
ROTURA CIRCULAR EN MACIZOS ROCOSOS

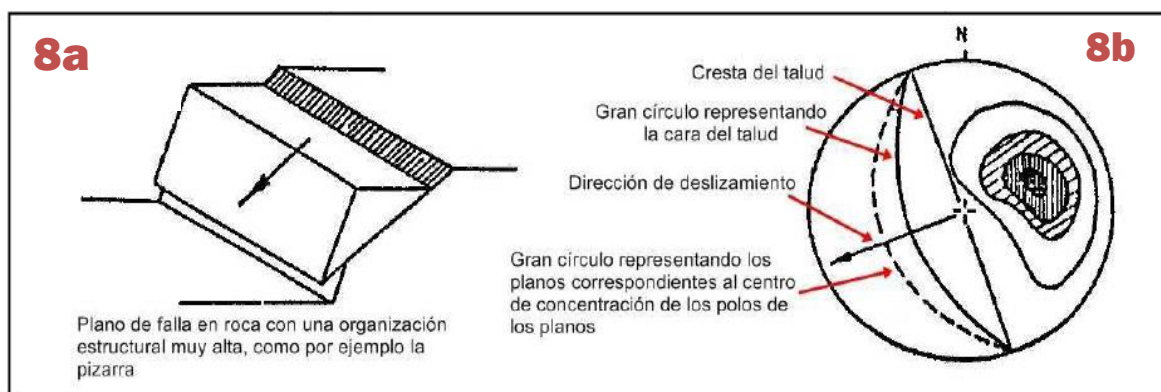


Fuente: Cosillo, Allan. Consideraciones geológicas - geotécnicas para el diseño de taludes en macizos rocosos. Trabajo de graduación, facultad de Ingeniería. Guatemala, USAC, 1999.

2.3.2 Rotura planar

Este tipo de rotura se produce a favor de una superficie preexistente, que en este caso es una discontinuidad que presente la misma dirección que el talud. La figura 8a muestra la forma de una rotura del tipo planar, mientras que en la figura 8b se tiene la representación estereográfica de la rotura planar del talud.

FIGURA 8
ROTURA PLANAR EN MACIZOS ROCOSOS



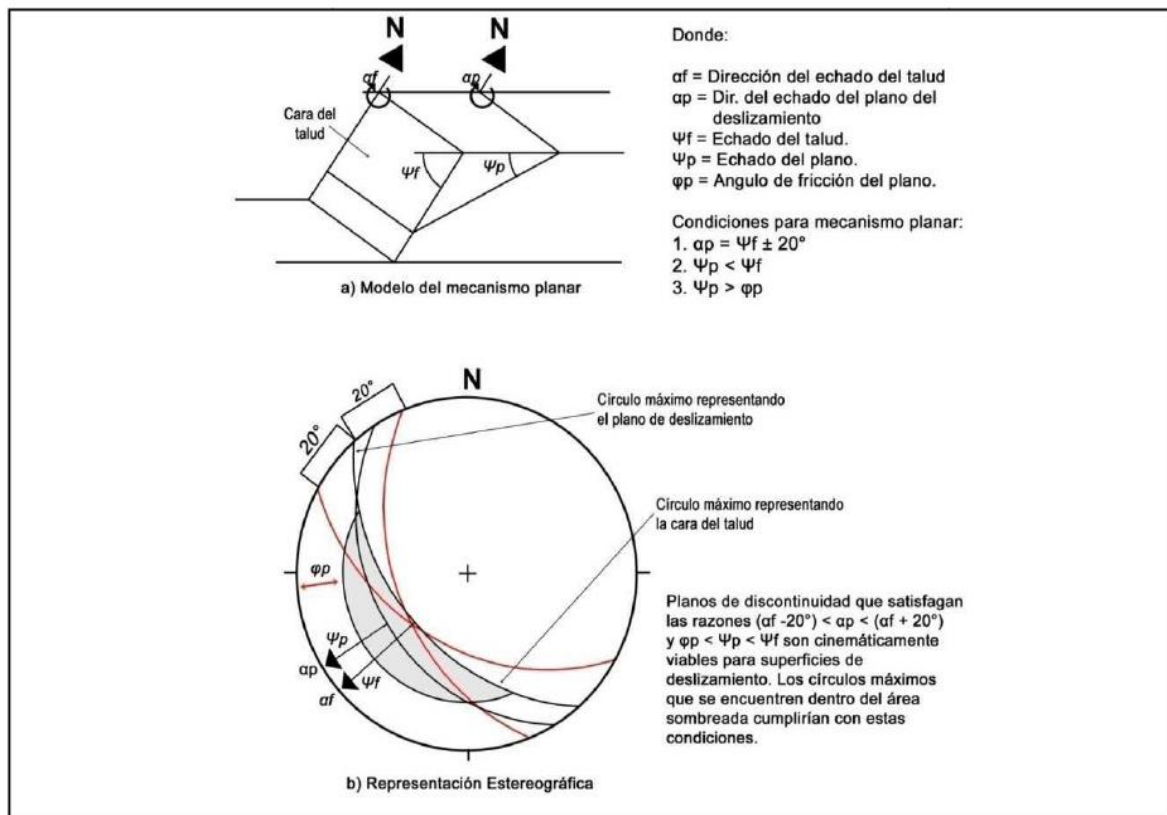
Fuente: Cosillo, Allan. Consideraciones geológicas - geotécnicas para el diseño de taludes en macizos rocosos. Trabajo de graduación, facultad de Ingeniería. Guatemala, USAC, 1999.

Las condiciones estructurales para que ocurra una falla del tipo planar se resumen a continuación:

1. El rumbo de la discontinuidad planar debe estar 20° dentro del rumbo de la cara del talud, en ambas direcciones: $\alpha_p = \alpha_f \pm 20^\circ$.
2. El echado de la discontinuidad planar debe ser menor que el echado de la cara del talud, además de inclinarse hacia dicha cara: $\psi_p < \psi_f$.
3. El echado de la discontinuidad debe ser mayor que el ángulo de fricción de la superficie de deslizamiento: $\psi_f > \varphi_p$.¹⁹

Estas relaciones pueden observarse de mejor manera en la figura 9.

FIGURA 9
ANÁLISIS CINEMÁTICO PARA MECANISMO DE FALLA TIPO PLANAR



Fuente: Armas Zagoya, Juan Miguel. Cartografía geológica estructural del valle de Huizachal, como base para el análisis de estabilidad de taludes de la carretera Rumbo Nuevo, Tamps., México. Facultad de Ciencias de la Tierra. Universidad Autónoma de Nuevo León. Nuevo León, 2004.

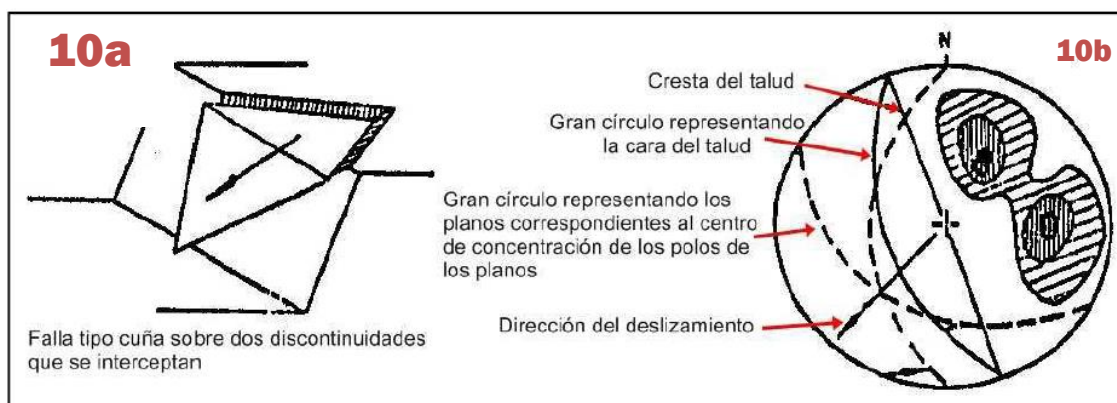
¹⁹Armas Zagoya, Juan Miguel. Cartografía geológica estructural del valle de Huizachal, como base para el análisis de estabilidad de taludes de la carretera Rumbo Nuevo, Tamps., México. Facultad de Ciencias de la Tierra. Universidad Autónoma de Nuevo León. Nuevo León, 2004.

2.3.3 Rotura en cuña

La rotura en cuña se da cuando el deslizamiento ocurre a través de la intersección de por lo menos dos discontinuidades, la cual buza hacia la cara del talud en un ángulo oblicuo hacia la cara del corte, forma así un bloque en forma de cuña. Por lo general, las cuñas son expuestas por excavaciones o cortes que descubren la línea de intersección sobre el cual se produce el deslizamiento.

En la figura 10a se observa el diagrama de una rotura en cuña a través de dos planos de discontinuidades. La figura 10b muestra la representación estereográfica de dos familias de polos y la intersección de los planos formados por esto, se debe notar que el deslizamiento ocurre sobre la línea de intercepción.

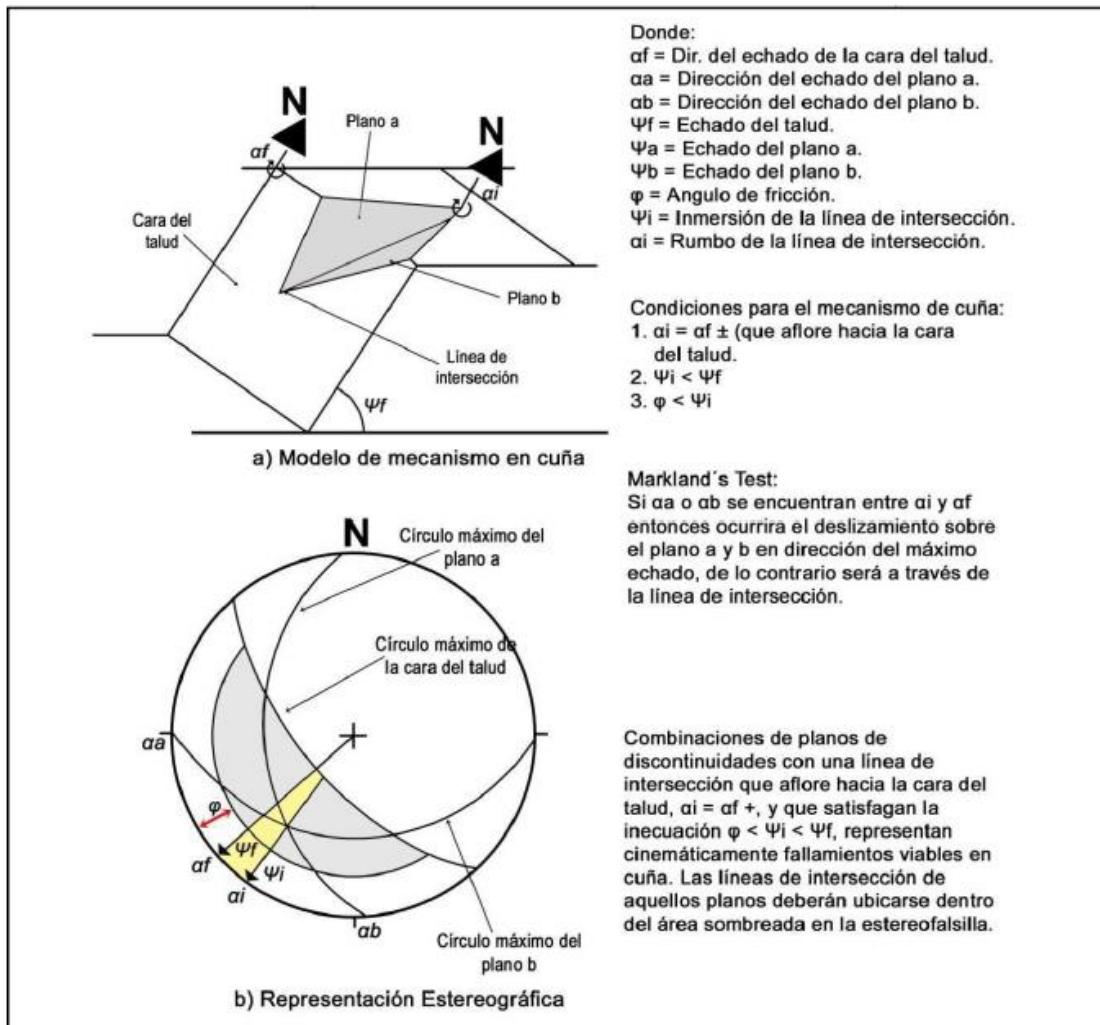
FIGURA 10
ROTURA EN CUÑA PARA MACIZOS ROCOSOS



Fuente: Cosillo, Allan. Consideraciones geológicas - geotécnicas para el diseño de taludes en macizos rocosos. Trabajo de graduación, facultad de Ingeniería. Guatemala, USAC, 1999.

Para que se produzca este tipo de rotura, los dos planos que afectan deben aflorar en la superficie del talud, en la figura 11 se resumen las condiciones que hacen posible este tipo de rotura.

FIGURA 11
ANÁLISIS CINEMÁTICO PARA FALLAMIENTOS EN CUÑA



Fuente: Armas Zagoya, Juan Miguel. Cartografía geológica estructural del valle de Huizachal, como base para el análisis de estabilidad de taludes de la carretera Rumbo Nuevo, Tamps., México. Facultad de Ciencias de la Tierra. Universidad Autónoma de Nuevo León. Nuevo León, 2004.

Para la formación y ocurrencia de la rotura en cuña se deben observar varios factores, primeramente de la litología y la estructura de los macizos rocosos. Los macizos con juntas ortogonales bien definidas o clivajes agregados a la estratificación o foliación inclinada pueden favorecer a la formación de este mecanismo. De acuerdo a lo mostrado en la figura 11, las condiciones para esta rotura son:

1. El rumbo de la línea de intersección debe ser aproximadamente igual a la dirección del echado de la cara del talud.

$$\alpha_i = \alpha_f \pm (\text{debe aflorar hacia la cara del talud})$$

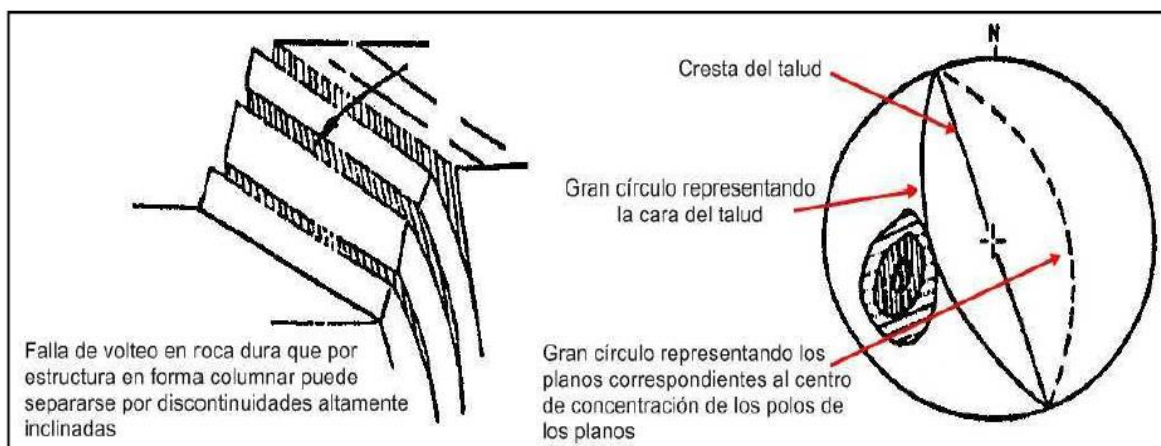
2. La inmersión de la línea de intersección debe ser menos que el echado de la cara del talud. Bajo esta condición, se dice que la línea de intersección aflora en dirección hacia la cara del talud, $\psi_i < \psi_f$.

3. La inmersión de la línea de intersección debe ser mayor que el ángulo de fricción del o los planos de deslizamiento. Si los ángulos de fricción para ambos planos son marcadamente diferentes, un ángulo promedio de ellos puede ser apreciable, $\varphi < \psi_i$.

2.3.4 Rotura por vuelco

Los vuelcos también denominados *toppling* son movimientos que implican una rotación de unidades con forma de columna o bloques sobre un plano base, estos movimientos se encuentran influenciados por la acción de la gravedad y fuerzas ejercidas por las unidades adyacentes o incluso por la inclusión de agua. (Figura 12)

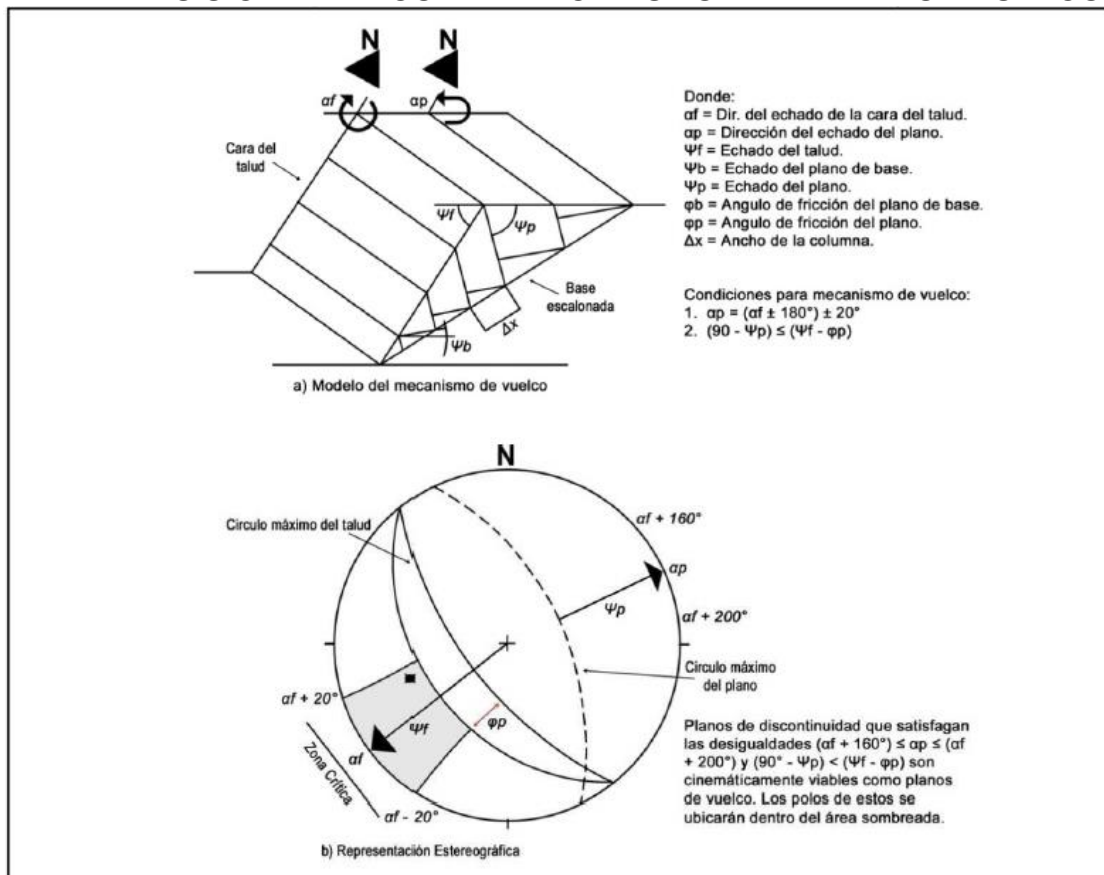
FIGURA 12
ROTURA POR VUELCO EN MACIZOS ROCOSOS



Fuente: Cosillo, Allan. Consideraciones geológicas - geotécnicas para el diseño de taludes en macizos rocosos. Trabajo de graduación, facultad de Ingeniería. Guatemala, USAC, 1999.

Este tipo de rotura se produce en taludes de macizos rocosos donde dos estratos presentan buzamiento contrario a la inclinación del talud y dirección paralela o subparalela al mismo. En general, los estratos aparecen fracturados en bloques a favor de sistemas de discontinuidades ortogonales entre sí, como se muestra en la figura 13.

FIGURA 13
ANÁLISIS CINEMÁTICO DEL MECANISMO DE FALLA POR VUELCO



Fuente: Armas Zagoya, Juan Miguel. Cartografía geológica estructural del valle de Huizachal, como base para el análisis de estabilidad de taludes de la carretera Rumbo Nuevo, Tamps., México. Facultad de Ciencias de la Tierra. Universidad Autónoma de Nuevo León. Nuevo León, 2004.

2.4 ETAPA DE RECOPIACIÓN Y ANÁLISIS BIBLIOGRÁFICO

En esta etapa se llevó a cabo la recolección de información conforme se desarrolló la investigación, se indagó la clasificación de *Bieniawski*, aspectos geotécnicos y su aplicación en taludes, normas de seguridad para taludes según las condiciones en las que se encuentren (bermas, mallas, etc.) Tipos de soporte para la estabilización de macizos rocosos, geología regional del área de estudio, entre otras, información que fue requerida para la investigación.

2.5 ETAPA DE TRABAJO DE CAMPO

Para el inicio de esta etapa se realizó un reconocimiento y división de las zonas de interés para la recolección de datos estructurales, datos litológicos, mediciones, fotografías, toma de muestras de roca y suelo para pruebas y ensayos de laboratorio, entre otras. Para la recolección de datos geotécnicos se evaluaron las estaciones propuestas para el estudio en donde se evaluó la presencia de agua en el talud, resistencia a la compresión, espaciado y naturaleza de las discontinuidades, entre otros aspectos que requiere la clasificación de *Bieniawski* para clasificar geotécnicamente la calidad de los macizos rocosos, complementado mediante una guía de observación de campo donde se detallaron los datos a tomar de los taludes. (Anexo I)

Para el levantamiento del cartografiado geológico del cuadrángulo de estudio se realizó la medición y recolección de datos, por medio de métodos como caminamientos, cinta y brújula, y afloramientos, definición de rasgos estructurales como fallamientos, fracturamiento, entre otros rasgos, a nivel local, así como propiedades físicas de las unidades litológicas, tales como textura, meteorización, coloración, alteración, entre otros rasgos que pudieran asociarse a las características geotécnicas de los taludes, los cuales están afectándolos. En esta etapa se tomaron muestras de las Unidades de Basalto y Anfibolita, (ver anexo VI) unidades que afloran en las diferentes estaciones geotécnicas de

trabajo, las cuales posteriormente en la etapa de laboratorio se someterían a ensayos de compresión simple para determinar la resistencia de las mismas.

Para el trabajo de los suelos se seleccionaron dos taludes apropiados para la extracción de un cubo de suelo cuyas medidas aproximadas son de 1"x1"x1", para la extracción de estos cubos se escarbó dentro del talud para obtener una muestra lo menos alterada posible (fotografía 2a), muestra que posteriormente fue parafinada en su totalidad, esto con la finalidad de transportar una muestra inalterada cuyas propiedades fueron conservadas (fotografía 2b), posteriormente siendo movilizadas al Centro de Investigación de Ingeniería, de la Universidad de San Carlos de Guatemala, ya que en la etapa de laboratorio ambos cubos fueron utilizados para ensayos de corte directo, con la finalidad de determinar su ángulo de fricción interna, composición del suelo y cohesión.

FOTOGRAFÍA 2
EXTRACCIÓN Y RECUBRIMIENTO CON PARAFINA DE MUESTRA DE SUELO
INALTERADA



Tomada por: Bermudez J. 2017

Por último se realizó el levantamiento de la topografía a detalle de las estaciones geotécnicas estudiadas, levantamientos que fueron hechos mediante estación total para tener el menor margen de error, con la finalidad de obtener las dimensiones exactas de las estaciones geotécnicas estudiadas. (fotografía 3)

FOTOGRAFÍA 3
LEVANTAMIENTO DE TOPOGRAFÍA A DETALLE MEDIANTE ESTACIÓN
TOTAL



Tomada por: Bermudez J. 2017

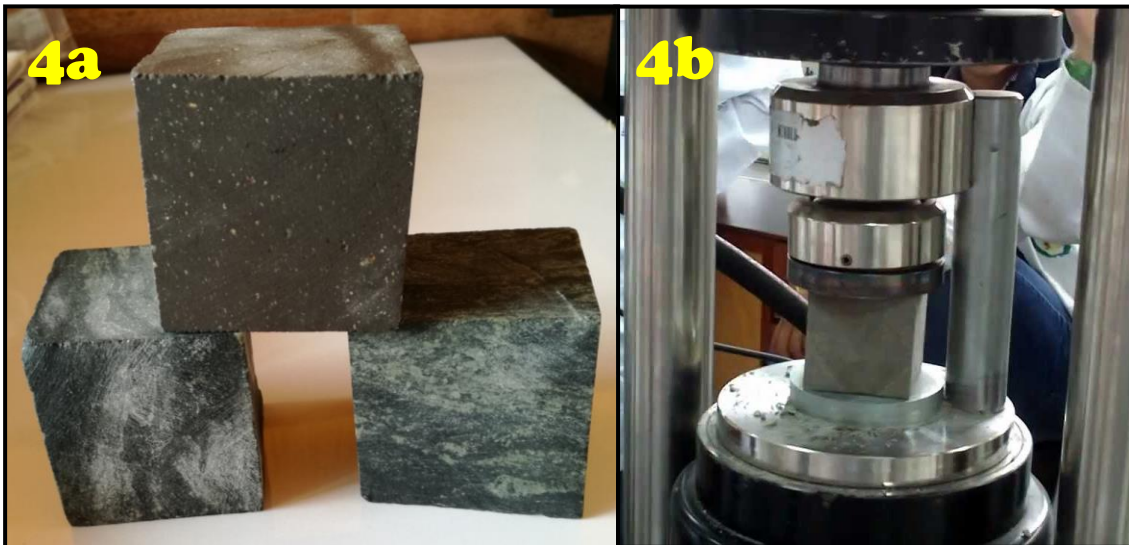
2.6 ETAPA DE TRABAJO DE LABORATORIO

Dicha etapa fue segmentada en dos partes, una para el trabajo de los macizos rocosos y la otra para el trabajo de los suelos, cuyas muestras fueron extraídas durante la etapa de campo y trabajadas en el Centro de Investigaciones de Ingeniería en el *Campus* Central de la Universidad de San Carlos de Guatemala –CII-.

Para el trabajo de los macizos rocosos, se procedió a cortar una muestra de anfibolita y una muestra de basalto en cubos aproximados de 5cm^3 (fotografía 4a), esto realizado en el laboratorio del Centro Universitario de Norte, con la finalidad de trasladarlos al CII, en el departamento de agregados, en donde se les efectuó un ensayo de resistencia a compresión, el cual consiste en:

La creación de cubos de concreto o roca de 5cm^3 , estos se deberán secar y dejarse limpios de arena suelta sin incrustaciones en las caras que van a estar en contacto con los bloques de la máquina de ensayo. Se debe comprobar por medio de una regla, que las caras están perfectamente planas, si hay una curvatura apreciable se pueden limar las caras o desechar el espécimen. Se coloca cuidadosamente el espécimen en la máquina de ensayo, debajo del centro de la parte superior de la máquina, comprobándose antes de ensayar cada cubo, que la rótula gira libremente en cualquier dirección (ver fotografía 4b). No se usarán amortiguadores entre el cubo y los bloques de carga.²⁰

FOTOGRAFÍA 4 CUBOS Y MAQUINA PARA ENSAYOS DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN



Tomada por: Bermudez J. 2017

²⁰ Pateman, JD. *Ensayos de Resistencia a Compresión e Influencia del Curado*, 1978.
ftp://ftp.unicauca.edu.co/Facultades/FIC/IngCivil/Especificaciones_Normas_INV-07/Normas/Norma%20INV%20E-323-07.pdf consultado el 31/05/2017

Se aplica una proporción de carga a una proporción relativa de movimiento entre el plato superior y el inferior que corresponda a una carga aplicada al cubo en el rango de 900 N/segundo a 1800 N/segundo, la proporción del movimiento se obtiene durante la primera mitad de la carga máxima, no se hará ningún ajuste a la proporción de movimiento del plato en la siguiente mitad del ensayo.²¹

Para el cálculo de la compresión se anota la carga máxima indicada por la máquina de ensayo en el momento de la rotura y se calcula la resistencia a la compresión así:

$$f_m = \frac{P}{A}$$

Dónde:

f_m = resistencia a la compresión, en Mpa (psi),

P = carga máxima total en N (lbf), y

A = área de la superficie cargada en mm^2 (pulg^2)

Para la determinación de la resistencia a la compresión se deben utilizar unidades consistentes de carga y área para determinar la resistencia a la compresión en las unidades seleccionadas. Si el área real de la sección transversal del cubo varía de la nominal en más del 1.5% (37.5 mm^2), se usa el área real para la determinación de la resistencia a la compresión. La resistencia a la compresión de especímenes aceptables hechos de la misma muestra y ensayados al en el mismo periodo deberán ser promediados con una aproximación de 0.1 Mpa (10psi).²²

Para el trabajo de los suelos se ocuparon las dos muestras de suelo extraídas y parafinadas en la etapa de campo, a las cuales se les aplico ensayo de corte directo, el cual consiste en:

Moldear 3 o 4 probetas de una muestra de suelo inalterada, utilizando un anillo cortante para controlar el tamaño. Se ensambla la caja de corte, se saturan las piedras porosas y se mide la caja para calcular el área (A) de la

²¹Pateman, JD. *Ensayos de Resistencia a Compresión e Influencia del Curado*, 1978.
ftp://ftp.unicauca.edu.co/Facultades/FIC/IngCivil/Especificaciones_Normas_INV-07/Normas/Norma%20INV%20E-323-07.pdf consultado el 31/05/2017

²²Ibídem

muestra. Se colocan la muestra en la caja de corte, las piedras porosas y el pistón de carga sobre el suelo, la carga normal P_v y se ajusta el deformímetro vertical. Para un ensayo consolidado es necesario controlar el deformímetro vertical igual que en el ensayo de consolidación para determinar cuando la consolidación haya terminado.²³

Luego se separan las mitades de las cajas de corte dejando una pequeña separación y se empalma la cabeza de carga, asegurando que la carga normal refleje la fuerza normal más el peso del bloque de carga y la mitad superior de la caja de corte. Se acopla el deformímetro de deformación cortante y se fija en cero tanto el deformímetro horizontal como vertical (en ensayos saturados se llena la caja con agua y se espera la saturación de la muestra). Aplicar la carga de corte tomando lecturas del deformímetro de carga, de desplazamientos de corte y verticales (cambios de volumen). En ensayos de deformación controlada, las lecturas se toman a desplazamientos horizontales de 5, 10 y cada 10 o 20 unidades.²⁴

La tasa de deformación unitaria debe ser la misma que en el caso anterior (no más de 2 mm/min.) y tal que falle entre 5 a 10 minutos, a menos que el ensayo sea consolidado drenado. La velocidad de deformación para este último, debería ser tal que el tiempo para que ocurra la falla (t_f) sea: $t_f = 50 * t_{50}$, donde t_{50} es el tiempo necesario para que ocurra el 50% de la consolidación bajo la carga normal P_v . Al finalizar el ensayo, se remueve el suelo y se toman muestras para determinar el contenido de humedad. El procedimiento se repetirá para las muestras adicionales.²⁵

Para los cálculos se grafican en escala natural las curvas de deformación, donde la ordenada será la deformación horizontal y la abscisa el tiempo necesario de las distintas probetas. Se obtiene la máxima deformación horizontal. Con los valores de carga vertical y tangencial se calcula la tensión tangencial y la tensión normal. Gráficamente se pueden obtener el esfuerzo cortante (τ) y el esfuerzo normal (σ_n), mediante las siguientes expresiones:²⁶

²³Herra, J. *Implementación de la técnica de Etapas Múltiples en el ensayo de corte directo*, 2006. <http://repositorio.sibdi.ucr.ac.cr:8080/jspui/bitstream/123456789/939/1/27847.pdf> consultado 02/062017

²⁴Ibídem

²⁵Ibídem

²⁶Ibídem

$$\tau = Ph/A \text{ (kg/cm}^2\text{)} \ \& \ \sigma_n = Pv/A \text{ (kg/cm}^2\text{)}$$

Dónde:

P_v = carga vertical aplicada (kg)

P_h = carga horizontal aplicada (kg)

A = área nominal de la muestra (cm²)

Con los datos de τ y σ_n de cada una de las probetas, se traza la recta intrínseca y de ella se obtiene c y ϕ , donde c es la ordenada de la recta hasta el eje de las abscisas y ϕ el ángulo que forma la horizontal con la recta intrínseca.²⁷

2.7 ETAPA DE GABINETE

Esta etapa es la unión de todas las etapas anteriores, mediante la información recabada, se agruparon los datos y se llevó a cabo la sumatoria de los valores correspondientes a cada factor evaluado en la etapa de campo, para obtener el valor índice de *R.M.R.*, y evaluar la calidad de los macizos rocosos estudiados en el tramo de carretera al clasificar, analizar e interpretar dichos resultados y evaluarlos mediante el método romano *S.M.R.*

Los macizos rocosos se analizaron mediante esterofalsillas, determinando el tipo de rotura que los afecta (planar, cuña o vuelco) a cada macizo rocoso, mediante el uso del *software Dips (Rocscience)*, esto en conjunto con el valor índice de *R.M.R.* permitió sugerir cuales son las medidas de mitigación más acordes de los cortes de carretera que presentaron deficiencias. Seguido se procedió a la redacción del informe final, digitalización de resultados y clasificación de estabilidad de los taludes, en un mapa para visualizar los sectores críticos, presentando de manera más clara todos aquellos taludes que presentan deficiencias y cuál es la medida de mitigación más acorde para corregirlos.

²⁷I Herra, J. *Implementación de la técnica de Etapas Múltiples en el ensayo de corte directo*, 2006. <http://repositorio.sibdi.ucr.ac.cr:8080/jspui/bitstream/123456789/939/1/27847.pdf> consultado 02/062017

CAPÍTULO 3

PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Dentro de los resultados se tienen aspectos tanto litológicos, estructurales como geotécnicos, estos últimos con respecto a las clasificaciones propuestas para la investigación. Para el análisis de los aspectos geológicos se tomaron en consideración las unidades litológicas encontradas dentro del área de estudio, las estructuras que afectan a los mismos tales como fracturas, fallamientos y foliaciones. Mientras que la parte geotécnica abarcó aspectos como la calidad de los macizos rocosos, continuidad, espaciamiento, relleno de las discontinuidades, entre otras, así como el análisis de mecanismos de rotura que afectan a los taludes. Esto para crear una relación de los aspectos geológicos-geotécnicos y las medidas correctivas más adecuadas según sea el caso de cada talud estudiado.

3.1 LITOLOGÍA

En el área de estudio se identificaron seis unidades litológicas, las cuales fueron diferenciadas por sus características físicas y texturales, identificadas a nivel macroscópico, las cuales fueron clasificadas como:

Unidades de Anfibolita, Filita, Basalto, Pómez, Coluvión y Aluvión.

Un aspecto que cabe mencionar es que 19 de las 20 estaciones geotécnicas, litológicamente están compuestas de anfibolita, mientras que la estación restante está compuesta por basalto.

3.1.1 Unidad de Anfibolita (Anf)

Se extiende a lo largo de la zona estudiada en sentido *E-W*, al norte se encuentra en contacto fallado con la Filita, al *S-E* en contacto fallado con el basalto y en la parte central en contacto discordante con el aluvi3n y coluvi3n y en contacto fallado con el p3mez. (fotograf3a 5)

Las mejores exposiciones de esta unidad se hallan sobre la ruta CA-9 carretera que conduce al Atl3ntico de Guatemala. Geot3cnicamente es muy relevante debido a que 19 de las 20 estaciones de estudio est3n constituidas por anfibolita.

FOTOGRAF3A 5
UNIDAD DE ANFIBOLITA SOBRE LA CARRETERA CA-9 EN CONTACTO
MEDIANTE PLANO DE FALLA 30°/N260° CON LA UNIDAD DE P3MEZ
COORDENADAS UTM: 794169E, 1637588N

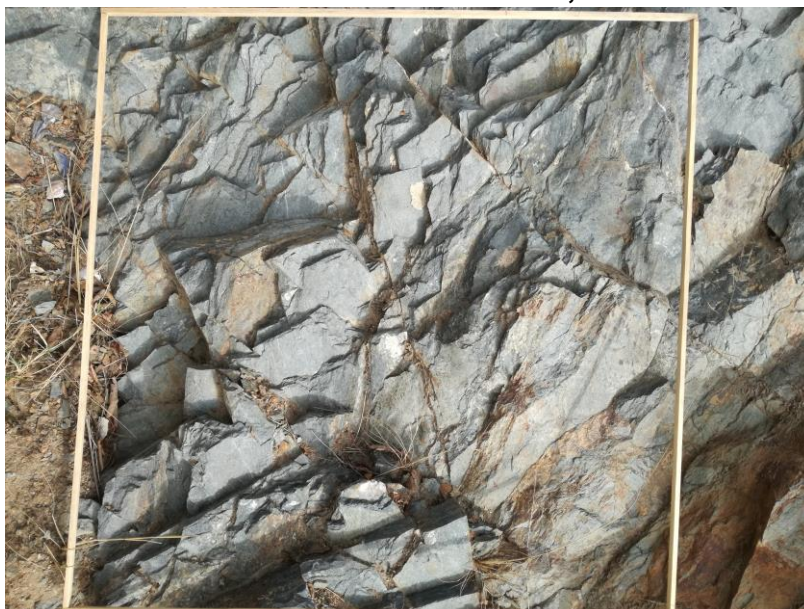


Tomada por: Bermudez J. 2017

La Unidad de Anfibolita es afectada por una serie de alteraciones que son el resultado del paso de antiguos fluidos hidrotermales. En la mayor3a de afloramientos se observ3 una serie de fallas inversas y normales por donde se da el ascenso de los fluidos hidrotermales.

En muestra de mano presenta una coloración verdosa, a la cual se le observan minerales como anfíboles y plagioclasas con una textura foliada, en algunas partes existe la presencia de vetillas de calcita cristalina y en los planos de fracturamiento se observó pirolusita la cual muestra una tonalidad violeta.

FOTOGRAFÍA 6
UNIDAD DE ANFIBOLITA FRACTURADA
COORDENADAS UTM: 793182E, 1637951N



Tomada por: Bermudez J. 2017

En las zonas más próximas donde la roca se mostró sana, y no se observó muy fracturada, se evidenció un escaso paso de fluidos hidrotermales ya que la roca no presentaba cambios físicos ni texturales.

La anfibolita presentaba cuatro planos de foliación preferencial siendo estos: $15^{\circ}/N165^{\circ}$, $25^{\circ}/N335^{\circ}$, $30^{\circ}/N195^{\circ}$ y $10^{\circ}/N010^{\circ}$. En la parte N-W del área la anfibolita presenta un cizallamiento que generó una milonitización en la roca, esta anfibolita milonítica en muestra de mano, los minerales no se perciben a simple vista, exhiben una tonalidad verde menta, se encuentra bastante sana y no presenta evidencia del paso de fluidos hidrotermales.

3.1.2 Unidad de Filita (Fi)

Esta unidad aflora al norte del área de investigación a cercanías de la finca El Recuerdo, de donde se prolonga hacia el oeste. Los mejores afloramientos se ubican en la entrada a la aldea Conacaste (fotografía 7) y sobre la quebrada principal ubicada al *N-E*, se encuentra en contacto fallado en la parte *N-E* con la anfibolita y en contacto fallado el pómez al *N-W* a cercanías de la aldea Conacaste.

Se observó que la filita a nivel de afloramiento y en muestra de mano tiene un tamaño de grano muy fino, excepto el cuarzo que se encuentra en forma de bandas de unos 0,5 cm de espesor, muy deformadas. Muestra una textura micácea con un contenido de micas (moscovitas), cuarzo y clorita como minerales esenciales. Los afloramientos más extensos se mostraron bastante intemperizados y con una coloración grisácea oscura. Se notó que en los afloramientos más sanos la filita tenía una textura sedosa brillante de color azul grisácea con una leve alteración.

FOTOGRAFÍA 7
UNIDAD DE FILITA CON LENTES DE CUARZO
COORDENADAS UTM: 797593E, 1638314N



Tomada por: Bermudez J. 2017

3.1.3 Unidad de Basalto (Ba)

El basalto aflora al S-E y sur del área de investigación (fotografía 9) y se prolonga al este en dirección a la comunidad La Calera. Los mejores afloramientos se observan en la aldea La Cumbre, así como en el sur-centro del cual se prolonga hacia el S-E y abarcan parte del tramo carretero.

Los afloramientos ubicados en la carretera CA-9 y la aldea La Cumbre presentan una cierta similitud, ya que ambos se observaron con una tonalidad beige y una estructura fanerítica en la que se observan cristales de plagioclasas. La textura observada es fanerítica leucocrática (< 3 mm) ya que son visibles ciertos cristales los cuales presentan bordes euhedrales y subhedrales en algunos casos (fotografía 8).

FOTOGRAFÍA 8
UNIDAD DE BASALTOS
COORDENADAS UTM 798444E, 1636104N



Tomada por: Bermudez J. 2017

El basalto genera un relieve que no es muy pronunciado y se caracteriza por formar planicies, las cuales se encuentran pobremente cubiertas por matorrales, ésta sobreyace a la Anfibolita, con la que posee un contacto fallado (fotografía 9).

FOTOGRAFÍA 9
UNIDAD DE BASALTOS SOBREYACIENDO A LA UNIDAD DE ANFIBOLITA
COORDENADAS UTM 798346E, 1636119N



Tomada por: Bermudez J. 2017

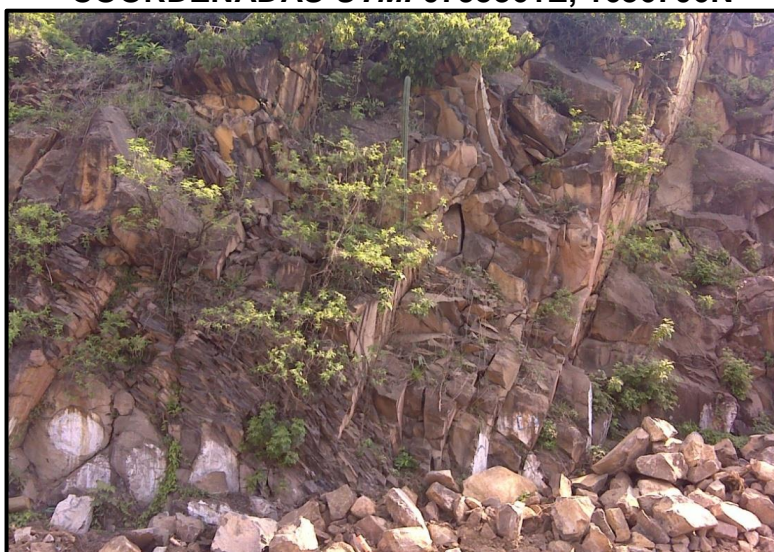
Los basaltos ubicados en la parte central-este presentan planos de clivaje (fotografía 10), los cuales tiene una orientación noroeste, dichas estructuras están relacionadas con la dirección preferencial de los lineamientos.

En la parte sur-centro del área, en la finca El Limón y El Paraíso, donde aflora la unidad, la mineralogía no es apreciable a simple vista, tienen un mayor contenido de minerales melanocráticos y difícilmente se observa la presencia de plagioclasas, en otros afloramientos siempre en la

parte mencionada las características son muy similares a los afloramientos de la carretera CA-9 y la aldea La Cumbre.

El grado de meteorización de la roca es 2 (anexo II), se observan horizontes de suelo negro no mayores a 0,5 m de espesor, en la parte este del área, los suelos son de tonalidades rojizas por la presencia de óxidos.

FOTOGRAFÍA 10
UNIDAD DE BASALTO CON UN PLANO DE FRACTURA 81/N060
COORDENADAS UTM: 0795361E, 1636706N

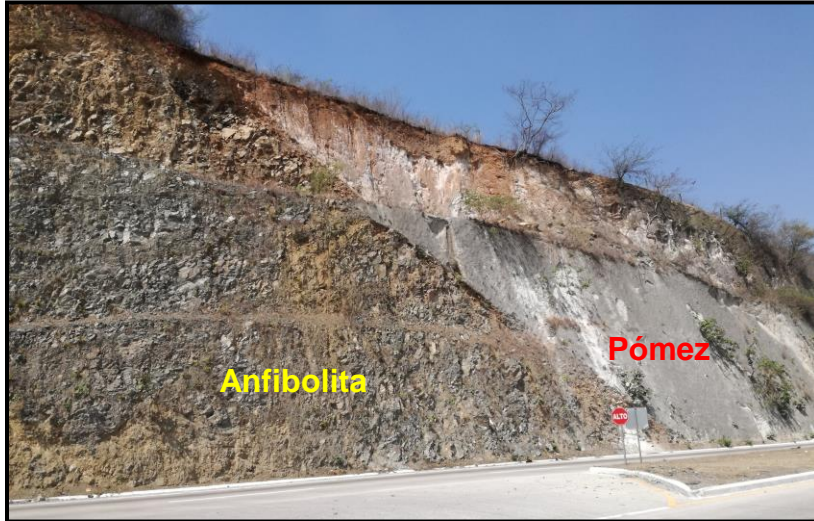


Tomada por: Bermudez J. 2017

3.1.4 Unidad de Pómez (Pmz)

La Unidad de Pómez aflora en la parte central de área de estudio extendiéndose en dirección nor-oeste hacia las aldeas Sinaca y Las Tejas, aunque es claramente visible en varios tramos de la carretera CA-9 en contacto con anfibolita (foto 11).

FOTOGRAFÍA 11
UNIDAD DE PÓMEZ EN CONTACTO DISCORDANTE CON
LA UNIDAD DE ANFIBOLITA
COORDENADAS UTM: 0794171E, 1637587N



Tomada por: Bermudez J. 2017

El análisis macro permitió determinar que contiene fragmentos con textura escorácea y pomácea, presenta una tonalidad blanquecina y beige claro, además se observaron pequeñas cavidades de 1 cm de diámetro en algunos pequeños horizontes se observaron pequeños fragmentos de anfibolita y obsidiana poco representativos.

. Estratigráficamente ésta unidad es de edad reciente ya que sobreyace a la Anfibolita, Filita y Basalto. Su espesor es de 30 m aproximadamente o mayor. En la aldea La Cumbre, el Pómez presenta un tipo de pseudo-estratificación.

3.1.5 Unidad de Coluvión (CI)

En el área de investigación se identificaron dos coluviones que se encuentran ubicadas en las laderas presentes a los costados del río Los Plátanos.

El primer coluvión se ubicó en la parte noreste de la aldea El Carrizo, en la finca La Coyotera, éste presentó una dimensión aproximada de 350 m² y está compuesto principalmente por bloques de basaltos que oscilan entre 0,20 m y 1,00 m de largo (fotografía 12).

FOTOGRAFÍA 12
UNIDAD DE COLUVIÓN COMPUESTA POR ROCAS
BASÁLTICAS Y ROCAS ANFIBOLÍTICAS
COORDENADAS UTM: 796606E, 1636955N



Tomada por: Bermudez J. 2017

El segundo coluvión se ubicó al sur de la aldea El Carrizo y presentó bloques angulosos y subangulosos de anfibolita y basalto que oscilan entre 0,20 m y 0,50 m de largo, éste podría estar asociado a un antiguo

movimiento de ladera. Abarca una extensión espacial de aproximadamente 300 m².

3.1.6 Unidad de Aluvión (Al)

El Aluvión aflora sobre las quebradas y sobre el paso del río Los Plátanos que atraviesa el cuadrángulo de estudio en una dirección SE-NW.

Los fragmentos de roca que componen el aluvión oscilan entre 0,10 m a 2,00 m de largo y son procedentes de rocas como anfibolita, basalto, filita y serpentinita, entre otros, los cuales han sido arrastrados por las corrientes que se forman en las quebradas y la del río Los Plátanos.

Además se observó que los bloques de roca de mayor tamaño están ubicados en las principales quebradas que alimentan al río Los Plátanos, y los de menor tamaño en el cauce del río, esto debido a la fuerza de arrastre de las corrientes y las distancias recorridas por los mismos (fotografía 13).

FOTOGRAFÍA 13
UNIDAD ALUVIONAL SOBRE EL RECORRIDO DEL RIO LOS PLÁTANOS
COORDENADAS UTM: 796173E, 1636413N

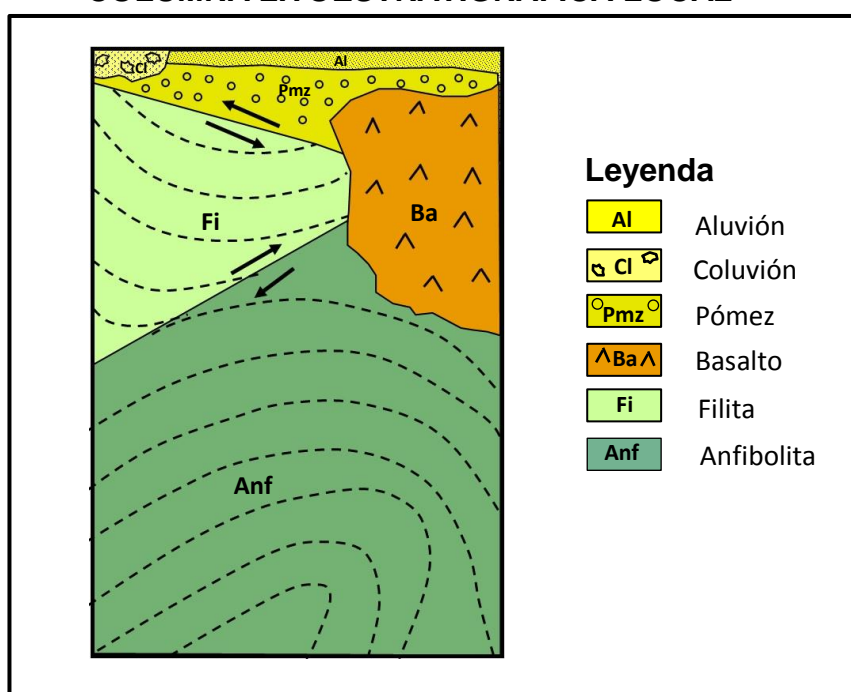


Tomada por: Bermudez J. 2017

3.1.7 Columna estratigráfica local

La estratigrafía general del área de investigación se encuentra constituida por las unidades de: anfibolita, filita, basalto, pómez, coluvión y aluvión, todas éstas siguen una secuencia de la más antigua a la más reciente. La representación gráfica de dicha secuencia se muestra en la figura 14.

FIGURA 14
COLUMNA LITOSTRATIGRÁFICA LOCAL



Fuente: Investigación de campo. 2017.

3.2 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL LOCAL

A continuación se representan los datos estructurales recolectados en el campo y su respectivo análisis, los mismos se proyectaron por medio de estereogramas y rosetas. Dentro de las estructuras analizadas se encuentran: planos de foliación, planos de falla y fracturamiento, entre otras, las cuales tienen relación con el tema en estudio.

3.2.1 Foliación

La foliación es la disposición laminar que toman las rocas al verse sometidas a grandes esfuerzos.

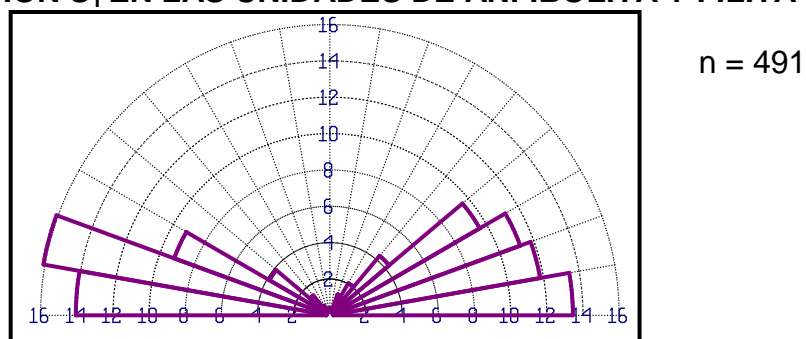
La foliación que se observó en el campo, está desarrollada en las Unidades de Anfibolita y Filita, éstas corresponden a un plano de superficie S_1 y de planos de crenulación S_2 .

a. Foliación S_1

Es elemento estructural más observado en el área de investigación y se presenta en las Unidades de Anfibolita y Filita.

En la representación gráfica de roseta se logra identificar la presencia de dos rumbos preferenciales de la foliación uno en dirección $N70^\circ E$ y el otro $N75^\circ W$ (figura 15), cabe hacer mención que el buzamiento de esta foliación se encuentra casi paralelo a la zona de falla del Motagua.

FIGURA 15
ROSETA DE PROYECCIÓN DE LOS RUMBOS DE LOS PLANOS
DE FOLIACIÓN S_1 EN LAS UNIDADES DE ANFIBOLITA Y FILITA



Fuente: Investigación de campo. 2017.

Para un mejor análisis e interpretación de datos se realizaron dos asociaciones de polos y se definieron cuatro familias, las cuales poseen las siguientes orientaciones aproximadas $75^\circ/N345^\circ$, $55^\circ/N155^\circ$, $60^\circ/N015^\circ$ y $80^\circ/N190^\circ$.

Con base a la representación estereográfica de los polos de foliación se evidenció dos plegamientos uno que genera una geoforma de tipo anticlinal y el otro una geoforma de tipo sinclinal.

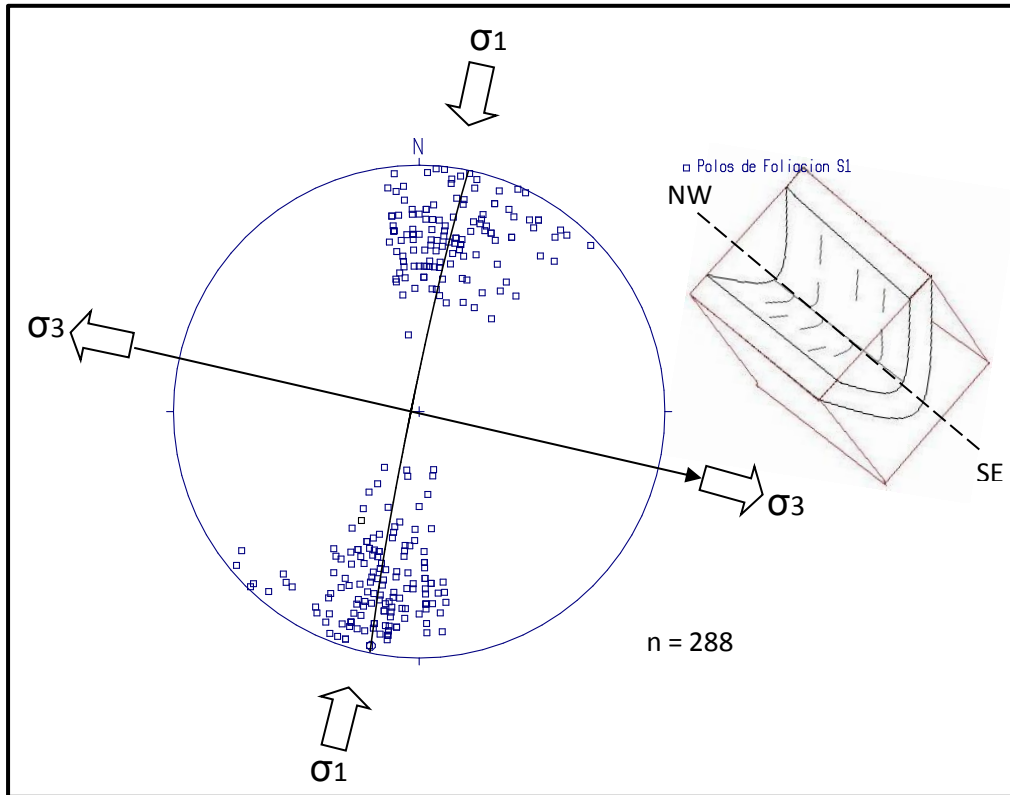
El plegamiento sinclinal está representado por los polos de foliación S_1 encontrados en las Unidades de Filita y Anfibolita, el cual se muestra en la figura 16, dicho pliegue presenta un eje con orientación $06^\circ/N106^\circ$. La dinámica de esfuerzos se describe en la tabla 9.

TABLA 9
DIRECCIÓN DE ESFUERZOS PRINCIPALES PARA LA
FOLIACIÓN S_1 DE FILITA Y ANFIBOLITA

Esfuerzo	Azimut
Sigma 1	N194°
Sigma 3	N286°

Fuente: Investigación de campo. 2017.

FIGURA 16
MODELO ESTRUCTURAL CORRESPONDIENTES PLEGAMIENTO
DE TIPO SINCLINAL



Fuente: Investigación de campo. 2017.

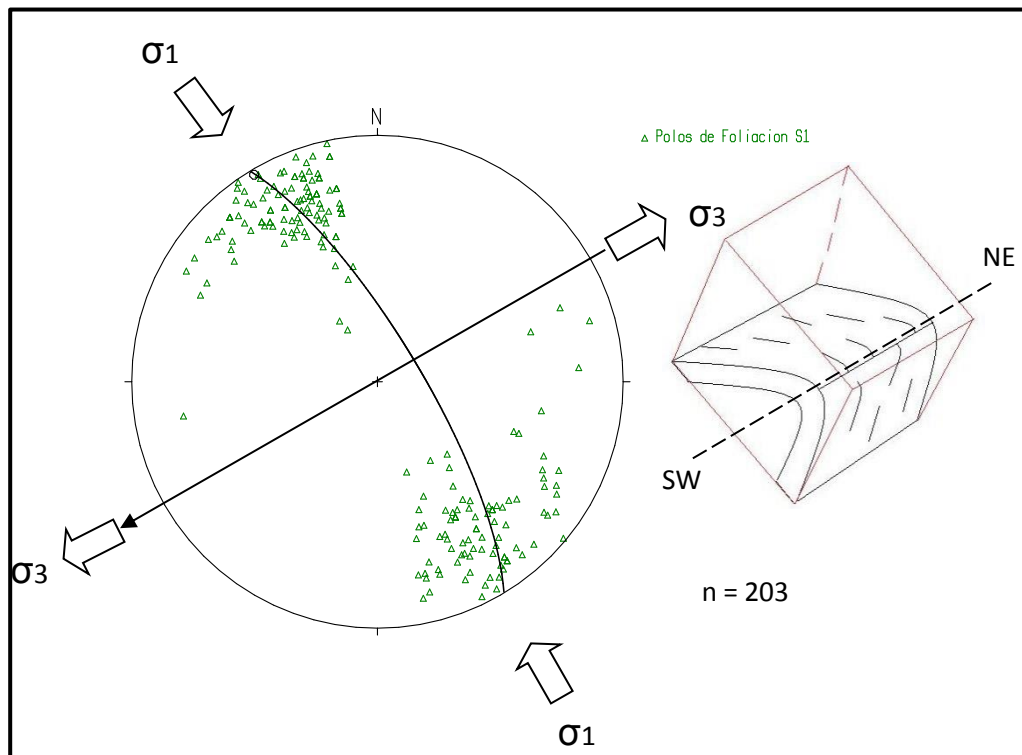
El plegamiento anticlinal está representado por los polos de foliación S_1 obtenidos en la Unidad de Anfibolita, el cual se muestra en la figura 17, presenta un eje con orientación $10^\circ/N248^\circ$. La dinámica de esfuerzos se describe en la tabla 10.

TABLA 10
DIRECCIÓN DE ESFUERZOS PARA LA FOLIACIÓN S_1 DE LA ANFIBOLITA

Esfuerzo	Azimut
Sigma 1	N330°
Sigma 3	N062°

Fuente: Investigación de campo. 2017.

FIGURA 17
MODELO ESTRUCTURAL CORRESPONDIENTE AL PLIEGUE ANTICLINAL



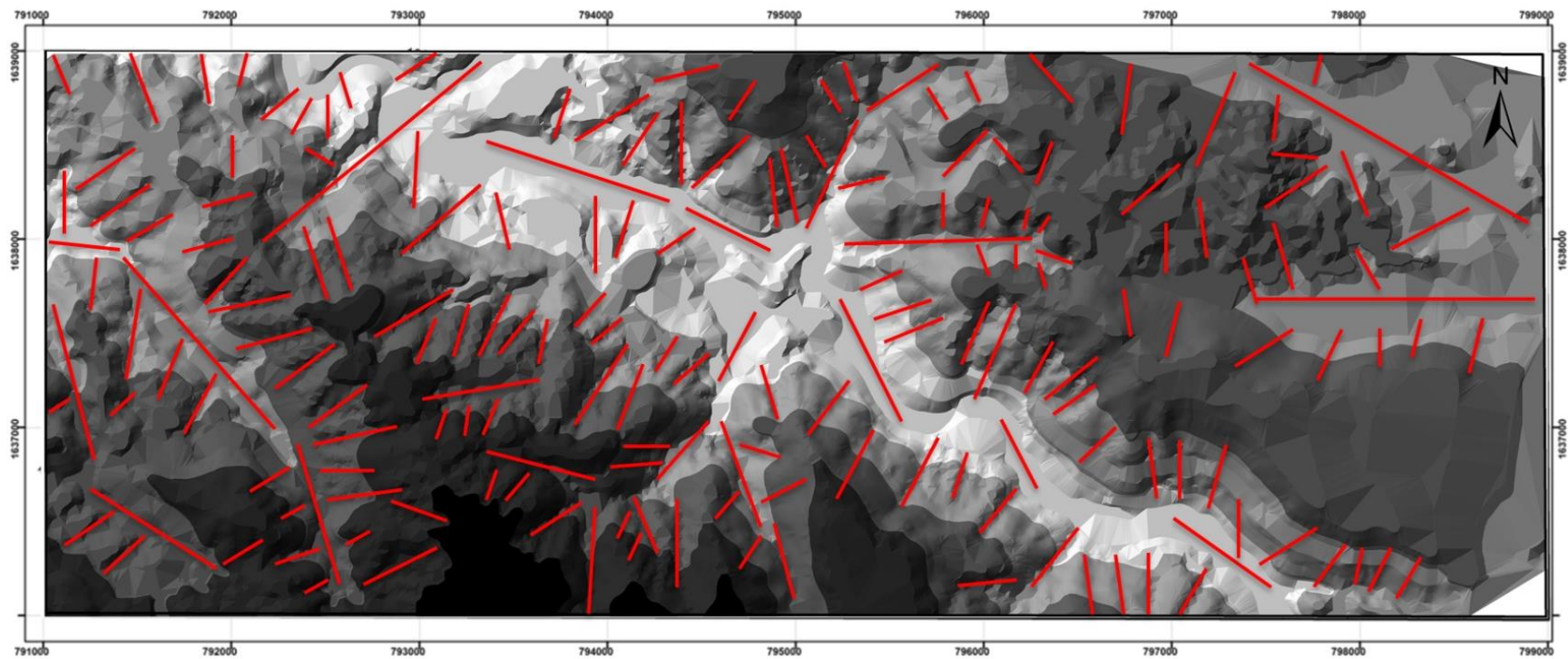
Fuente: Investigación de campo. 2017.

3.2.2 Lineamientos

Estos rasgos estructurales, fueron identificados mediante la generación de un modelo de elevación digital (mapa 3), se tomó la medida de la dirección de cada uno de ellos para establecer una dirección preferencial, y se evaluaron los resultados en un diagrama de rosa.

El diagrama de rosa, muestra 4 patrones de mayor tendencia preferencial los cuales fueron: 1) N085°, 2) N285°, 3) N025° y 4) N060°. (figura 18)

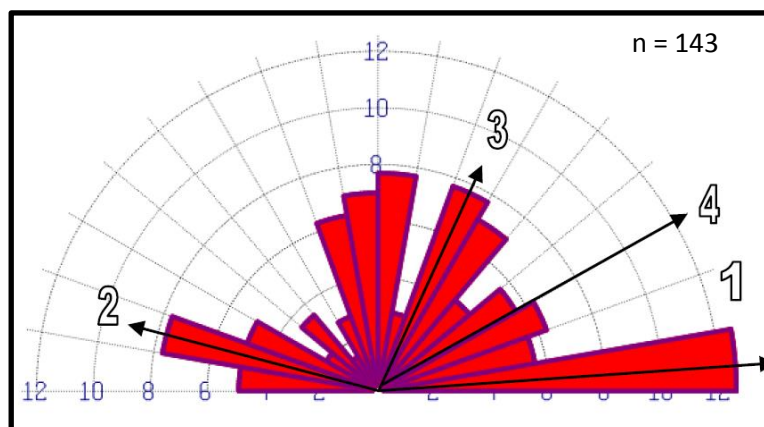
MAPA 3 LINEAMIENTOS DEL ÁREA DE ESTUDIO



Fuente: Investigación de campo. 2017.

Los lineamientos de más longitud y similar dirección evidencian un patrón estructural, influenciado por el sistema de falla del Motagua.

FIGURA 18
ROSETA DE LINEAMIENTOS DEL ÁREA DE ESTUDIO

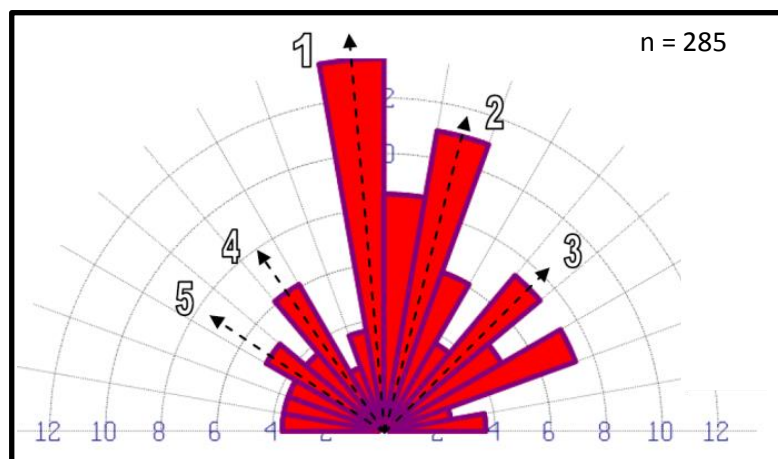


Fuente: Investigación de campo. 2017.

3.2.3 Fracturas

Dentro de las estructuras que afectan a la mayoría de las unidades litológicas, se tienen las fracturas, está es una estructura de suma importancia para el análisis geotécnico. Se elaboró un diagrama de rosa (figura 19) mediante el cual se determinaron cinco direcciones preferenciales de fracturas correspondiendo a las familias: 1) N355°, 2) N015°, 3) N045°, 4) N325° y 5) N305°.

FIGURA 19
ROSETA DE FRACTURAS



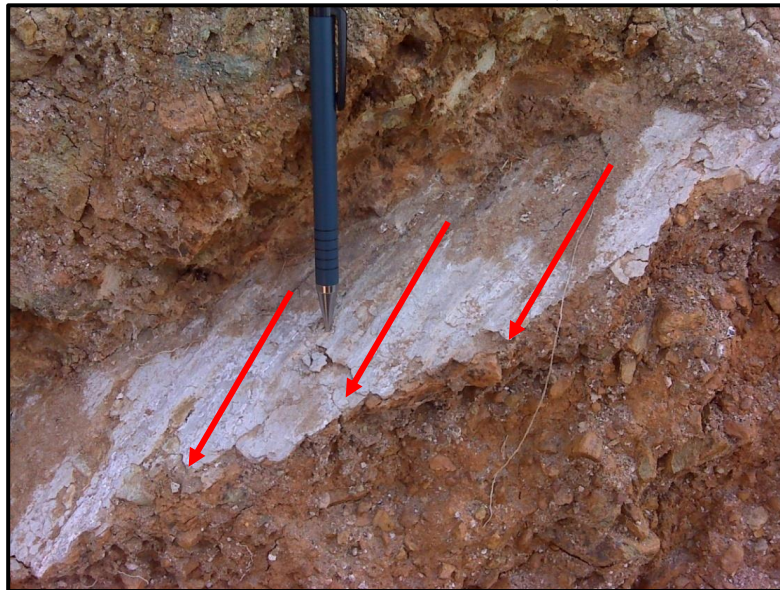
Fuente: Investigación de campo. 2017.

3.2.4 Fallas

Las fallas son estructuras geológicas que se originan por la presencia de esfuerzos de compresión, distensión y transformantes, generan así el movimiento de dos cuerpos de roca.

Las fallas fueron encontradas en las unidades litológicas de Anfibolita Filita, Basalto y Pómez, dichas estructuras fueron evidentes en base a la presencia de tectoglifos como gradas y estrías (fotografía 14 y 15), por medio de los cuales se identificó el tipo de movimiento y otras en base al desplazamiento de estructuras secundarias como fracturas y vetas desplazadas (fotografía 16).

FOTOGRAFÍA 14
EVIDENCIA DE ESTRÍAS, LOCALIZADAS EN LAS
COORDENADAS UTM: 797496E, 1636247N



Tomada por: Bermudez J. 2017

FOTOGRAFÍA 15
EVIDENCIA DE GRADAS, LOCALIZADA EN LAS COORDENADAS
UTM: 798113E, 1636032N



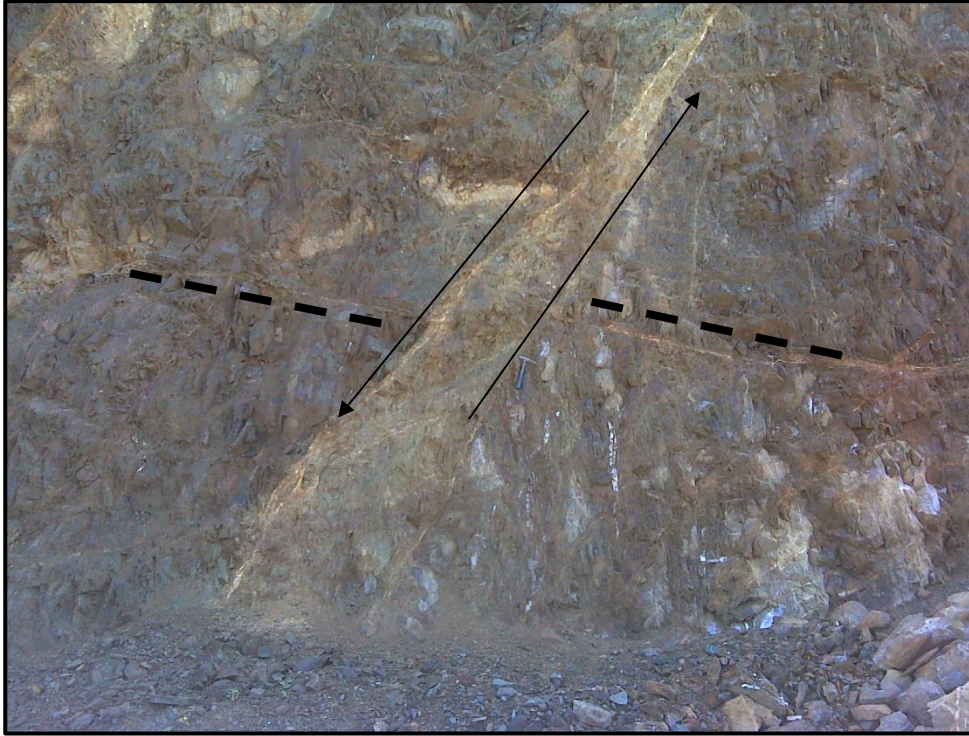
Tomada por: Bermudez J. 2017

Para el estudio de éstas estructuras se clasificaron según su ángulo de *pitch*, esta clasificación resultó en fallas como: normales puras, normales sinextrales, normales dextrales, sinextrales, sinextrales inversas, inversas puras, inversas sinextrales e inversas dextrales.

a. Fallas normales

Las fallas normales son generadas a través de esfuerzos de distensión. Estas estructuras se encontraron en las Unidades de Anfibolita y Filita (fotografía 16), algunas de las cuales por el alto grado de alteración de la roca, fue difícil observar la presencia de tectoglifos, además se observó la presencia de material de falla *gouge*.

FOTOGRAFÍA 16
DESPLAZAMIENTO NORMAL DE VETAS
COORDENADAS UTM: 797397E, 1636347N

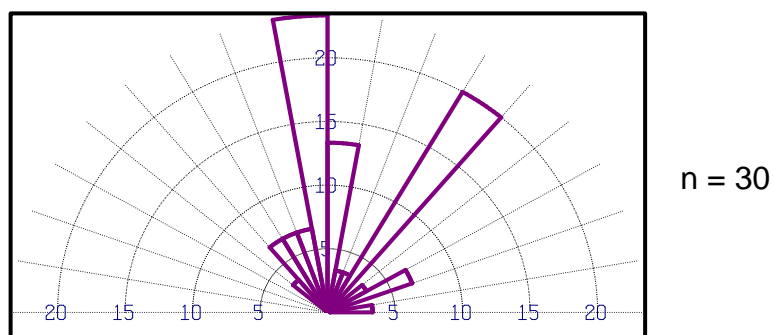


Tomada por: Bermudez J. 2017

Para un estudio más detallado se clasificaron las fallas normales según el ángulo de *pitch* en: normales puras, normales dextrales y normales sinextrales.

En un diagrama de rosas se representa la dirección del plano de las fallas normales, en donde se observan 2 direcciones preferenciales una norte-sur y la segunda $N35^{\circ}E$ (figura 20).

FIGURA 20
ROSETA REPRESENTANDO LA PROYECCIÓN DE RUMBO
DE PLANO DE FALLAS NORMALES



Fuente: Investigación de campo. 2017.

b. Normales puras

Éste tipo de fallas se caracterizaron en campo por poseer un ángulo de *pitch* mayor a 80° (tabla 9).

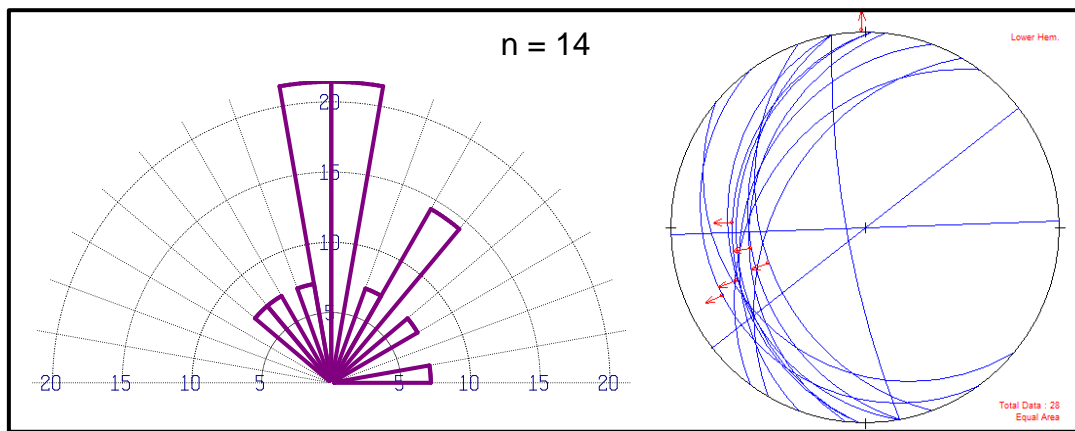
TABLA 9
FALLAS NORMALES PURAS

Buzamiento	Dirección de buzamiento	<i>Pitch</i>	Sentido
30°	N260°	80°	SE
20°	N234°	80°	NW
32°	N272°	90°	NE
46°	N250°	90°	SE
40°	N260°	90°	W

Fuente: Investigación de campo. 2017.

En un diagrama de rosas se observó el rumbo de las fallas normales puras, las cuales presentan una familia con dirección de casi norte-sur, y una segunda $N35^\circ E$ (figura 21).

FIGURA 21
ROSETA Y ESTEREOGRAMA DE RUMBOS Y PLANOS DE FALLAS
NORMALES PURAS



Fuente: Investigación de campo. 2017.

c. Normal dextral

Éste tipo de fallas se caracterizaron en campo por poseer un ángulo de *pitch* entre 45° - 80° y por tener un sentido de movimiento normal en la vertical y dextral en la horizontal (tabla 10).

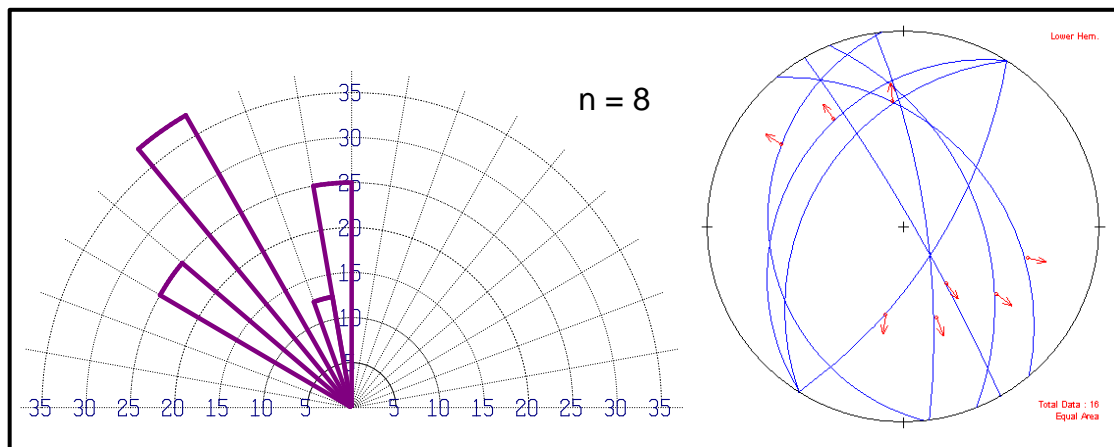
TABLA 10
FALLAS NORMALES DEXTRALES

Buzamiento	Dirección de buzamiento	<i>Pitch</i>	Sentido
50°	N50°	48°	SE
80°	N82°	50°	S
58°	N68°	50°	SE
50°	N302°	50°	NE
74°	N122°	55°	SE
32°	N264°	55°	NW
86°	N60°	60°	SE
38°	N302°	70°	N

Fuente: Investigación de campo. 2017.

En la representación estereográfica y de diagrama de rosas se observa como éstas fallas tienen una familia con dirección N30°W y una segunda casi N-S (figura 22).

FIGURA 22
ROSETA Y ESTEREOGRAMA CON RUMBOS Y PLANOS DE FALLAS
NORMALES DEXTRALES



Fuente: Investigación de campo. 2017.

d. Normal sinextral

Éste tipo de fallas se caracterizaron en campo por poseer un ángulo de *pitch* entre 45° - 80° y por tener un sentido de movimiento normal en la vertical y sinextral en la horizontal (tabla 11).

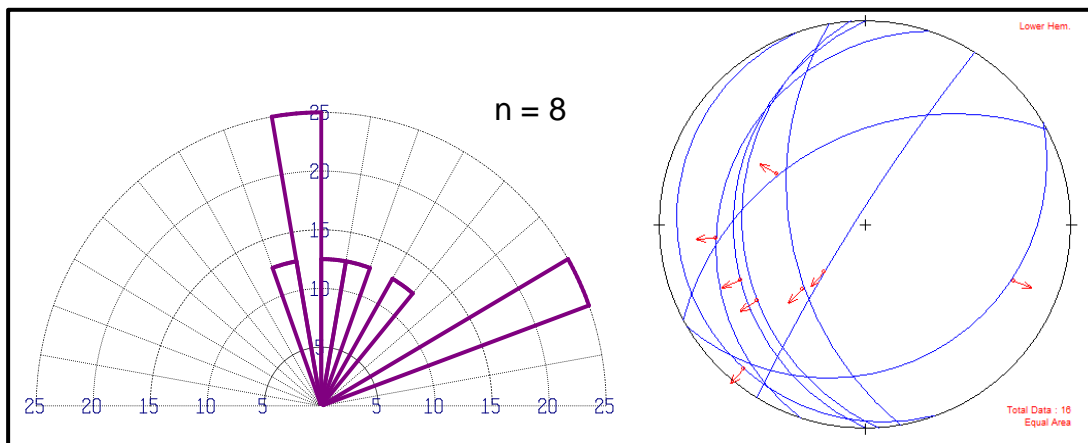
TABLA 11
FALLAS NORMALES SINEXTRALES

Buzamiento	Dirección de buzamiento	<i>Pitch</i>	Sentido
30°	N150 $^{\circ}$	55°	<i>NE</i>
10°	N250 $^{\circ}$	60°	<i>SE</i>
40°	N266 $^{\circ}$	65°	<i>SE</i>
86°	N302 $^{\circ}$	65°	<i>SW</i>
54°	N332 $^{\circ}$	70°	<i>SW</i>
60°	N260 $^{\circ}$	70°	<i>SE</i>
36°	N270 $^{\circ}$	70°	<i>S</i>
30°	N288 $^{\circ}$	70°	<i>SW</i>

Fuente: Investigación de campo. 2017.

En la representación estereográfica y de roseta se observó cómo los rumbos de las fallas normales sinextrales muestran una familia preferencial *N-S*, una segunda casi *N75 $^{\circ}$ E* y una tercera *N30 $^{\circ}$ E* (figura 23).

FIGURA 23
ROSETA Y ESTEREOGRAMA DE LOS RUMBOS Y PLANOS DE FALLAS
NORMALES SINEXTRALES

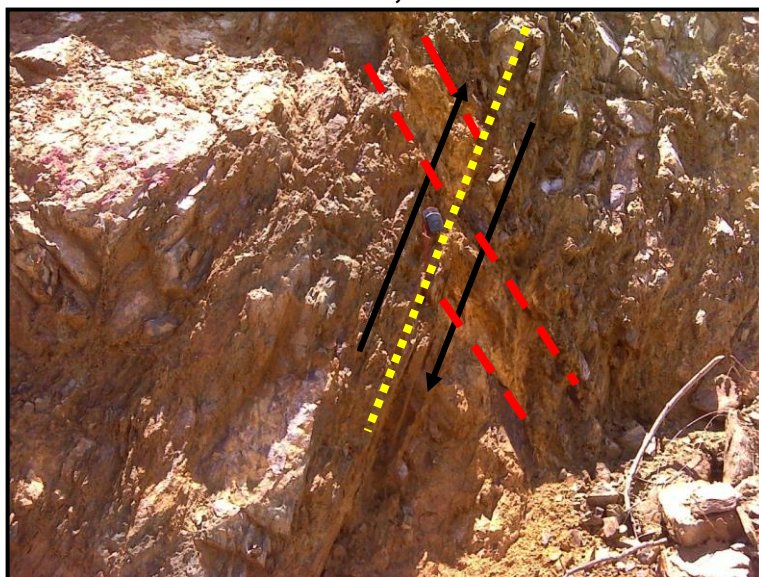


Fuente: Investigación de campo. 2017.

e. Fallas inversas

Las fallas inversas son generadas a través de esfuerzos de compresión. Estas estructuras se observan en las Unidades de Anfibolita y Filita (fotografía 17), las evidencias con las que cuentan son tectoglifos, desplazamiento de fracturas y vetas de alteración.

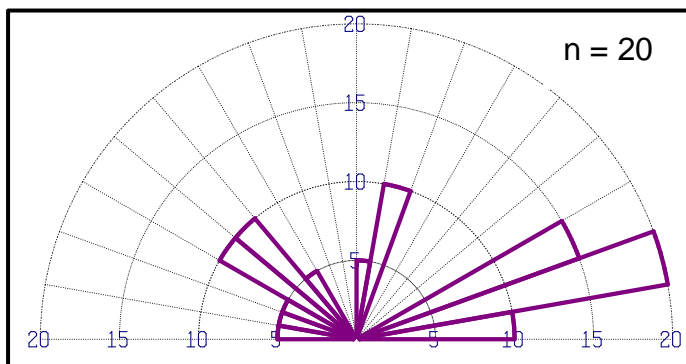
FOTOGRAFÍA 17
FALLA DE TIPO INVERSA, LOCALIZADA EN LAS COORDENADAS
UTM: 791879E, 1637216N



Tomada por: Bermudez J. 2017.

En una representación de roseta de rumbos de fallas inversas, se observa como éstas presentan una familia en dirección $N80^{\circ}E$, y un segunda $N50^{\circ}W$ (figura 24).

FIGURA 24
ROSETA REPRESENTANDO EL RUMBO DE LOS PLANOS DE FALLAS INVERSAS



Fuente: Investigación de campo. 2017.

f) Inversas puras

Éste tipo de fallas se caracterizaron en campo por poseer un ángulo de *pitch* mayor a 80° y un movimiento inverso (tabla 12).

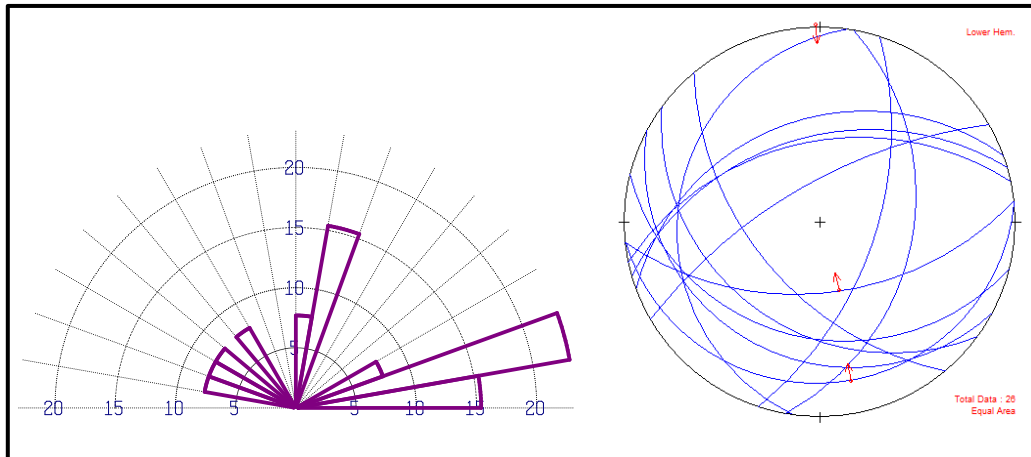
TABLA 12
FALLAS INVERSAS PURAS

Buzamiento	Dirección de buzamiento	<i>Pitch</i>	Sentido
18°	N174 $^{\circ}$	85 $^{\circ}$	NE
60°	N174 $^{\circ}$	85 $^{\circ}$	NE

Fuente: Investigación de campo. 2017.

En un diagrama de roseta se logra observar los rumbos de las fallas inversas puras, las cuales presentan una familia con dirección $N80^{\circ}E$, una segunda $N15^{\circ}E$ y una tercera $N65^{\circ}W$ (figura 25).

FIGURA 25
ROSETA Y ESTEREOGRAMA DE LOS RUMBOS Y PLANOS DE FALLAS
INVERSAS PURAS



Fuente: Investigación de campo. 2017.

g. Inversa dextral

Este tipo de fallas se caracterizaron en campo, por poseer un ángulo de *pitch* entre 45° - 80° y por tener un sentido de movimiento inverso en la vertical y dextral en la horizontal (tabla 16).

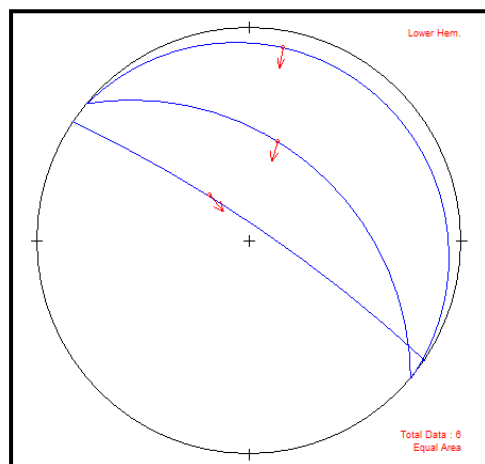
TABLA 16
FALLAS INVERSAS DEXTRALES

Buzamiento	Dirección de buzamiento	<i>Pitch</i>	Sentido
52°	N40°	75°	NW
10°	N40°	60°	NW
84°	N34°	68°	N

Fuente: Investigación de campo. 2017.

En una representación estereográfica se observó una sola familia de fallas con dirección $N50^{\circ}W$ (figura 26).

FIGURA 26
ESTEREOGRAMA DE LOS PLANOS DE FALLAS INVERSAS DEXTRALES



$n = 3$

Fuente: Investigación de campo. 2017.

h. Inversa sinextral

Este tipo de fallas se caracterizaron en campo por poseer un ángulo de *pitch* entre 45° - 80° y por tener un sentido de movimiento inverso en la vertical y dextral en la horizontal (tabla 14).

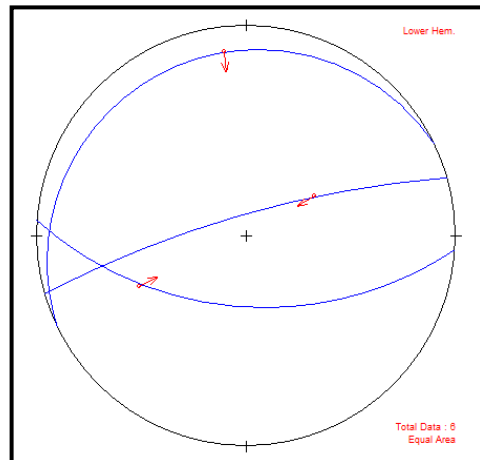
TABLA 14
FALLAS INVERSAS SINEXTRALES

Buzamiento	Dirección de buzamiento	<i>Pitch</i>	Sentido
62°	N184 $^{\circ}$	50°	NW
82°	N344 $^{\circ}$	60°	NE
14°	N334 $^{\circ}$	72°	NE

Fuente: Investigación de campo. 2017.

En la representación estereografía se observa una familia de fallas con dirección N75 $^{\circ}$ E aproximadamente y una segunda N82 $^{\circ}$ W (figura 27).

FIGURA 27
ESTEREOGRAMA DE LOS PLANOS DE FALLAS INVERSAS SINEXTRALES



$n = 3$

Fuente: Investigación de campo. 2017.

i. Fallas de rumbo

Las fallas de rumbo o transformantes son aquellas donde existe un movimiento lateral entre dos cuerpos de roca, en dicho movimiento los planos de falla son verticales y la dirección de movimiento es horizontal. Este tipo de fallas fueron clasificadas en: sinextral pura, sinextral inversa y dextral pura.

j. Sinextral pura

Éste tipo de fallas se caracterizan por un movimiento lateral hacia la izquierda, en donde el ángulo de *pitch* es menor a 10° . En el área de investigación se encontró una falla de éste movimiento con un rumbo $N262^\circ$ (tabla 15).

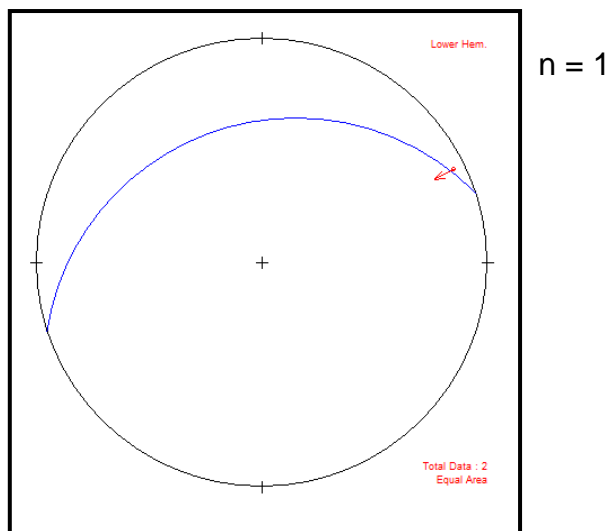
TABLA 15
FALLAS SINEXTRALES

Buzamiento	Dirección de buzamiento	Pitch	Sentido
38°	$N342^\circ$	10°	NE

Fuente: Investigación de campo. 2017.

En la representación estereográfica de la falla sinextral se observa la dirección de movimiento, y como el plano de falla posee una orientación casi *W-E* (figura 28).

FIGURA 28
ESTEREOGRAMA DEL PLANO DE FALLA DE RUMBO DE TIPO SINEXTRAL



Fuente: Investigación de campo. 2017.

k. Sinextral inversa

Éste tipo de fallas se caracterizaron en campo por tener un ángulo de *pitch* entre 10° - 45° , los planos de falla poseen una menor componente vertical y los esfuerzos son casi horizontales. En el área se encontraron 3 fallas de éste tipo (tabla 16).

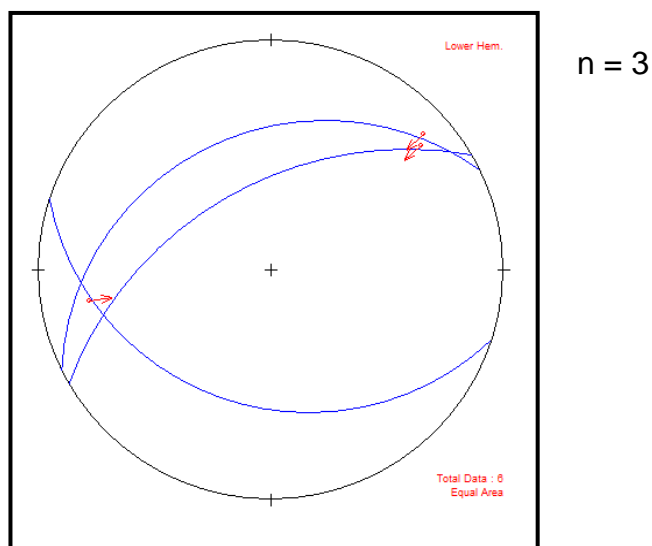
TABLA 16
FALLAS SINEXTRALES INVERSAS

Buzamiento	Dirección de buzamiento	Pitch	Sentido
40°	N334°	20°	NW
60°	N330°	20°	NE
40°	N198°	35°	SW

Fuente: Investigación de campo. 2017.

En la representación estereográfica de las fallas, se observa como éstas muestran un plano de falla preferencial en dirección casi $N75^{\circ}E$ aproximadamente, aunque se presenta un segundo plano en dirección $N80^{\circ}W$ (figura 29).

FIGURA 29
ESTEREOGRAMA DE LOS PLANOS DE FALLAS DE TIPO SINEXTRAL INVERSA



Fuente: Investigación de campo. 2017.

I. Dextral pura

Este tipo de fallas se caracterizan por un movimiento lateral hacia la derecha, en donde el ángulo de *pitch* es menor a 10° . En el área de investigación se encontró una falla de éste tipo con un rumbo $N110^{\circ}$ (tabla 17).

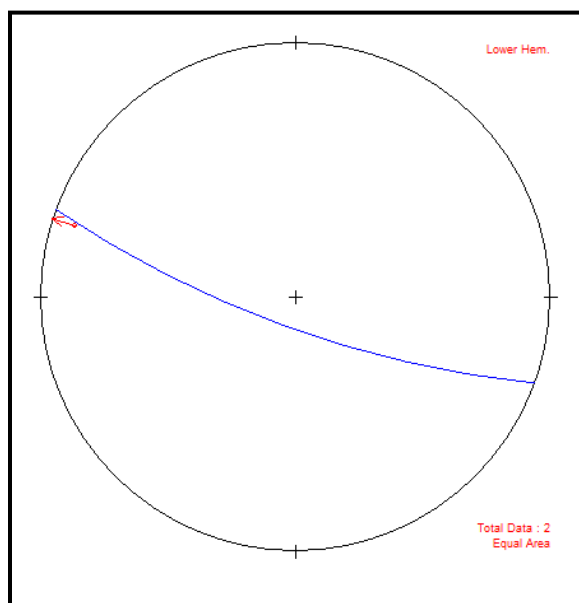
TABLA 17
FALLAS DEXTRALES

Buzamiento	Dirección de buzamiento	Pitch	Sentido
80°	$N200^{\circ}$	10°	<i>W</i>

Fuente: Investigación de campo. 2017.

En la representación estereográfica de la única falla de rumbo dextral, se observa la dirección de movimiento y como el plano de falla posee una orientación $N110^{\circ}$ (figura 30).

FIGURA 30
ESTEREOGRAMA DEL PLANO DE FALLA DE RUMBO DE TIPO DEXTRAL

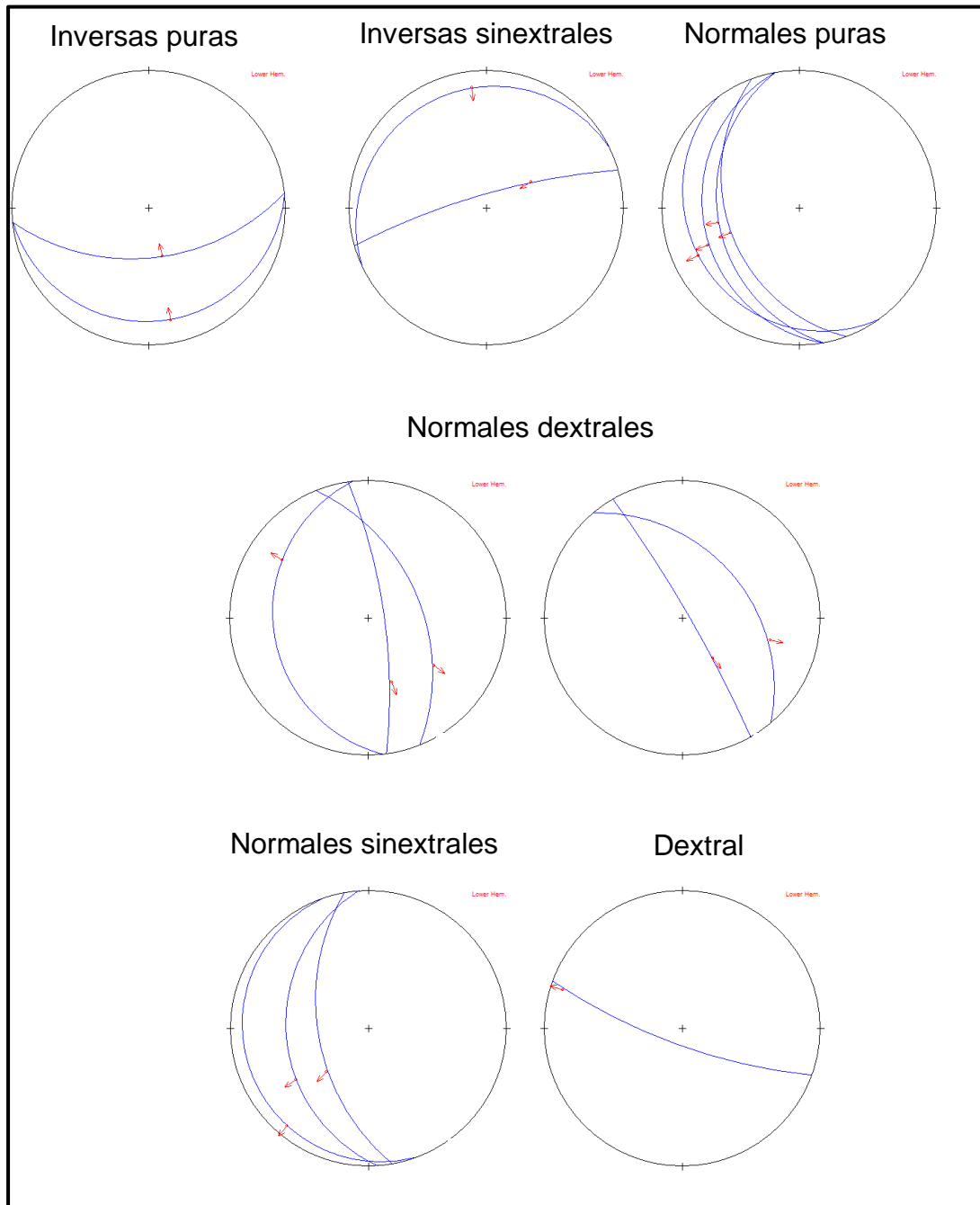


Fuente: Investigación de campo. 2017.

3.2.5 Análisis de fallas

Para el análisis de las fallas se asociaron en familias, donde se determinó la cinemática del área, dichas familias se encuentran asociadas a dos eventos deformacionales diferentes. La primera asociación de familias de fallas permitió la interpretación de un movimiento dextral, ésta se representa en la figura 31.

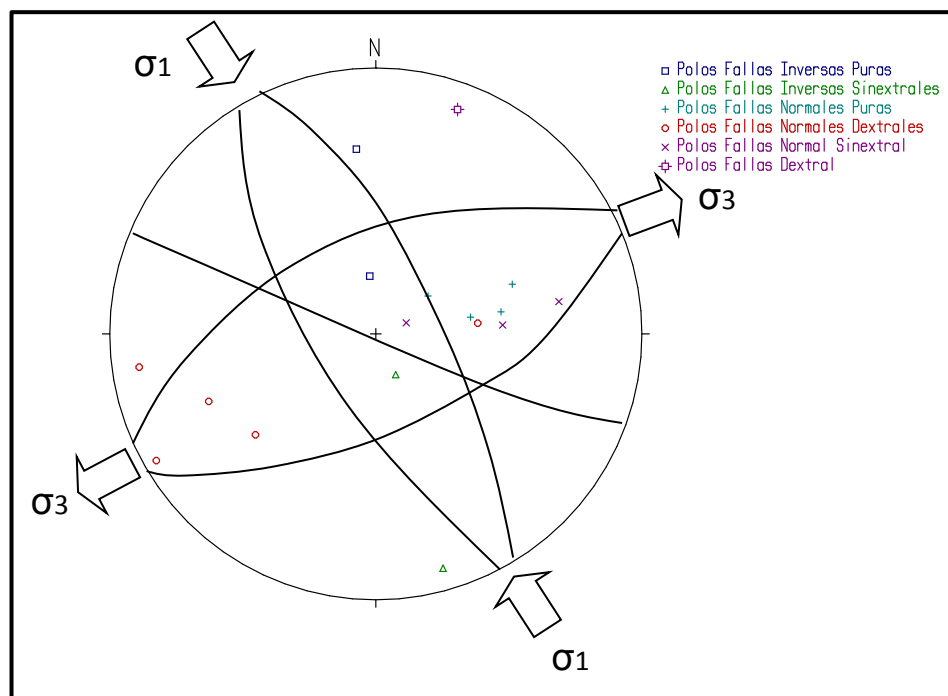
FIGURA 31
REPRESENTACIÓN DE FAMILIAS DE FALLAS PARA EL MODELO DEXTRAL



Fuente: Investigación de campo. 2017.

Para una mayor claridad en la interpretación y análisis, se unificaron todas las fallas y se representaron en un estereograma que incluye sus polos. (figura 32)

FIGURA 32
MODELO ESTRUCTURAL DE FALLAS PARA LA CINEMÁTICA DEXTRAL



Fuente: Investigación de campo. 2017.

En el análisis e interpretación de dicha asociación se logró reflejar la cinemática de un movimiento dextral, ya que su disposición espacial se asemeja al que presenta una elipse deformacional de este tipo. La dinámica se observa en la tabla 18.

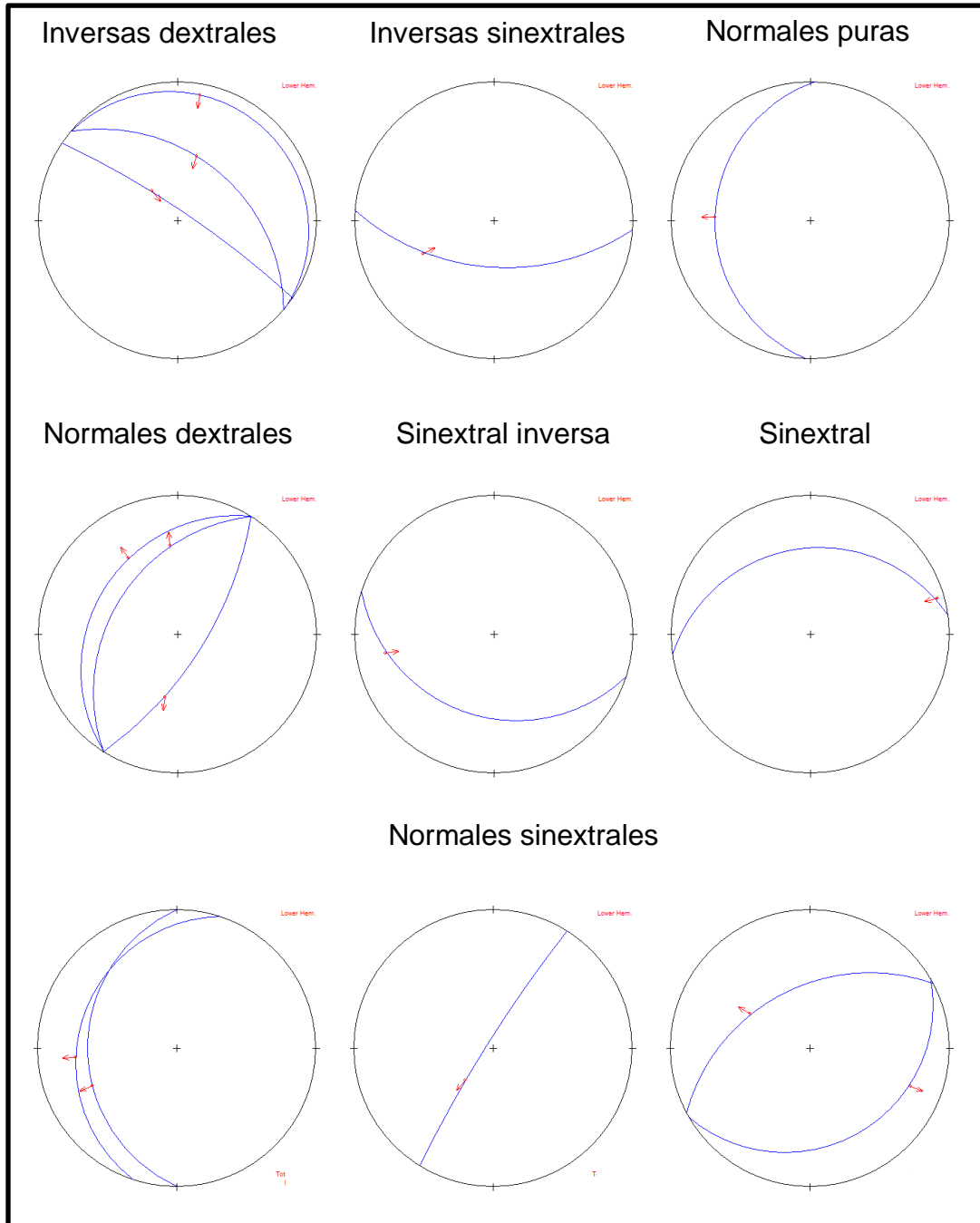
TABLA 18
DINÁMICA DE ESFUERZOS PRINCIPALES PARA LA PRIMERA ASOCIACIÓN DE FALLAS

Esfuerzo	Azimut
Sigma 1	N330°
Sigma 3	N240°

Fuente: Investigación de campo. 2017.

La segunda asociación de familias de fallas permitió la interpretación de un movimiento sinextral, ésta se representa en la figura 33

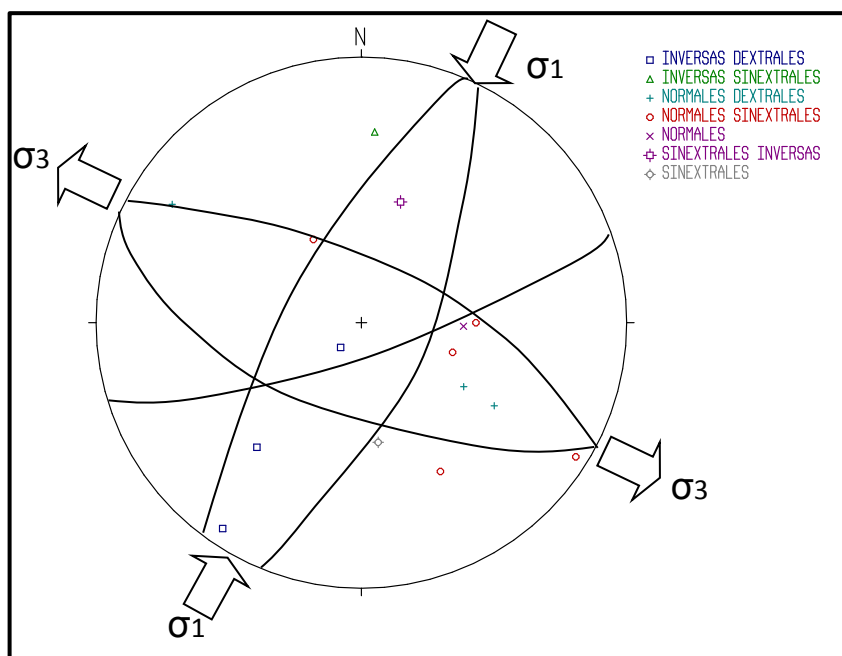
FIGURA 33
REPRESENTACIÓN DE FAMILIAS DE FALLAS PARA EL MODELO SINEXTRAL



Fuente: Investigación de campo. 2017.

Para una mayor claridad en la interpretación y análisis, se unificaron todas las fallas y se representaron en un estereograma que incluye sus polos. (figura 34)

FIGURA 34
MODELO ESTRUCTURAL DE FALLAS PARA LA CINEMÁTICA SINEXTRAL



Fuente: Investigación de campo. 2017.

En el análisis e interpretación de dicha asociación se logró reflejar la cinemática de un movimiento sinextral, ya que su disposición espacial se asemeja al que presenta una elipse deformacional de este tipo. La dinámica se observa en la tabla 19.

TABLA 19
DINÁMICA DE ESFUERZOS PRINCIPALES PARA LA SEGUNDA ASOCIACIÓN DE FALLAS

Esfuerzo	Azimut
Sigma 1	N025°
Sigma 3	N295°

Fuente: Investigación de campo. 2017.

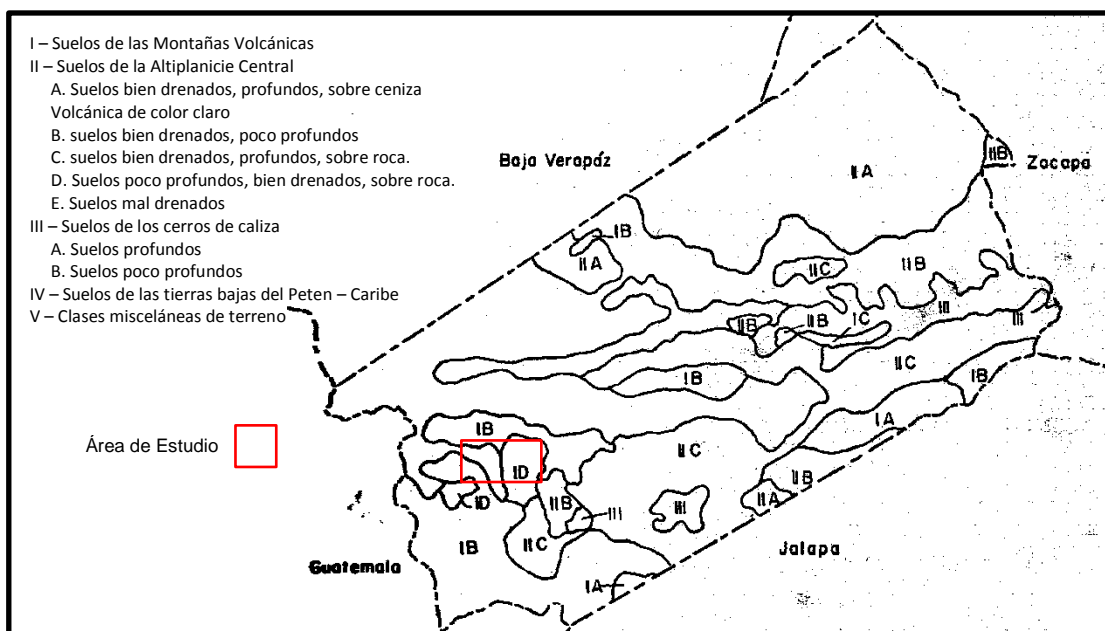
3.3 SUELOS

El área de estudio se encuentra en el departamento de El Progreso, el cual se caracteriza por la presencia de estos tipos de suelo:

Suelos desarrollados sobre materiales volcánicos; suelos desarrollados sobre materiales metamórficos y sedimentarios; suelos poco profundos desarrollados sobre esquistos y serpentina; y suelos poco profundos desarrollados sobre esquistos arcillosos y sobre rocas calizas²⁸ (Figura 35).

Los tipos de suelos identificados dentro del área de investigación son: suelos desarrollados sobre materiales volcánicos y suelos desarrollados sobre materiales metamórficos y sedimentarios, los cuales son bien diferenciados dentro del campo.

FIGURA 35
DISPOSICIÓN DE SUELOS EN EL DEPARTAMENTO DE EL PROGRESO



Fuente: Tomada de Charles Simmons, Et. Al., Clasificación de reconocimiento de los suelos de la república de Guatemala. Año 1959

²⁸ Charles Simmons, Et. Al., Clasificación de reconocimiento de los suelos de la república de Guatemala. (Guatemala: Editorial José de Pineda Ibarra., 1959)

A partir de esto se describen los suelos encontrados en el área de estudio:

3.3.1 Suelos Salamá

Son suelos donde gran parte del área ha sido seriamente erosionada a causa de las prácticas inadecuadas y del sobrepastoreo. Parte del área puede continuarse usando para el pastoreo, pero una gran extensión debe ser reforestada. Son suelos poco profundos, bien drenados, sobre materiales de color claro²⁹

Este tipo de suelos sobreyacen a las Unidades de Anfibolita y Filita que se ubican en la parte norte del área de investigación. Dichos suelos se observan de tonalidades naranja y grisácea y oscilan entre los 0,30 m de profundidad.

3.3.2 Suelos Mongoy

Son suelos profundos sobre materiales de color oscuro. Son suelos pedregosos e improductivos de malezas y matorrales, con algunos pedazos en pastoreo. Son muy inclinados y pedregosos para el cultivo³⁰

Este tipo de suelos sobre yacen a la Unidad de Basaltos, son bastante característicos en el campo ya que se observan de una tonalidad gris oscuro, se encuentra cubierto por una espesa capa de matorrales. El espesor de la capa de suelo es de aproximadamente de 0,5 m.

3.3.3 Suelos Chuarrancho

Están en las pendientes muy inclinadas y no son aptos para los cultivos. Casi toda el área esta en bosques o en pastos y malezas. La especie

²⁹ Charles Simmons, Et. Al., Clasificación de reconocimiento de los suelos de la república de Guatemala. (Guatemala: Editorial José de Pineda Ibarra., 1959)

³⁰ Ibídem

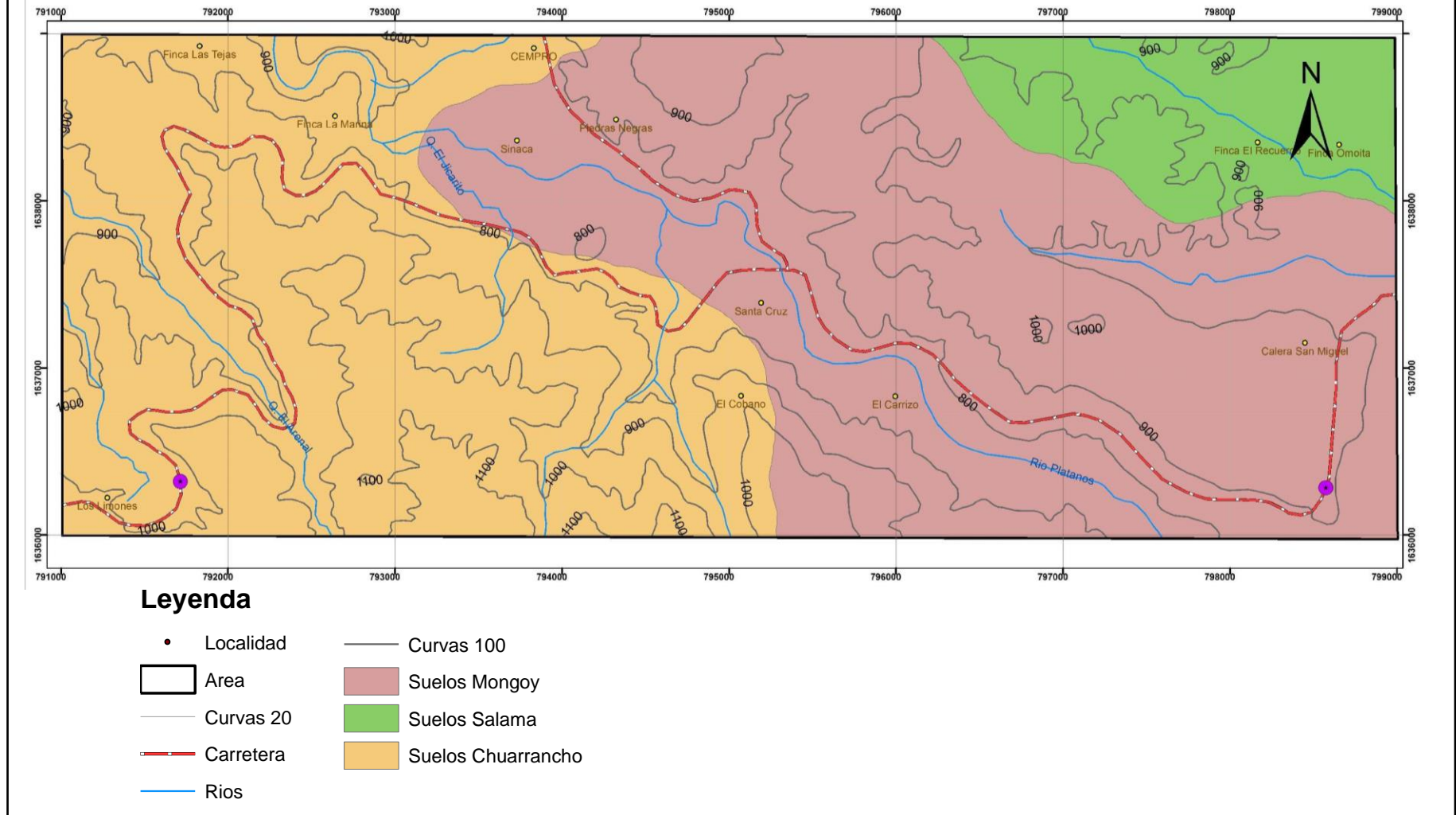
principal es el pino, pero también hay robles intermezclados en el bosque. Son suelos poco profundos sobre esquisto y serpentina³¹.

Esta unidad sobreyace a la Unidad de Anfibolita ubicada en la parte suroeste del área de investigación en donde se logró observar que la vegetación se encuentra bastante desarrollada y variada. La tonalidad del suelo es de color naranja-rojizo, el espesor de la capa de suelo oscila entre los 0,40 m a 0,70 m.

En el mapa 4 se tiene la distribución de las distintas series de suelo encontrados en el área de estudio.

³¹ Charles Simmons, Et. Al., Clasificación de reconocimiento de los suelos de la república de Guatemala. (Guatemala: Editorial José de Pineda Ibarra., 1959)

MAPA 4 DISTRIBUCIÓN DE SUELOS EN EL ÁREA DE ESTUDIO



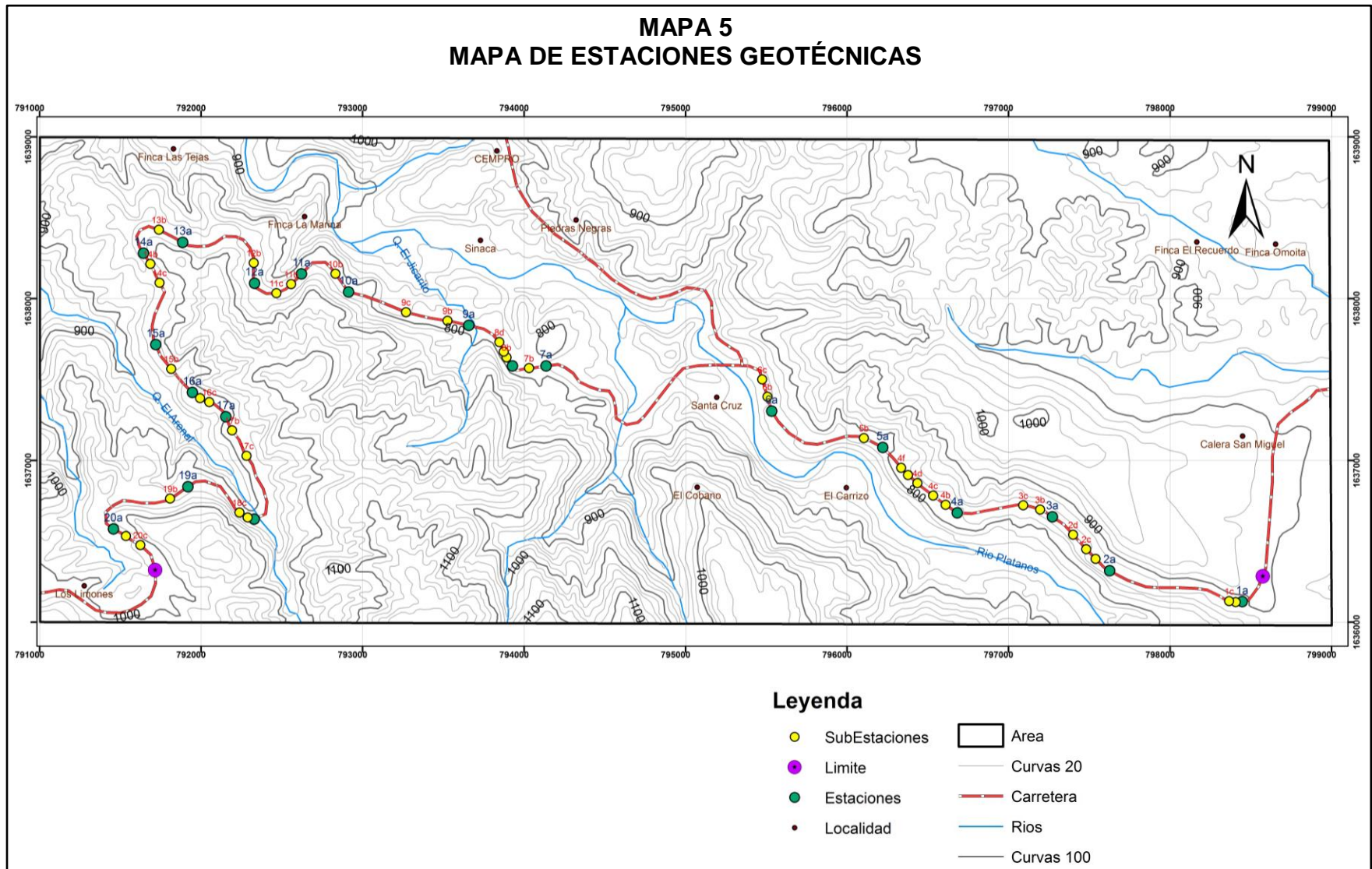
Fuente: Investigación de campo. 2017.

3.4 CARACTERIZACIÓN GEOMECÁNICA

A continuación se presentan los datos generados en campo, la clasificación y análisis de cada una de las estaciones evaluadas en el tramo carretero, así como la descripción de las características para el sistema *R.M.R.* y luego los factores de ajuste para el sistema *S.M.R.*, así como las medidas de mitigación ingenieriles adecuadas a los taludes y la información generada para los suelos estudiados.

3.4.1 Ubicación de las estaciones

El área de estudio está conformada por 24 km² de área, abarca 12 km lineales de tramo carretero, dentro de los cuales están distribuidas 20 estaciones principales de trabajo, que se subdividen en 56 subestaciones para análisis geotécnico. La ubicación de cada una de las estaciones y subestación se muestra en el mapa 5.



Fuente: Investigación de campo. 2017.

Las estaciones se ubican sobre la carretera CA-09, en el municipio de Sanarate en el departamento de El Progreso, en la tabla 20 se describen ciertas características generales de las estaciones evaluadas.

TABLA 20
UBICACIÓN DE LAS ESTACIONES GEOTÉCNICAS

Est.	Sub-Est.	Coordenadas		Material	Talud		Est.	Sub-Est.	Coordenadas		Material	Talud	
		x	y		Dip	Dir			x	y		Dip	Dir
1	1A	798454	1636125	Basalto	54°	N132	8	8A	793930	1637582	Anfibolita	76°	N315
	1B			Basalto	53°	N131		8B			Anfibolita	74°	N314
2	2A	797645	1636300	Anfibolita	76°	N145		8C			Anfibolita	75°	N315
	2B			Anfibolita	78°	N144		8D			Anfibolita	78°	N312
	2C			Anfibolita	74°	N145	9	9A	793658	1637834	Anfibolita	48°	N297
	2D			Anfibolita	75°	N147		9B			Anfibolita	47°	N294
3	3A	797670	1636315	Anfibolita	78°	N276		9C			Anfibolita	48°	N299
	3B			Anfibolita	77°	N275	10	10A	792911	1638034	Anfibolita	74°	N346
	3C			Anfibolita	78°	N175		10B			Anfibolita	73°	N344
4	4A	796693	1636678	Anfibolita	48°	N185	11	11A	792627	1638147	Anfibolita	53°	N040
	4B			Anfibolita	47°	N187		11B			Anfibolita	51°	N043
	4C			Anfibolita	45°	N184		11C			Anfibolita	52°	N042
	4D			Anfibolita	48°	N186	12	12A	792307	1638311	Anfibolita	50°	N332
	4E			Anfibolita	46°	N185		12B			Anfibolita	52°	N334
	4F			Anfibolita	41°	N184	13	13A	791889	1638347	Anfibolita	75°	N353
5	5A	796237	1637061	Anfibolita	87°	N125		13B			Anfibolita	77°	N350
	5B			Anfibolita	88°	N123	14	14A	791646	1638277	Anfibolita	68°	N215
6	6A	795548	1637299	Anfibolita	64°	N143		14B			Anfibolita	69°	N218
	6B			Anfibolita	65°	N147	15	15A	791725	1637714	Anfibolita	64°	N235
	6C			Anfibolita	65°	N145		15B			Anfibolita	67°	N234
7	7A	794133	1637585	Anfibolita	68°	N355							
	7B			Anfibolita	70°	N352							

Fuente: Investigación de campo. 2017.

TABLA 21
UBICACIÓN DE LAS ESTACIONES GEOTÉCNICAS (CONTINUACIÓN)

Est.	Sub-Est.	Coordenadas		Material	Talud		Est.	Sub-Est.	Coordenadas		Material	Talud	
		x	y		Dip	Dir			x	y		Dip	Dir
16	16A	791948	1637420	Anfibolita	65°	N236	19	19A	791926	1636832	Anfibolita	81°	N130
	16B			Anfibolita	66°	N233		19B			Anfibolita	81°	N132
	16C			Anfibolita	64°	N238	20	20A	791457	1636578	Anfibolita	74°	N170
17	17A	792156	167274	Anfibolita	70°	N196		20B			Anfibolita	74°	N168
	17B			Anfibolita	74°	N194		20C			Anfibolita	77°	N171
	17C			Anfibolita	71°	N193							
18	18A	792333	1636645	Anfibolita	50°	N230							
	18B			Anfibolita	53°	N234							
	18C			Anfibolita	51°	N229							

Fuente: Investigación de campo. 2017.

3.4.2 Resistencia de la roca

Para determinar la resistencia de la matriz rocosa se realizó el ensayo de resistencia a compresión en cubos de roca (ASTM-C39), tanto en la unidad de basalto como en la unidad de anfibolita, ya que son las unidades litológicas de interés geotécnico. Los resultados obtenidos para cada uno de los ensayos realizados se muestran en la tabla 22.

TABLA 22
RESULTADOS DEL ENSAYO DE COMPRESIÓN SIMPLE

	Litología	Coordenadas		Resultados	
				Resistencia Lb/plg ²	Resistencia MPa
1	Basalto	798454	1636122	12 960	89,30
2	Anfibolita	792334	1638093	13 700	94,40

Fuente: Laboratorio de concretos, Centro de Investigación de Ingeniería. 2017

3.4.3 Angulo de fricción interna

El ángulo de fricción interna se utilizó para la determinación de la posibilidad de roturas y estabilidad de los mecanismos de falla, este ángulo fue determinado por dos criterios, el primero que fue el ángulo de fricción teórico propuesto por varios autores, y el segundo que fue por medio del ensayo de pruebas deslizantes (*Till Test*, Kliche 1999), el cual consiste en determinar el ángulo a partir del cual un bloque se roca se desliza sobre otra en contacto entre las caras de cada uno de los bloques en contacto. En la tabla 23 se describen los resultados obtenidos.

TABLA 23
ÁNGULO DE FRICCIÓN PARA LAS UNIDADES LITOLÓGICAS DE INTERÉS
GEOTÉCNICO

Unidad litológica	Ángulo de fricción (°)		
	Teórico	<i>Till Test</i>	Promedio (Utilizado)
Anfibolita	50° - 60°	64°	57°
Basalto	35° - 45°	47°	42°

Fuente: Investigación de campo. 2017.

3.4.4 Clasificación de Bieniawski

Para determinar la calidad geotécnica de los macizos rocosos por medio de sistema *R.M.R.* se da una ponderación a cada uno de los aspectos a tomar, en la tabla 24 se muestra como ejemplo la estación 20A sobre la toma de datos en campo. La ponderación promedio de cada uno de los aspectos, los cuales se presentan a continuación:

TABLA 24
PONDERACIÓN PROMEDIO DE PARÁMETROS *R.M.R.*

Factores <i>R.M.R.</i>		Valor
1	Resistencia de la matriz rocosa (MPa)	8
2	Calidad de la roca <i>R.Q.D.</i>	7
3	Espaciamiento entre discontinuidades	10
4	Estado de las discontinuidades	
	a. Abertura entre discontinuidades	1
	b. Continuidad de las discontinuidades	1
	c. Rugosidad de las paredes	3
	d. Relleno de las discontinuidades	6
	e. Meteorización	3
5	Presencia de agua en el talud	15
6	Orientación de las discontinuidades	-25
Calidad geotécnica del talud <i>R.M.R.</i>		29

Fuente: Investigación de campo. 2017.

TABLA 25
FORMATO PARA LA TOMA DE DATOS, ESTACIÓN 20A

Proyecto: Evaluación geotécnica de los taludes del corte de carretera ubicado del Km. 39 al Km. 51 de la Carretera al Atlántico CA-9, Sanarate, El Progreso				Realizado Por: Jose Bermudez			
Foto: DSC57255		Fecha:		Localización: X: 791457		Y: 1636578	
Observación: Estación 20 Anfibolita Fracturada Ligeramente meteorizada.							

Estación	DATOS A MEDIR EN CADA PLANO														DATOS A MEDIR							
	Tipo de Plano	Orient.	Espaciado (mm)						Continuidad (m)				Relleno		Superficie		Agua	CROQUIS				
			Azmut	Buzamiento	< 20 (IA)	20 - 60 (IB)	60 - 200 (IC)	200 - 600 (IIA)	600 - 2000 (IIB)	2000 - 6000 (IIC)	> 6000 (IIIA)	< 1	1 - 3	3 - 10	10 - 20	> 20		Espesor mm	Tipo	Ondul. (°)	Rug. JRC	FOTOGRAFIA
20A	S1	347	50	X									X		1	-	LR	12	0			
		344	49	X									X		1	-	LR	12	0			
		349	51	X									X		1	-	LR	12	0			
		345	51	X									X		1	-	LR	12	0			
		347	50	X									X		1	-	LR	12	0			
		346	49	X									X		1	-	LR	12	0			
		348	50	X									X		1	-	LR	12	0			
		345	52	X									X		1	-	LR	12	0			
	F1	200	54										X		52	Ar	L	2	0			
	F2	309	61										X		38	Ar	L	2	0			
	F3	330	79										X		15	Oz	L	4	0			
	F4	175	23										X		29	Ar	L	2	0			
	J1	10	58		X								X		1	-	LR	12	0			
		10	57		X								X		2	Ar	LR	12	0			
		12	60		X								X		1	-	LR	12	0			
		09	62		X								X		1	Ar	LR	12	0			
		11	57		X								X		2	-	LR	12	0			
		12	55		X								X		1	-	LR	12	0			
		10	56		X								X		1	-	LR	12	0			
	J2	140	44		X								X		3	Ar	LR	12	0			
		141	45		X								X		1	-	LR	12	0			
		142	47		X								X		1	-	LR	12	0			
		143	42		X								X		1	Ar	LR	12	0			
		141	45		X								X		1	-	LR	12	0			
		142	44		X								X		1	-	LR	12	0			
	J3	175	21		X								X		2	Oz	LR	12	0			
		174	24		X								X		2	-	LR	12	0			
		175	22		X								X		4	Ar	LR	12	0			
		176	23		X								X		1	-	LR	12	0			
		173	20		X								X		1	-	LR	12	0			

Resistencia a Compresión Simple de la Roca Intacta							
Valor (Mapa)	> 240	240-175	175-125	125-100	100-75	75-50	50-30
Valoración	15	14	12	10	8	6	4

Juntas Por Metro (RQD y Espaciado Entre Discontinuidades)																	
Juntas/M	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Valoración	40	34	31	29	28	27	26	25	23	22	21	20	19	18	17	16	
Juntas/M	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33
Valoración	16	15		14		12		11		10		9		8			
Juntas/M	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
Valoración	8			7						5				4			3

Condiciones Hidrogeológicas					
Estado	Seco	Lig. Húmedo	Húmedo	Gotear	Flujo
Flujo (L/Min)	0	< 1	1 - 2.5	2.5 - 12.5	> 12.5
Valoración	15	10	7	4	0

LEYENDA			
M. Rug. = Muy Rugosa	No Afect. = No Afectado	Zj= Falla	
L. Rug. = Ligeramente Rugosa	S ₀ = Estratificación	Ar = Arcilla	
E. d Falla = Espejo de Falla	S ₁ = Foliación	C = Calcita	
C.S. = Compresión Simple	J ₁ = Junta o Fractura	Qtz = Cuarzo	

Clasificación R.M.R.			
Factores	Valoración	Ponderación	
Resistencia a C.S.	100-75	8	
R.Q.D. + Espaciado	42 / IC	7 + 10	
Condición de Discontinuidad	Continuidad	10-20	1
	Apertura	1-5	1
	Rugosidad	L. Rugosa	3
	Relleno	Ninguno	6
Meteorización	Moderado	3	
Cond. Hidrogeológicas	Seco	15	
TOTAL		54	

Condiciones de las Discontinuidades				
Continuidad	< 1m	1-3m	3-10m	10-20m
	6	4	2	1
Apertura	0	< 0.1mm	0.1-1mm	1-5mm
	6	5	3	1
Rugosidad	M. Rug.	Rugosa	L. Rug.	Lisa
	6	5	3	1
Relleno	Ninguno	Relleno Duro		Relleno Blando
	6	< 5mm	> 5mm	< 5mm
	6	4	2	2
Grado de Meteorización	No Afect.	Ligero	Moderado	Alto
	6	5	3	1

Fuente: Investigación de campo. 2017.

En la tabla 25 se muestra el formato con el cual se tomaron los datos referentes a la clasificación *R.M.R.*, cada aspecto tiene una ponderación establecida en la tabla 3 del capítulo 2 para la realización de la sumatoria de dichos parámetros. En el anexo 10 se detalla la toma de datos de todas las estaciones evaluadas en el área de estudio.

En el ejemplo se tomó la estación 20A, la cual consiste en roca anfíbolita con grado de meteorización III, posterior a la sumatoria de sus parámetros se definió que presenta una ponderación de 29 respecto a su calidad geotécnica, para lo cual se establece que es un macizo de clase IV de mala calidad, estos aspectos fueron establecidos mediante la tabla 5 de la página 30.

Este procedimiento se realizó con las demás estaciones y subestaciones para establecer la calidad geotécnica de cada uno de los macizos rocosos evaluados a lo largo de tramo carretero en estudio. Los resultados de cada una de las estaciones se muestran en la tabla 26.

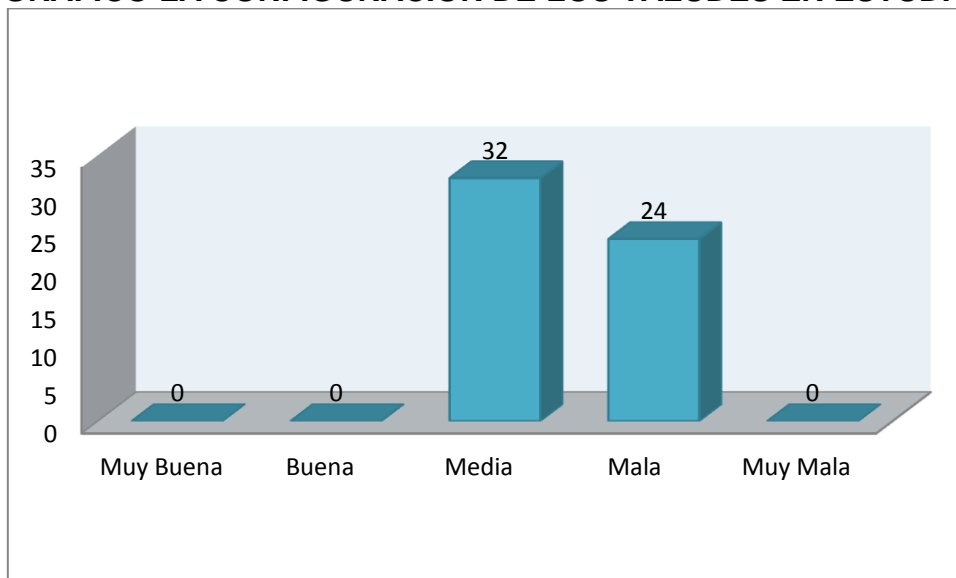
TABLA 26
RESULTADOS DE LA CALIDAD GEOTÉCNICA SEGÚN LA CLASIFICACIÓN DE
BIENIAWSKI, SISTEMA R.M.R.

Est.	Sub-Est.	Coordenadas		Calidad Geot.	R.M.R.	Est.	Sub-Est.	Coordenadas		Calidad Geot.	R.M.R.
		x	y					x	y		
1	1A	798454	1636125	Media	46	10	10A	792911	1638034	Media	49
	1B			Mala	40		10B			Media	47
2	2A	797645	1636300	Mala	45	11	11A	792627	1638147	Media	49
	2B			Mala	46		11B			Media	50
	2C			Mala	46		11C			Media	49
	2D			Mala	45	12	12A	792307	1638311	Media	50
3	3A	797670	1636315	Media	50		12B			Media	51
	3B			Media	50	13	13A	791889	1638347	Mala	28
	3C			Media	47		13B			Mala	27
4	4A	796693	1636678	Media	49	14	14A	791646	1638277	Media	50
	4B			Media	51		14B			Media	47
	4C			Media	51	15	15A	791725	1637714	Mala	25
	4D			Media	53		15B			Mala	27
	4E			Media	52	16	16A	791948	1637420	Media	44
	4F			Media	52		16B			Media	45
5	5A	796237	1637061	Mala	30		16C			Media	45
	5B			Mala	32	17	17A	792156	167274	Media	44
6	6A	795548	1637299	Media	53		17B			Media	43
	6B			Media	55		17C			Media	43
	6C			Media	53	18	18A	792333	1636645	Mala	25
7	7A	794133	1637585	Media	45		18B			Mala	26
	7B			Media	48		18C			Mala	23
8	8A	793930	1637582	Mala	26	19	19A	791926	1636832	Media	48
	8B			Mala	29		19B			Media	50
	8C			Mala	29	20	20A	791457	1636578	Mala	29
	8D			Mala	27		20B			Mala	29
9	9A	793658	1637834	Mala	28		20C			Mala	29
	9B			Mala	32						
	9C			Mala	31						

Fuente: Investigación de campo. 2017.

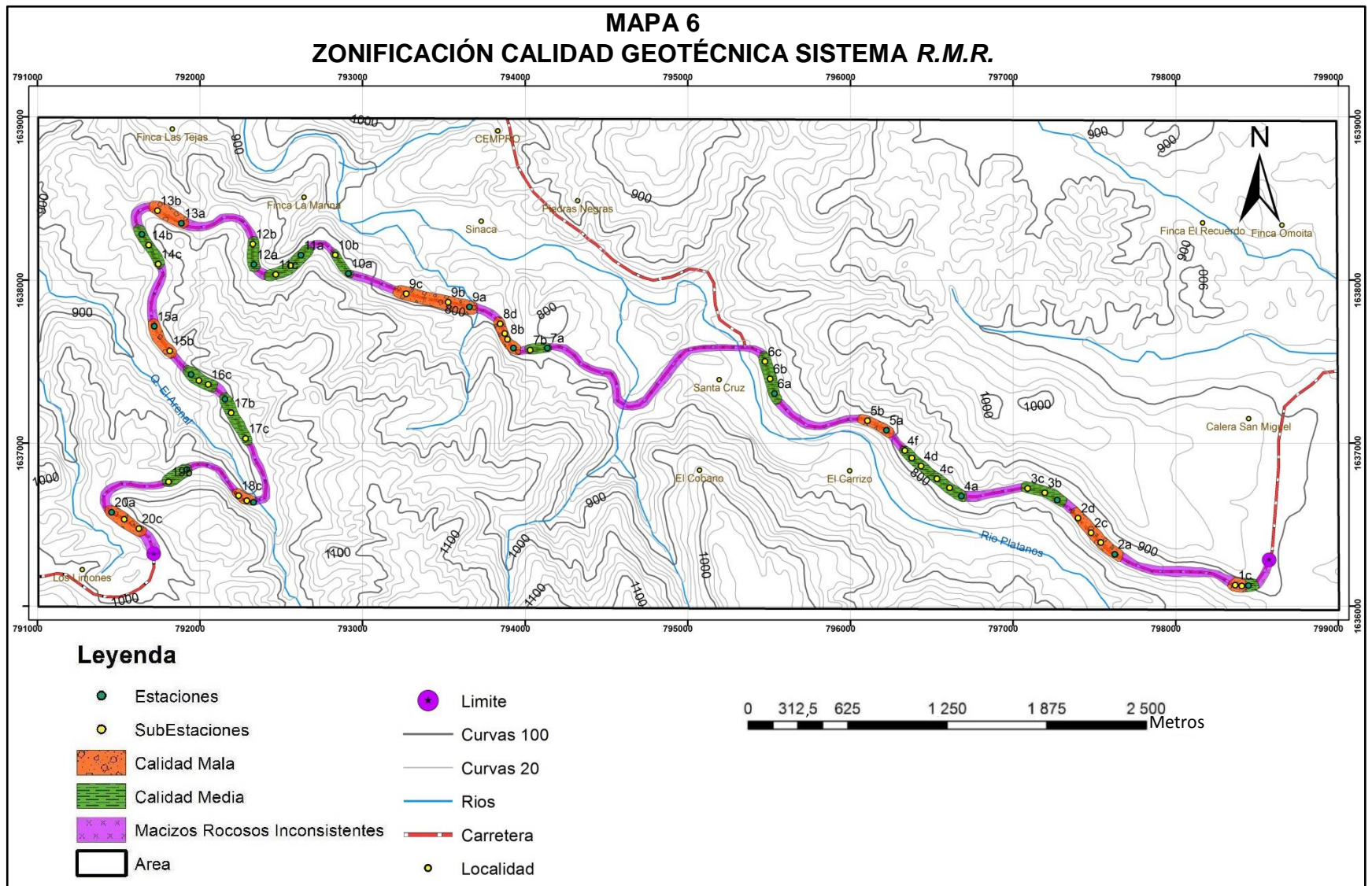
En la figura 36 se observa una mayor presencia de macizos rocosos con calidad geotécnica media, seguido por los macizos con calidad geotécnica mala, esto como resultado de recuento de las estaciones.

FIGURA 36
GRÁFICO LA CONFIGURACIÓN DE LOS TALUDES EN ESTUDIO



Fuente: Investigación de campo. 2017.

Estos datos hacen referencia a la parte cuantitativa trabajada en los taludes en estudio, para tener una mejor referencia de la parte cualitativa en el mapa 6 se ejemplifican las distintas zonas encontradas según la calidad geotécnica establecida, así como su distribución espacial a lo largo del área de estudio.



Fuente: Investigación de campo. 2017.

3.4.5 Clasificación Romana o sistema *S.M.R.*

La clasificación del sistema *S.M.R.* consiste en agregarle ciertos factores de ajuste al *R.M.R.* básico para que este tenga una ponderación aplicable a taludes. Estos factores de ajuste corresponden a las relaciones que presenta la orientación de las discontinuidades con la orientación del talud.

Es de tomar muy en cuenta que cuando se habla de *R.M.R.* básico únicamente se hace referencia a los primeros 5 parámetros que se evalúan para este sistema, dejándose de lado el factor correctivo de talud. Para tener una mayor claridad de esto se toma la estación 20A como ejemplo:

TABLA 27
PONDERACIÓN PROMEDIO DE PARÁMETROS *R.M.R.* BÁSICO

Factores <i>R.M.R.</i>		Valor
1	Resistencia de la matriz rocosa (MPa)	8
2	Calidad de la roca <i>R.Q.D.</i>	7
3	Espaciamiento entre discontinuidades	10
4	Estado de las discontinuidades	
	a. Abertura entre discontinuidades	1
	b. Continuidad de las discontinuidades	1
	c. Rugosidad de las paredes	3
	d. Relleno de las discontinuidades	6
	e. Meteorización	3
5	Presencia de agua en el talud	15
<i>R.M.R.</i> Básico		54

Fuente: Investigación de campo. 2017.

Con el valor obtenido en la tabla 27 y los factores de ajuste correspondientes al sistema *S.M.R.*, los cuales fueron descritos en el capítulo 2, se tiene lo siguiente:

$$S.M.R. = R.M.R._{(Básico)} + (F1 * F2 * F3) + F4$$

$$S.M.R._{(E20A)} = 54 + (0,85 * 0,40 * -60) + 8$$

$$S.M.R._{(E20A)} = 41,6 = 42$$

Con el resultado obtenido y lo mostrado en la tabla 8 del capítulo 2, se establece que el macizo de la estación 20A es de clase III con calidad normal, y las características correspondientes de este macizo son: inestable conformado por juntas o grandes cuñas, el cual necesita una corrección. El *S.M.R.* de las estaciones estudiadas se presenta en la siguiente tabla:

TABLA 28
RESULTADOS DE LA CALIDAD GEOTÉCNICA SEGÚN LA CLASIFICACIÓN ROMANA, SISTEMA *S.M.R.*

Est.	Sub-Est.	Coordenadas		Calidad Geot.	S.M.R.	Est.	Sub-Est.	Coordenadas		Calidad Geot.	S.M.R.	
		x	y					x	y			
1	1A	798454	1636125	Buena	63	10	10A	792911	1638034	Normal	46	
	1B			Normal	57		10B			Normal	44	
2	2A	797645	1636300	Mala	24	11	11A	792627	1638147	Normal	54	
	2B			Normal	60		11B			Normal	55	
	2C			Mala	31		11C			Normal	54	
	2D			Normal	60		12	12A	792307	1638311	Mala	34
3	3A	797670	1636315	Mala	38	12	12B			Buena	64	
	3B			Mala	23		13	13A	791889	1638347	Normal	45
	3C			Muy mala	16		13B			Mala	24	
4	4A	796693	1636678	Normal	42	14	14A	791646	1638277	Muy mala	12	
	4B			Mala	29		14B			Normal	54	
	4C			Buena	64		15	15A	791725	1637714	Normal	42

Continúa...

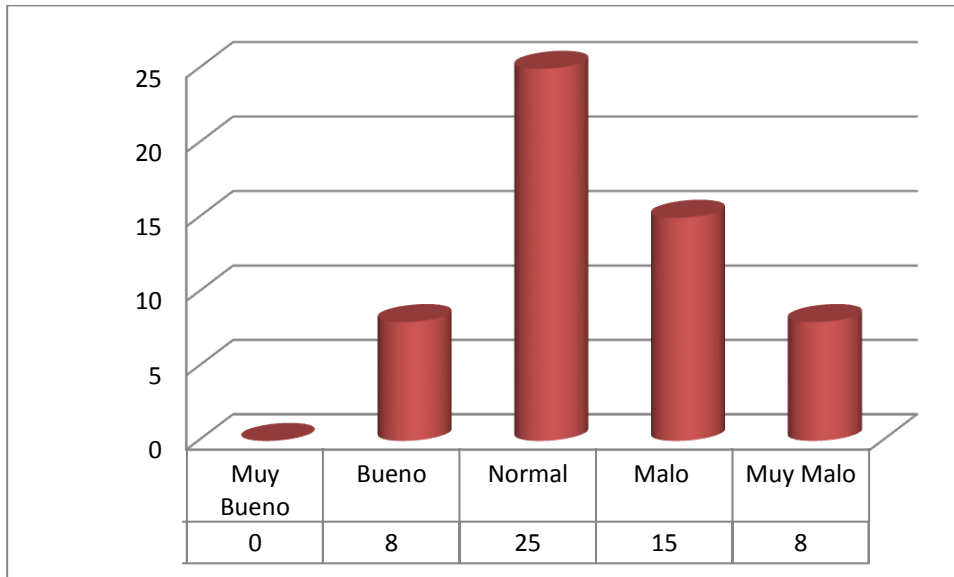
...Viene

	4D			Normal	49		15B			Normal	44
	4E			Mala	35	16	16A	791948	1637420	Norma	41
	4F			Mala	29		16B			Mala	40
5	5A	796237	1637061	Normal	47		16C			Mala	40
	5B			Normal	49	17	17A	792156	167274	Mala	33
6	6A	795548	1637299	Normal	50		17B			Mala	32
	6B			Normal	52		17C			Muy mala	14
	6C			Normal	48	18	18A	792333	1636645	Normal	42
7	7A	794133	1637585	Normal	43		18B			Normal	43
	7B			Normal	42		18C			Mala	40
8	8A	793930	1637582	Muy mala	17	19	19A	791926	1636832	Normal	41
	8B			Buena	62		19B			Muy mala	3
	8C			Normal	60	20	20A	791457	1636578	Normal	42
	8D			Muy mala	17		20B			Buena	62
9	9A	793658	1637834	Mala	39		20			Muy mala	9
	9B			Muy mala	7						
	9C			Normal	48						

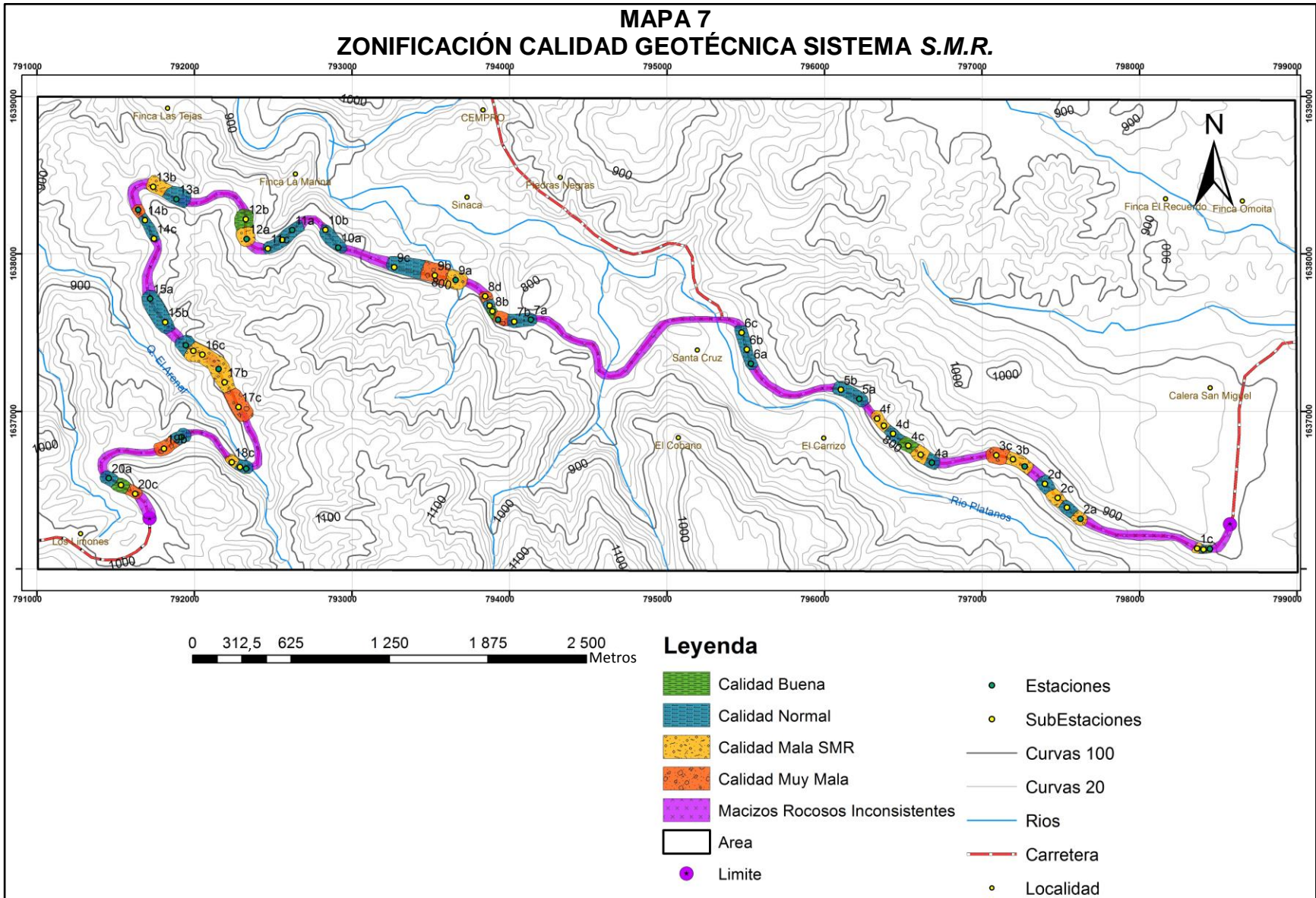
Fuente: Investigación de campo. 2017.

En la tabla 28 se tiene de manera cuantitativa el valor *S.M.R.* obtenido para cada estación, así mismo en la figura 37 se muestra que los resultados tiene una tendencia mayoritaria de macizos rocosos con una calidad geotécnica normal, seguido por mala y por último las calidades geotécnicas buena y muy mala. En el mapa 7 se muestra una zonificación de las diferentes calidades geotécnicas determinadas a través del sistema romano.

FIGURA 37
GRÁFICO DE LA DISTRIBUCIÓN DE TALUDES SEGÚN SU CALIDAD
MEDIANTE EL MÉTODO S.M.R.



Fuente: Investigación de campo. 2017.



Fuente: Investigación de campo. 2017.

3.4.6 Mecanismos de rotura

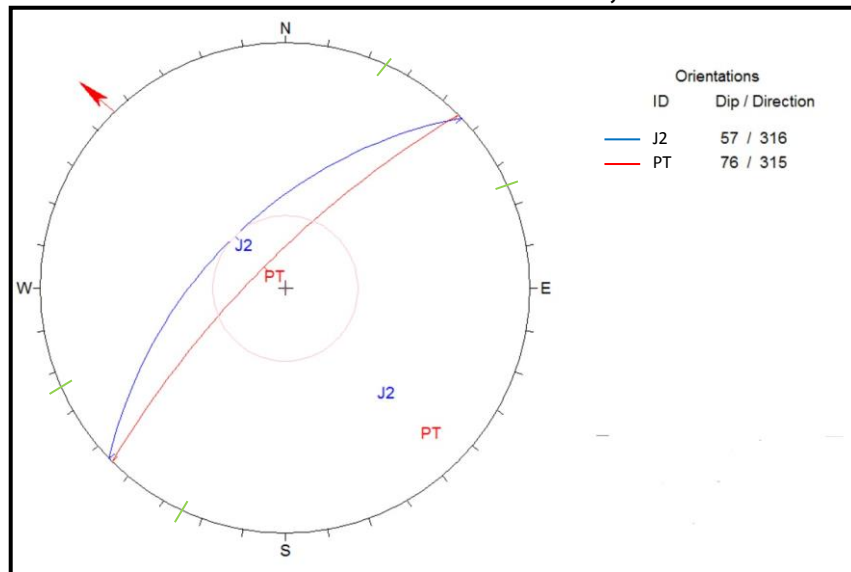
Dentro del área de estudio se identificaron los mecanismos de falla que afectan a los macizos rocosos, por medio de discontinuidades presentes en los mismos. Los mecanismos de falla fueron descritos en el capítulo 2 y estos son: planar, cuña y vuelco.

Al igual que en la caracterización geomecánica del apartado anterior, en este también se presenta un ejemplo de cada uno de los mecanismos de falla con los datos encontrados en el área.

a. Mecanismo de falla planar

En el mecanismo de rotura planar, se tomó la estación 8D para ejemplificar la posibilidad de rotura mediante el mismo. Esta estación corresponde a un macizo de anfibolita con meteorización grado III, en este caso la estructura que afecta al talud es el plano de junta J2, el cual tiene una dirección casi paralela a la de la cara del talud.

FIGURA 38
POSIBILIDAD DE MECANISMO PLANAR, ESTACIÓN 8D



Fuente: Investigación de campo. 2017.

En la figura 38 se observa el paralelismo que existe entre el plano del talud (PT) y el plano de la junta 2 (J2), donde se cumple la condición que entre ambos exista una relación de $\pm 20^\circ$ en la dirección de ambos planos para que exista la posibilidad de una rotura, posterior a esto por medio de un análisis de estabilidad de taludes, se define la estabilidad de cada una de estas roturas.

En la tabla 29 se tienen todas las estaciones y familias de discontinuidades que generan rotura planar, se descartó todas aquellas estaciones y familias que no tienen influencia en la generación de roturas de tipo planar. Así mismo en el anexo 3 se tiene el grafico de cada una de las estaciones, mediante la cual se determinó cuáles eran las familias de discontinuidades que están propensas a generar rotura de tipo planar.

TABLA 29
ESTACIONES Y FAMILIAS DE DISCONTINUIDADES PROPENSAS A GENERAR ROTURA PLANAR

Est.	Sub-Est.	Discontinuidad		Probabilidad De Rotura	Est.	Sub-Est.	Discontinuidad		Probabilidad de rotura
		Familia	Dip/Dir				Familia	Dip/Dir	
2	2A	J3	32/152	SI	6	6c	F1	77/173	SI
2	2C	J1	34/153	SI	8	8A	J2	57/316	SI
3	3A	J1	75/250	SI	8	8D	J2	55/315	SI
3	3B	J2	73/255	SI	9	9A	F1	54/301	SI
3	3C	S1	46/256	SI	9	9B	F1	62/291	SI
4	4A	J1	46/211	SI	9	9B	F2	47/289	SI
4	4B	J2	45/215	SI	11	11A	J1	76/035	SI
4	4D	J3	40/209	SI	11	11B	J1	75/033	SI
4	4E	F1	42/178	SI	11	11C	J2	70/035	SI
4	4F	J1	35/225	SI	12	12A	J1	31/350	SI
13	13B	F3	65/020	SI	19	19A	F1	45/155	SI
14	14A	F1	42/218	SI	19	19A	F2	85/120	SI

Continúa...

...Viene

14	14A	F3	46/235	SI	19	19A	J1	66/112	SI
14	14A	J3	74/194	SI	19	19B	F2	68/123	SI
14	14B	J3	75/196	SI	19	19B	J1	65/113	SI
16	16B	J1	70/262	SI	20	20A	F4	23/175	SI
16	16C	J1	69/260	SI	20	20A	J3	18/172	SI
17	17A	J2	22/184	SI	20	20C	F2	39/155	SI
17	17B	J2	22/181	SI	20	20C	J2	20/170	SI
17	17C	F1	54/215	SI					
17	17C	J2	21/188	SI					

Fuente: Investigación de campo. 2017.

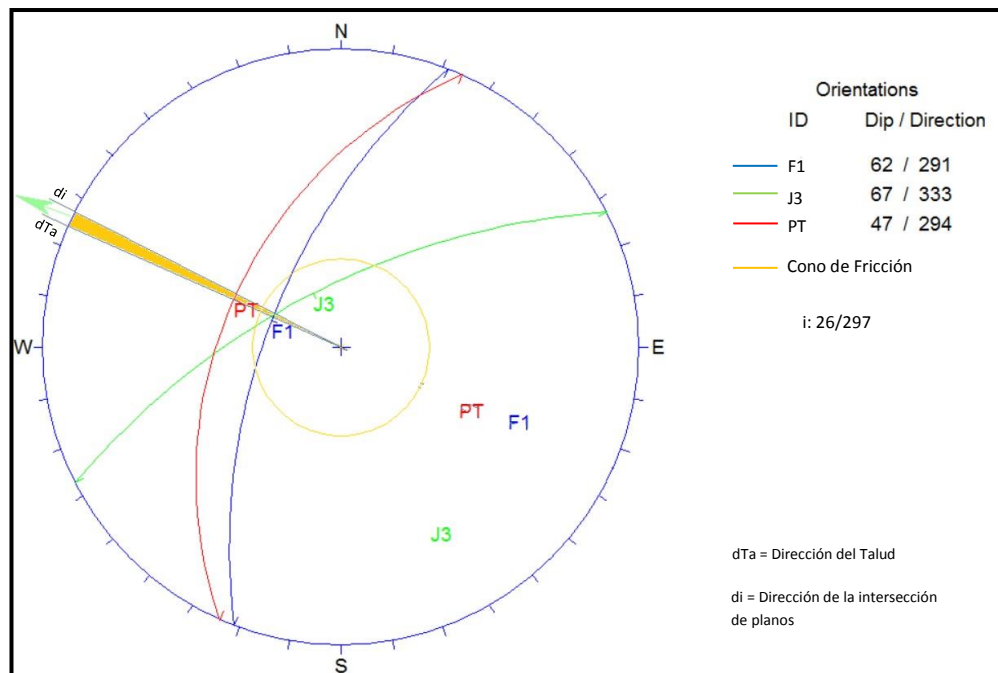
b. Mecanismo de falla en cuña

Para ejemplificar de manera clara el caso de la rotura en cuña, se tomó la estación 9B, que corresponde a un macizo compuesto por roca anfibolita con grado de meteorización III, en este caso se tomaron en cuenta las familias de juntas F1: 62°/N219 & J3: 67°/N333, los cuales forman una cuña con punto de intersección i: 26°/N297.

Para su análisis se establece un cono de fricción el cual está definido por: 90° – ángulo de fricción α , el cual en el caso de la anfibolita es 57, por lo tanto el cono de fricción tendrá 33°. Posterior a esto se verifica que el punto de intersección de las juntas quede dentro de dicho cono de fricción, y de hacerlo es posible que estos planos desarrollen una cuña, caso contrario no lo harán. Para la estación 9B el punto de intersección cae dentro de cono de fricción por lo que sí es posible que se desarrolle una cuña para los planos de discontinuidad anteriormente mencionados.

Además de establecer si es posible que se desarrolle la cuña, se debe determinar el plano por el cual se desarrolla el deslizamiento. Para esto se deben trazar dos líneas, una que representa la intersección de las discontinuidades y la otra la dirección del talud.

FIGURA 39
DETERMINACIÓN DEL PLANO SOBRE EL CUAL SE DESARROLLA EL DESLIZAMIENTO EN EL CASO DE ROTURA EN CUÑA



Fuente: Investigación de campo. 2017.

Si la dirección de las discontinuidades que forman la cuña cae fuera del área sombreada, el deslizamiento se desarrollará en la dirección del punto de intersección. Si la dirección de uno de los planos de discontinuidad cae dentro del área sombreada, se generará en éste y se deberá tratar como un mecanismo planar. Por último, si ambas direcciones caen dentro de la dirección de talud y la dirección de intersección, el deslizamiento se desarrollará sobre el plano más inclinado.

En el caso de la estación 9B, la dirección de las discontinuidades F1 y J3, caen fuera del área naranja, por lo tanto el movimiento se desarrolla en ambos planos. En la tabla 30 se tienen el dato de todas aquellas estaciones y familias de juntas que crean una rotura en cuña las cuales posteriormente analizará la estabilidad de estos, se descartan todas aquellas estaciones y familias que no tienen influencia en la generación de roturas en cuña, así mismo en el anexo 4 se tienen los gráficos de donde se analizaron las diferentes estaciones. A través de esto se determinó cuáles eran las discontinuidades que tienden a crear roturas.

TABLA 30
ESTACIONES Y FAMILIAS DE DISCONTINUIDADES PROPENSAS A GENERAR
ROTURA EN CUÑA

Est.	Sub-Est.	Discontinuidad				Intersección i	Probabilidad de rotura
		Familia	Dip/Dir	Familia	Dip/Dir		
2	2A	J1	88/190	J2	85/043	11/106	SI
2	2B	J1	85/044	F2	72/009	21/325	SI
2	2B	J1	85/044	J2	86/192	15/111	SI
4	4A	F1	73/110	J3	85/043	17/113	SI
5	5A	F1	71/062	J2	82/335	20/041	SI
8	8A	J1	80/042	J2	57/316	32/327	SI
9	9B	F1	62/219	J3	67/333	26/297	SI
9	9C	F1	85/225	J3	65/330	27/308	SI
14	14A	J1	83/297	J3	74/194	17/230	SI
14	14A	J2	68/104	J3	74/194	26/138	SI
14	14B	J1	85/294	J3	75/195	15/217	SI
14	14B	J2	69/110	J3	75/195	25/140	SI
19	19B	F2	68/123	J1	65/113	28/080	SI
20	20A	F2	61/309	J1	58/010	33/344	SI
20	20B	F1	64/030	J1	70/291	32/348	SI

Fuente: Investigación de campo. 2017.

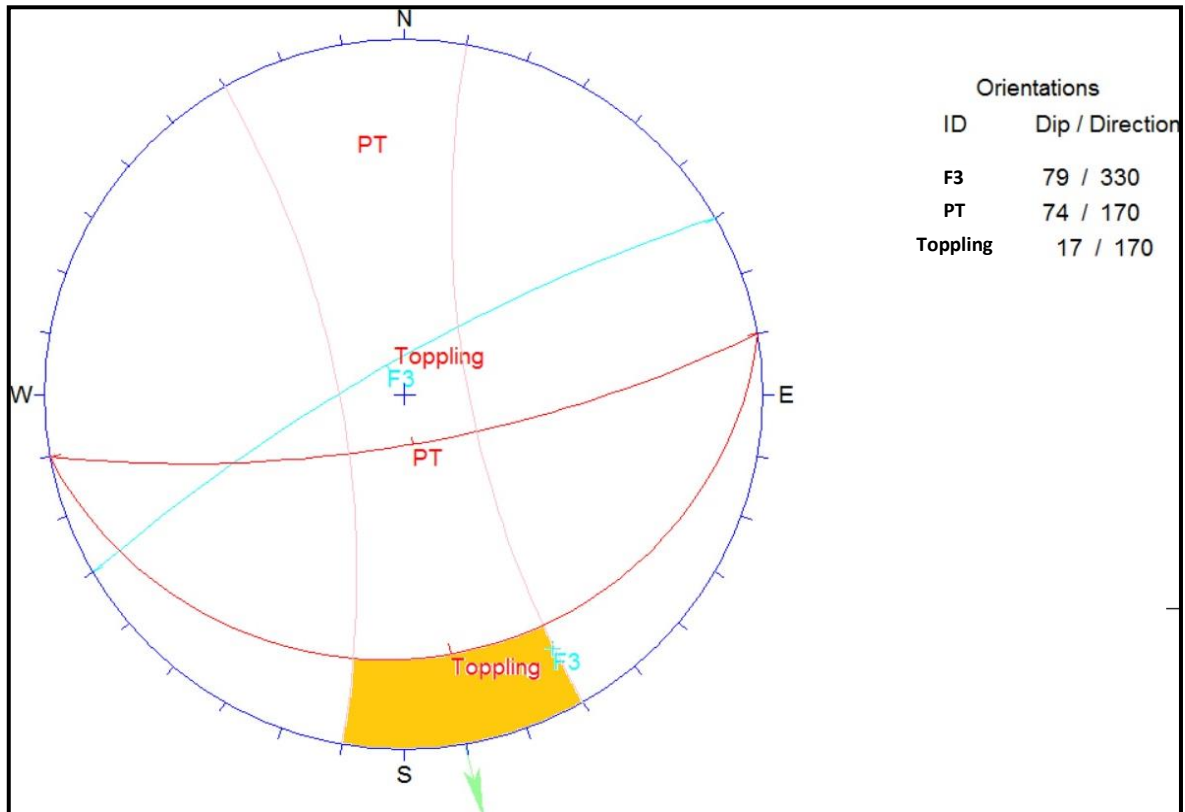
c) Mecanismo de falla por vuelco

Por último se tiene el mecanismo por vuelco, para determinar la posibilidad de que se desarrolle este mecanismo el polo de la discontinuidad que provoque el vuelco debe caer dentro de área sombreada formada por los círculos menores en un intervalo de $\pm 20^\circ$ a partir de la dirección del talud y el ángulo de fricción medido a partir de éste.

Para ejemplificar este proceso se tomó la estación 20A (única para este mecanismo), la cual consiste en un macizo de roca anfibolita con grado de meteorización III, para el cual se tiene un ángulo de fricción de 57° y la discontinuidad que puede formar el vuelco, consiste en una familia de juntas cuya dirección preferencial es F3: $79^\circ/N330$.

Como se mencionó anteriormente, se debe establecer un intervalo de $\pm 20^\circ$ a partir de la dirección del talud, luego se deben trazar los círculos menores de la ciclográfica correspondientes a este intervalo. En la figura 40 se observa que el polo de la familia de juntas cae dentro del área sombreada, por lo tanto se establece que existe una posibilidad de que se desarrolle el mecanismo por vuelco.

FIGURA 40
DETERMINACIÓN DEL PLANO SOBRE EL CUAL SE DESARROLLA EL
DESLIZAMIENTO EN EL CASO DE ROTURA EN VUELCO



Fuente: Investigación de campo. 2017.

Como ya fue mencionado, la estación 20A, fue la única que presentó este tipo de rotura por lo que las demás son descartadas.

3.4.7 Análisis de estabilidad de los mecanismos de rotura

Para analizar la estabilidad de los mecanismo de falla encontrados en los macizos rocosos, se utilizó el factor de seguridad, el cual indica que si $FS > 1$ es estable y si $FS < 1$ será inestable. En este caso se determinó el factor de seguridad para cada uno de los mecanismos de falla descritos anteriormente.

a. Mecanismo planar

En el mecanismo planar, se tomaron los datos de la estación 4F como ejemplo. Para la determinación del factor de seguridad en este mecanismo, se tienen una relación entre el ángulo de fricción y el buzamiento de la discontinuidad. En este caso se tienen los siguientes datos: ángulo de fricción (ϕ) = 57° y buzamiento de la discontinuidad (α) = 35° , por lo tanto el factor de seguridad queda definido de la siguiente forma:

$$FS = \frac{\text{Tang } \phi}{\text{Tang } \alpha} = \frac{\text{Tang } 57}{\text{Tang } 35} = \frac{0,4847}{0,4738} = 1,022$$

Como el factor de seguridad obtenido es mayor a 1, se establece que el mecanismo planar que ocurre por el plano de falla F3: 35/020, es estable. Ante lo explicado anteriormente en la tabla 31 se dan los valores de factor de seguridad obtenidos para cada una de las estaciones que presentaron mecanismo de rotura planar.

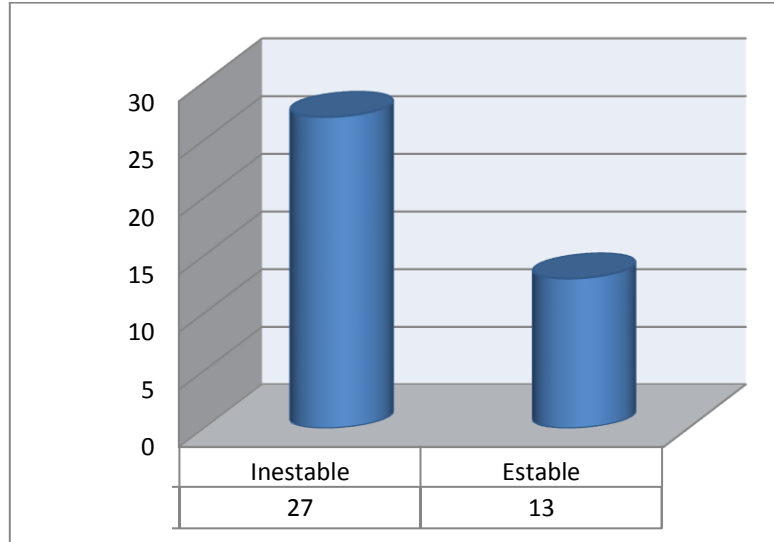
TABLA 31
FACTOR DE SEGURIDAD PARA LAS ESTACIONES QUE PRESENTARON
MECANISMO DE ROTURA PLANAR

Est.	Sub- Est.	Discontinuidad		PR. / Estabilidad	F.S.	Est.	Sub- Est.	Discontinuidad		PR. / Estabilidad	F.S.
		Familia	Dip/Dir					Familia	Dip/Dir		
2	2A	J3	32/152	SI / Inestable	0,733	6	6c	F1	77/173	SI / Inestable	0,015
2	2C	J1	34/153	SI / Inestable	0,777	8	8A	J2	57/361	SI / Estable	1
3	3A	J1	75/250	SI / Estable	1,15	8	8D	J2	55/360	SI / Inestable	0,010
3	3B	J2	73/255	SI / Inestable	0,527	9	9A	F1	54/301	SI / Inestable	0,719
3	3C	S1	46/256	SI / Inestable	0,232	9	9B	F1	62/291	SI / Inestable	0,441
4	4A	J1	46/211	SI / Inestable	0,232	9	9B	F2	47/289	SI / Estable	3,892
4	4B	J2	45/215	SI / Inestable	0,299	11	11A	J1	76/035	SI / Inestable	0,705
4	4D	J3	40/209	SI / Inestable	0,433	11	11B	J1	75/033	SI / Estable	1,152
4	4E	F1	42/178	SI / Inestable	0,211	11	11C	J2	70/035	SI / Inestable	0,396
4	4F	J1	35/225	SI / Estable	1,022	12	12A	J1	31/350	SI / Estable	1,097
13	13B	F3	65/020	SI / Inestable	0,714	19	19A	F1	45/155	SI / Inestable	0,299
14	14A	F1	42/218	SI / Inestable	0,211	19	19A	F2	85/120	SI / Estable	2,709
14	14A	F3	46/235	SI / Inestable	0,232	19	19A	J1	66/112	SI / Estable	18,248
14	14A	J3	74/194	SI / Inestable	0,084	19	19B	F2	68/123	SI / Inestable	0,237
14	14B	J3	75/196	SI / Estable	1,152	19	19B	J1	65/113	SI / Inestable	0,329
16	16B	J1	70/262	SI / Inestable	0,396	20	20A	F4	23/175	SI / Inestable	0,305
16	16C	J1	69/260	SI / Estable	4,194	20	20A	J3	18/172	SI / Inestable	0,426
17	17A	J2	22/184	SI / Estable	54,75	20	20C	F2	39/155	SI / Inestable	0,134
17	17B	J2	22/181	SI / Estable	54,75	20	20C	J2	20/170	SI / Inestable	0,216
17	17C	F1	54/215	SI / Inestable	0,719						
17	17C	J2	21/188	SI / Inestable	0,317						

Fuente: Investigación de campo. 2017.

Mediante el análisis de las estaciones se determinó que la mayoría de las estaciones tenían una tendencia inestable, tendencia que se observa de mejor manera en el gráfico de la figura 41.

FIGURA 41
GRÁFICO DE LA TENDENCIA DE ESTABILIDAD DE LOS TALUDES



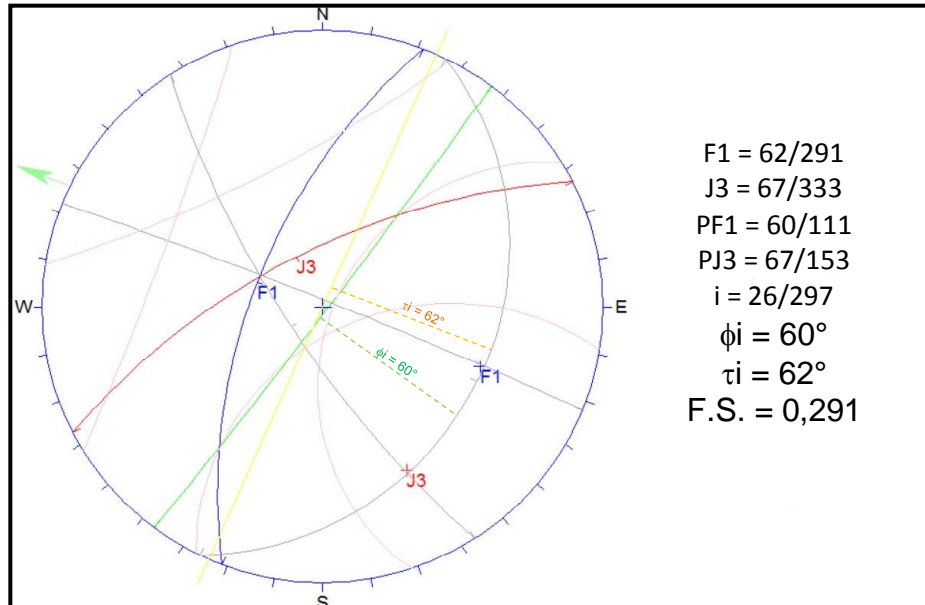
Fuente: Investigación de campo. 2017.

b. Mecanismo de cuña

En el caso del mecanismo de falla por cuña, se deben considerar los planos y polos de las discontinuidades que forman la cuña. Para esto se tomó como ejemplo los datos obtenidos de la estación 9B, los cuales se muestran en la figura 61. Para la determinación del factor de seguridad de este mecanismo, se determinan los valores de ϕ_i y τ_i , mediante proyecciones estereográficas. El proceso se describe a continuación:

Se trazan los planos y sus respectivos polos, alrededor de estos últimos se traza el cono de fricción correspondiente al material, después se hacen coincidir los polos con el punto de intersección de los planos, mediante los círculos mayores de la ciclográfica; también se hacen coincidir cada uno de los polos entre sí de igual forma. Por último se toman los valores correspondientes de ϕ_i y τ_i , en la figura 42 se ejemplifica el procedimiento descrito.

FIGURA 42
DETERMINACIÓN DEL FACTOR DE SEGURIDAD PARA CUÑAS



Fuente: Investigación de campo. 2017.

Teniendo en cuenta los datos obtenidos y mostrados en la figura anterior, se establece el factor de seguridad de la siguiente forma:

$$FS = \frac{\text{Tang } \phi_i}{\text{Tang } \tau_i} = \frac{\text{Tang } 60}{\text{Tang } 62} = \frac{0,32}{1,097} = 0,291$$

Como se observa, el valor de factor de seguridad es menor a 1, por lo cual se establece que el mecanismo de rotura es inestable, así mismo en la tabla 32 se dan los valores de factor de seguridad obtenidos para cada una de las estaciones que presentaron mecanismo de rotura por cuña.

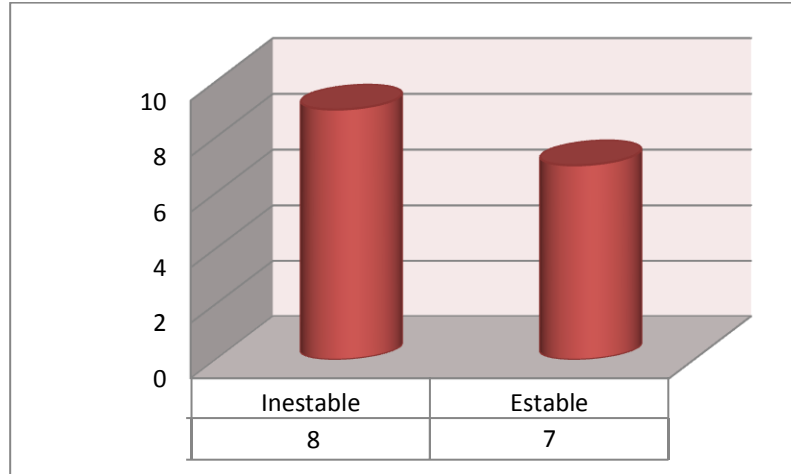
TABLA 32
FACTOR DE SEGURIDAD PARA LAS ESTACIONES QUE PRESENTARON
MECANISMO DE ROTURA EN CUÑA

Est.	Sub-Est.	Discontinuidad				Intersección i	P.R. / Estabilidad	F.S.
		Familia	Dip/Dir	Familia	Dip/Dir			
2	2A	J1	88°/N190	J2	85°/N043	11°/N106	SI / Estable	4,025
2	2B	J1	85°/N044	F2	72°/N009	21°/N325	SI / Inestable	0,733
2	2B	J1	85°/N044	J2	86°/N192	15°/N111	SI / Inestable	0,882
4	4A	F1	73°/N110	J3	85°/N043	17°/N113	SI / Inestable	1,847
5	5A	F1	71°/N062	J2	82°/N335	20°/N041	SI / Estable	9,498
8	8A	J1	80°/N042	J2	57°/N316	32°/N327	SI / Estable	2,264
9	9B	F1	62°/N219	J3	67°/N333	26°/N297	SI / Inestable	0,291
9	9C	F1	85°/N225	J3	65°/N330	27°/N308	SI / Estable	1,339
14	14A	J1	83°/N297	J3	74°/N194	17°/N230	SI / Inestable	0,021
14	14A	J2	68°/N104	J3	74°/N194	26°/N138	SI / Inestable	0,072
14	14B	J1	85°/N294	J3	75°/N195	15°/N217	SI / Inestable	0,028
14	14B	J2	69°/N110	J3	75°/N195	25°/N140	SI / Estable	2,546
19	19B	F2	68°/N123	J1	65°/N113	28°/N080	SI / Estable	18,91
20	20A	F2	61°/N309	J1	58°/N010	33°/N344	SI / inestable	0,184
20	20B	F1	64°/N030	J1	70°/N291	32°/N348	SI / Inestable	0,251

Fuente: Investigación de campo. 2017.

Mediante el análisis de las estaciones se determinó que las estaciones tenían una ligera tendencia inestable, tendencia que se observa de mejor manera en el gráfico de la figura 43.

FIGURA 43
GRÁFICO DE LA TENDENCIA DE ESTABILIDAD DE LOS TALUDES



Fuente: Investigación de campo. 2017.

c. Mecanismo por vuelco

Por último se tiene el mecanismo por vuelco, para este tipo de mecanismo se toma en cuenta la geometría de los bloques deslizantes. Este bloque se forma por la discontinuidad que provoca el vuelco y otra discontinuidad con dirección contraria a la del vuelco, para así tener un plano de deslizamiento.

Para determinar el factor de seguridad se debe tomar el ancho (t), la altura (h) del bloque y el ángulo de buzamiento del plano deslizante (β). Para ejemplificar este caso se tienen los datos de la estación 20A, para lo cual el factor de seguridad se determina mediante la siguiente relación:

$$FS = \frac{\left(\frac{t}{h}\right)}{\text{Tang } \beta} = \frac{9\text{m}/12\text{m}}{\text{Tang } 79} = \frac{0,75}{0,495} = 1,513$$

Mediante el valor obtenido en la relación se tiene un valor mayor a 1 por lo tanto se establece que el mecanismo de falla es estable, cabe mencionar que es la estación 20A es la única que presenta este mecanismo de rotura.

3.4.8 Ensayos de corte directo (ASTM D 3080-04)

Tal como se describe de manera más extensa en el capítulo 2 la finalidad de este ensayo es obtener determinados parámetros del suelo, como la cohesión, y así mismo la relación esfuerzo-deformación, a través de la determinación del esfuerzo cortante. Si bien es un ensayo complejo el conocimiento del ángulo de fricción interna de una muestra de suelo inalterada permite determinar el ángulo al cual puede ser cortado un talud, considerando que el mismo presente el menor grado de inestabilidad posible. En la tabla 33 se tiene la localización de los puntos muestreados para la realización de este ensayo.

TABLA 33
UBICACIÓN DE LAS MUESTRAS DE SUELO INALTERADAS EXTRAÍDAS
PARA LA REALIZACIÓN DE ENSAYO DE CORTE DIRECTO

Muestra	Ubicación		Tipo de Suelo	Familia de suelo
	X	Y		
1	792094	1638345	Limo arcilloso color café	Suelos Chuarrancho
2	793761	1637806	Limo arenoso color café	Suelos Mongoy

Fuente: Investigación de campo. 2017.

FOTOGRAFÍA 18
TALUD UTILIZADO PARA LA EXTRACCIÓN DE MUESTRA DE SUELO
INALTERADO UTM: 793761E, 1637806N



Tomada por: Bermudez J. 2017.

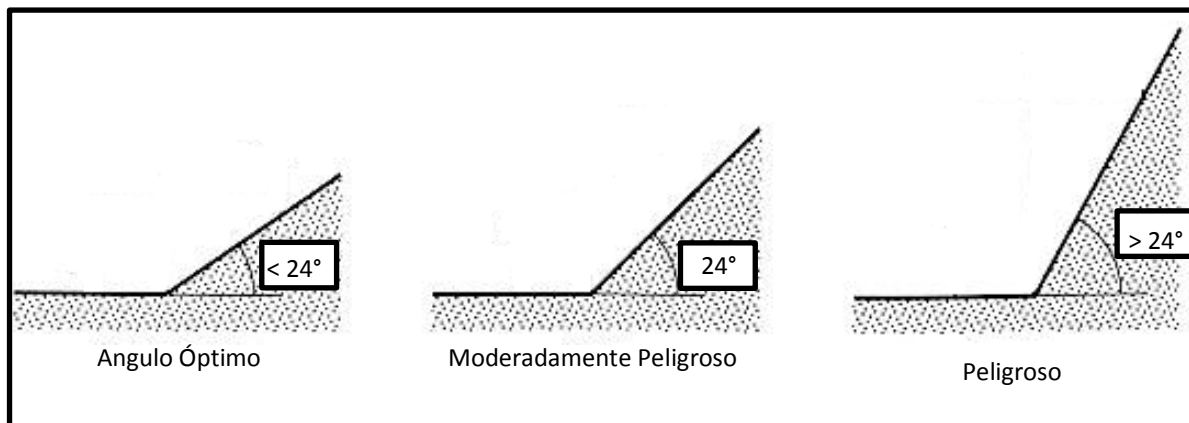
Los ensayos de corte directo de las muestras de suelos extraídas en el área de estudio, fueron realizados en el CII, de la Universidad de San Carlos de Guatemala, ensayos que posteriormente arrojaron los siguientes resultados:

Para la muestra uno se obtuvo que es un suelo limo-arcilloso, de color café, cuya cohesión aparente $C_u = 5,85 \text{ Ton/m}^2$, y presenta un ángulo de fricción interna $\phi = 24,35^\circ$. De igual manera que la muestra anterior en el anexo 7 se tiene la cartilla entregada por el CII respecto a esta muestra, en donde se detalla la relación entre el esfuerzo de corte y el esfuerzo normal:

$$\frac{\tau}{\sigma}$$

Mediante los datos obtenidos en la figura 44 se tiene el esquema idealizado para la realización del corte de talud para el suelo muestreado, basado en el ángulo de fricción interno obtenido por los ensayos de corte directo.

FIGURA 44
MODELO IDEAL DE TALUDES Y CORTES DE CARRETERA, PARA LA MUESTRA 1



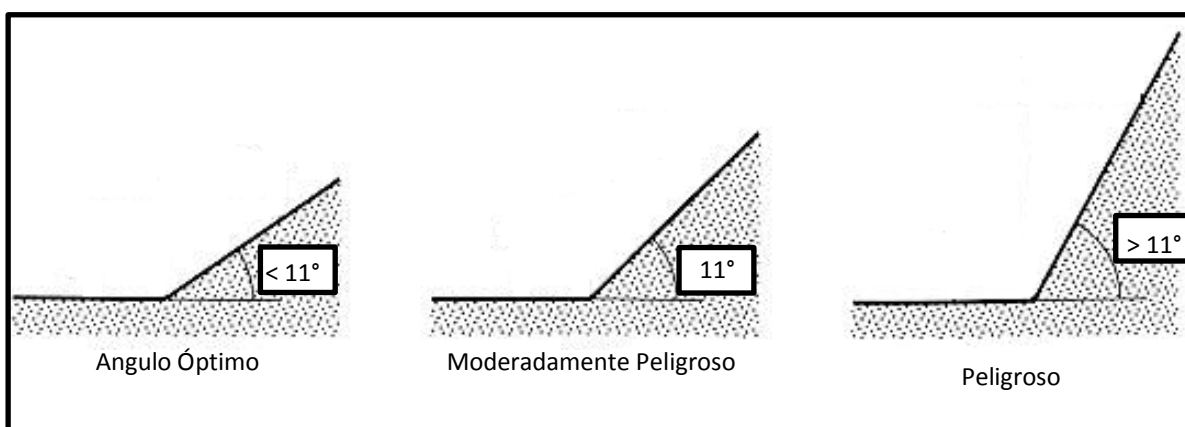
Fuente: Investigación de campo. 2017.

Para la muestra dos se obtuvo que es un suelo limo-arenoso, de color café, cuya cohesión aparente $C_u = 9,78 \text{ Ton/m}^2$, y presenta un ángulo de

fricción interna $\phi = 11,31^\circ$. Así mismo en el anexo 8 se tiene la cartilla entregada por el CII respecto a esta muestra, en donde se detalla la relación entre el esfuerzo de corte y el esfuerzo normal: $\frac{\tau}{\sigma}$

Mediante los datos obtenidos en la figura 45 se tiene el esquema idealizado para la realización del corte de talud para el suelo muestreado.

FIGURA 45
MODELO IDEAL DE TALUDES Y CORTES DE CARRETERA, PARA LA MUESTRA 2



Fuente: Investigación de campo. 2017.

3.4.9 Macizos rocosos inconsistentes

Geotécnicamente esos macizos están conformados en su totalidad por roca desintegrada y sin ningún rasgo estructural definido (fotografía 19), en su mayoría es suelo. Estos macizos fueron definidos de la siguiente manera:

- Macizos con rocas inconsistentes y/o suelos con amenaza a movimientos de ladera.
- Zonas de ocurrencia de movimientos de ladera, en su mayoría deslizamientos traslacionales y rotacionales, derivados de suelos poco cohesivos que acarrear fragmentos de rocas.

- Zonas inestables generadas por la baja cohesión de suelo cuyo ángulo de corte excede al ángulo de fricción interna del suelo, generan constantes deslizamientos.
- Zonas de roca inconsistentes capturadas dentro de una matriz de suelo, sin rasgos estructurales definidos.

FOTOGRAFÍA 19
TALUD CONSTITUIDO POR MACIZOS ROCOSOS INCONSISTENTES
UTM: 793542E, 1637884N



Tomada por: Bermudez J. 2017.

3.4.10 Mecanismos de protección y sostenimiento

En el siguiente apartado se mencionan algunos mecanismos de corrección y estabilización para los taludes. Al tener en cuenta que los macizos rocosos ubicados sobre la carretera presentan mecanismos de rotura de tipo planar, cuña y existe un caso de vuelco, estos a su vez provocan caídas de rocas que afecta a lo largo del tramo carretero en estudio.

Para estos casos es de gran utilidad las medidas de protección superficial, las cuales están encaminadas a lo siguiente:

- Eliminar el problema de caída de rocas.
- Aumentar la seguridad de talud frente a las roturas superficiales.
- Evitar o reducir la erosión y la meteorización en el frente del talud.
- Evitar la entrada de agua de escorrentía.

Para proponer el tipo de mecanismo se tomó como base el valor *S.M.R.* obtenido en cada una de las estaciones evaluadas los cuales son contrastados con el criterio descrito en la tabla 34.

TABLA 34
CRITERIO DE CORRECCIÓN DE TALUDES SEGÚN EL VALOR *S.M.R.*

CALIFICACIÓN S.M.R.	Categoría	TIPO DE CORRECCIÓN
> 65	VI	Sin sostenimiento
51 - 65	V	Zanjas de pie de talud, vallas de pie de talud, redes sobre talud.
41 - 50	IV	Refuerzo con bulones o anclajes.
26 - 40	III	Hormigón (Gunita, hormigón de relleno, contrafuertes, vigas y muros de pie)
16 - 25	II	Drenaje, superficial y profundo
15 <	I	Re excavación, tendido de muros de contención.

Fuente: Gonzales de Vallejo, Luis I. *Ingeniería Geológica*. Madrid: PEARSON EDUCACIÓN, Editorial Prentice Hall, Universidad Complutense de Madrid, 2002.

Mediante el criterio propuesto por Vallejo, se contrastó con los valores de *S.M.R.* obtenidos, el cual dio como resultado los siguientes mecanismos correctivos para cada estación (tabla 35).

TABLA 35
MECANISMOS CORRECTIVOS PARA LAS ESTACIONES DE ESTUDIO

Est.	Sub-Est.	Coordenadas		Calidad Geot.	S.M.R. / Categoría	Mecanismo de Corrección
		x	y			
1	1A	798454	1636125	Buena	63 / V	Zanjas de pie de talud, vallas de pie de talud, redes sobre talud.
	1B			Normal	57 / V	Zanjas de pie de talud, vallas de pie de talud, redes sobre talud.
2	2A	797645	1636300	Mala	24 / II	Drenaje, superficial y profundo
	2B			Normal	60 / V	Zanjas de pie de talud, vallas de pie de talud, redes sobre talud.
	2C			Mala	31 / III	Hormigón (Gunita, hormigón de relleno, contrafuertes, vigas y muros de pie)
	2D			Normal	60 / V	Zanjas de pie de talud, vallas de pie de talud, redes sobre talud.
3	3A	797670	1636315	Mala	38 / III	Hormigón (Gunita, hormigón de relleno, contrafuertes, vigas y muros de pie)
	3B			Mala	23 / II	Drenaje, superficial y profundo
	3C			Muy mala	16 / II	Drenaje, superficial y profundo
4	4A	796693	1636678	Normal	42 / IV	Refuerzo con bulones o anclajes.
	4B			Mala	29 / III	Hormigón (Gunita, hormigón de relleno, contrafuertes, vigas y muros de pie)
	4C			Buena	64 / V	Zanjas de pie de talud, vallas de pie de talud, redes sobre talud.
	4D			Normal	49 / IV	Refuerzo con bulones o anclajes.
	4E			Mala	35 / IV	Hormigón (Gunita, hormigón de relleno, contrafuertes, vigas y muros de pie)
	4F			Mala	29 / IV	Hormigón (Gunita, hormigón de relleno, contrafuertes, vigas y muros de pie)
5	5A	796237	1637061	Normal	47 / IV	Refuerzo con bulones o anclajes.
	5B			Normal	49 / IV	Refuerzo con bulones o anclajes.
6	6A	795548	1637299	Normal	50 / IV	Refuerzo con bulones o anclajes.
	6B			Normal	52 / V	Zanjas de pie de talud, vallas de pie de talud, redes sobre talud.

Continúa...

...Viene

	6C			Normal	48 / IV	Refuerzo con bulones o anclajes.
7	7A	794133	1637585	Normal	43 / IV	Refuerzo con bulones o anclajes.
	7B			Normal	42 / IV	Refuerzo con bulones o anclajes.
8	8A	793930	1637582	Muy mala	17 / II	Drenaje, superficial y profundo
	8B			Buena	62 / V	Zanjas de pie de talud, vallas de pie de talud, redes sobre talud.
	8C			Normal	60 / V	Zanjas de pie de talud, vallas de pie de talud, redes sobre talud.
	8D			Muy mala	17 / II	Drenaje, superficial y profundo
9	9A	793658	1637834	Mala	39 / III	Hormigón (Gunita, hormigón de relleno, contrafuertes, vigas y muros de pie)
	9B			Muy mala	7 / I	Re excavación, tendido de muros de contención.
	9C			Normal	48 / IV	Refuerzo con bulones o anclajes.
10	10A	792911	1638034	Normal	46 / IV	Refuerzo con bulones o anclajes.
	10B			Normal	44 / IV	Refuerzo con bulones o anclajes.
11	11A	792627	1638147	Normal	54 / V	Zanjas de pie de talud, vallas de pie de talud, redes sobre talud.
	11B			Normal	55 / V	Zanjas de pie de talud, vallas de pie de talud, redes sobre talud.
	11C			Normal	54 / V	Zanjas de pie de talud, vallas de pie de talud, redes sobre talud.
12	12A	792307	1638311	Mala	34 / III	Hormigón (Gunita, hormigón de relleno, contrafuertes, vigas y muros de pie)
	12B			Buena	64 / V	Zanjas de pie de talud, vallas de pie de talud, redes sobre talud.
13	13A	791889	1638347	Normal	45 / IV	Refuerzo con bulones o anclajes.
	13B			Mala	24 / II	Drenaje, superficial y profundo
14	14A	791646	1638277	Muy mala	12 / I	Re excavación, tendido de muros de contención.
	14B			Normal	54 / V	Zanjas de pie de talud, vallas de pie de talud, redes sobre talud.
15	15A	791725	1637714	Normal	42 / IV	Refuerzo con bulones o anclajes.

Continúa...

...Viene

	15B			Normal	44 / IV	Refuerzo con bulones o anclajes.
16	16A	791948	1637420	Norma	41 / IV	Refuerzo con bulones o anclajes.
	16B			Mala	40 / III	Hormigón (Gunita, hormigón de relleno, contrafuertes, vigas y muros de pie)
	16C			Mala	40 / III	Hormigón (Gunita, hormigón de relleno, contrafuertes, vigas y muros de pie)
17	17A	792156	167274	Mala	33 / III	Hormigón (Gunita, hormigón de relleno, contrafuertes, vigas y muros de pie)
	17B			Mala	32 / III	Hormigón (Gunita, hormigón de relleno, contrafuertes, vigas y muros de pie)
	17C			Muy mala	14 / I	Re excavación, tendido de muros de contención.
18	18A	792333	1636645	Normal	42 / IV	Refuerzo con bulones o anclajes.
	18B			Normal	43 / IV	Refuerzo con bulones o anclajes.
	18C			Mala	40 / III	Hormigón (Gunita, hormigón de relleno, contrafuertes, vigas y muros de pie)
19	19A	791926	1636832	Normal	41 / IV	Refuerzo con bulones o anclajes.
	19B			Muy mala	3 / I	Re excavación, tendido de muros de contención.
20	20A	791457	1636578	Normal	42 / IV	Refuerzo con bulones o anclajes.
	20B			Buena	62 / V	Zanjas de pie de talud, vallas de pie de talud, redes sobre talud.
	20			Muy mala	9 / I	Re excavación, tendido de muros de contención.

Fuente: Investigación de campo. 2017.

Asimismo en el anexo 10 se tiene el mapa con los factores de corrección aplicable a cada una de las estaciones.

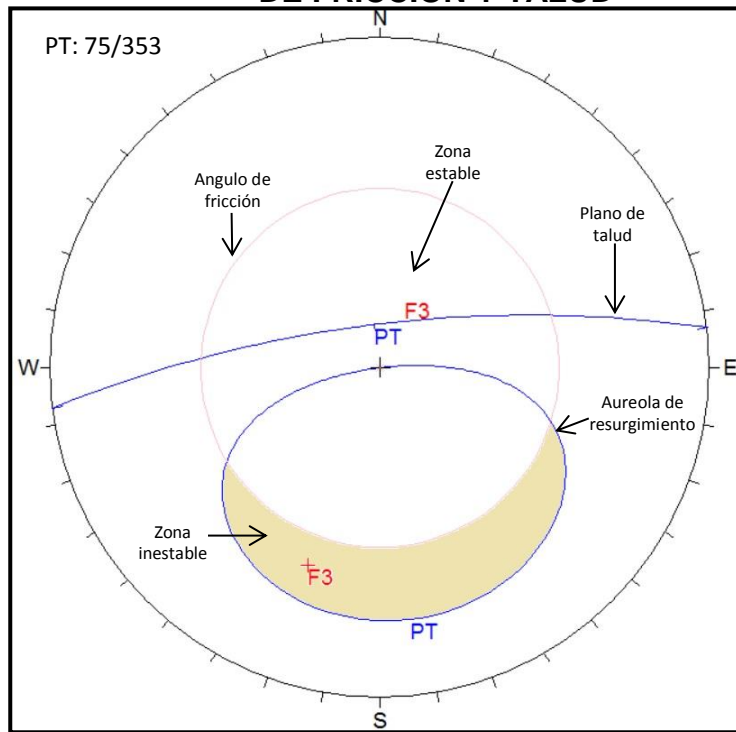
3.4.11 Corrección de talud

Para esto se tomaron los taludes que presentan roturas posibles e inestables, estos se muestran en la tabla 55. Para determinar el ángulo de corte se utilizaron diagramas estereográficos, en los cuales se usó el ángulo de fricción interno del material y el buzamiento del talud, todo esto con el fin de establecer un ángulo de inclinación que presente estabilidad ante las roturas y a la vez haga que no sea posible la ocurrencia de cada una de ellas.

La determinación del ángulo de corte del talud se llevó a cabo mediante la aureola de resurgimiento o círculo de falla. Este ángulo de corrección se presenta como sugerencia para futuros proyectos que sean desarrollados e impliquen el tratamiento de los taludes. El método consiste en trazar el círculo de fricción a partir del centro de la ciclográfica, después de esto se traza el círculo mayor correspondiente a la dirección del buzamiento del talud con su polo respectivo. Posterior a esto se traza una aureola que va desde el centro hasta el polo del talud.

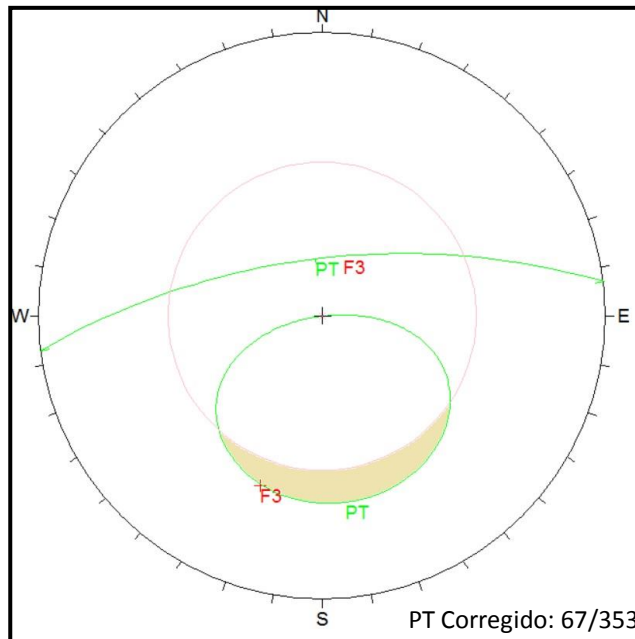
Para ejemplificar esto de mejor manera se utilizan los datos de la estación 13B, que es un macizo rocoso compuesto por anfibolita cuya dirección del plano de talud es $75^{\circ}/N353$. Este talud es afectado por el plano de falla 3: $65^{\circ}/N020$, lo cual genera una rotura planar. Para lograr estabilizar el talud por medio de la corrección se debe dejar fuera del área sombreada el polo de la discontinuidad del mecanismo de rotura. En este caso el talud no debe exceder de los 67° para que la rotura sea estable, con esto se recomienda un talud $67^{\circ}/N353$. Esto se ejemplifica de mejor manera en las figuras 46 y 47.

FIGURA 46
CICLOGRÁFICA CONTENIENDO LA AUREOLA DE RESURGIMIENTO, CONO DE FRICCIÓN Y TALUD



Fuente: Investigación de campo. 2017.

FIGURA 47
DIAGRAMA ESTEREOGRÁFICO DE LA CORRECCIÓN DEL TALUD



Fuente: Investigación de campo. 2017.

En el caso de las roturas en cuña, se toma como dato de análisis la dirección y buzamiento de la línea de intersección de los planos que forman esta rotura, tratándolos como roturas planares. Al considerar esta metodología, se realizó el mismo procedimiento con las demás estaciones que presentan roturas posibles e inestables, los resultados se resumen en la tabla 36. Los ángulos resultantes no deben ser excedidos al realizar los cortes del talud para optimizar la estabilidad de los mismos.

TABLA 36
CORRECCIÓN DE BUZAMIENTO DE TALUDES

Estación	Subestación	Talud		Corrección <i>DIP</i> (°)
		<i>DIP</i> (°)	<i>DIR</i> (N)	
2	2A	76	145	61°
2	2B	78	144	63°
2	2C	75	147	67°
3	3B	78	276	64°
3	3C	80	274	72°
4	4A	48	185	43°
4	4B	47	187	41°
4	4E	48	186	42°
6	6C	64	143	--
8	8D	75	315	67°
9	9A	48	297	40°
9	9B	47	294	42°
11	11A	53	040	45°
11	11C	52	042	48°
13	13B	75	353	67°
14	14A	68	215	57°
14	14B	64	214	55°
19	19A	81	130	74°
19	19B	82	132	77°
20	20A	74	170	63°
20	20B	75	174	66°
20	20C	77	171	67°

Fuente: Investigación de campo. 2017.

CONCLUSIONES

General

Basado en el sistema *R.M.R.* se determinó que los macizos rocosos estudiados presentaban mala y media calidad geotécnica. Evaluado mediante el sistema romano *S.R.M.* que establece que los macizos presentan una calidad geotécnica que va desde muy mala a normal. Mediante su categorización permitió definir medidas correctivas, que van desde la re excavación y tendido de muro para los macizos con muy mala calidad hasta la simple realización de zanjas o vallas de pie, para los macizos cuya calidad geotécnica fue buena o la creación de drenajes, refuerzos con hormigón o bulones, o la reducción de buzamiento de talud, fueron consideradas para mejorar la estabilidad de los taludes en el tramo carretero en estudio.

Específicas

- a) En base a la clasificación de Bieniawski se determinó que en la mayoría de los taludes, las discontinuidades presentaban una apertura media entre 1 mm a 5 mm, una ligera rugosidad, además de una continuidad que variaba entre 3 m a 10 m. Parámetros que totalizan un *R.M.R.* que oscila entre 27 a 50, dando una calidad geotécnica de mala a media. Parámetros que al ser evaluados mediante el sistema romano *S.M.R.* totalizan un dato promedio de 35, aunque para este sistema los macizos iban desde muy mala a buena calidad geotécnica.

- b) Mediante los ensayos de corte directo se determinó que la muestra 1 es un suelo de tipo limo arcillosos de color café, cuya cohesión es de $5,8 \text{ Ton/m}^2$ y tiene un ángulo de fricción interna de $\phi = 24,35^\circ$, mientras que la muestra 2 es un suelo de tipo limo arenoso de color café, el cual presenta una cohesión de $9,78 \text{ Ton/m}^2$ y un ángulo de fricción interna de $11,31^\circ$. Debido a estos parámetros y que los cortes de talud exceden el ángulo de fricción de los suelos y a su baja cohesión, es un factor determinante para que los taludes sean inestables en gran parte del tramo carretero en estudio.
- c) De las 56 estaciones geotécnicas evaluadas se definió que 22 generaban una posibilidad de rotura, determinado mediante el factor de seguridad cuyo valor es menor a 1. Basado en la interpretación y análisis cinemático se determinó que una de las medidas correctivas más factibles para estabilizar los taludes, es la reducción de su dirección de buzamiento, en un rango que oscila entre los 7° a 15° .
- d) Basado en la clasificación *S.M.R.* se determinó un rango de calidad geotécnica, que variaba entre muy mala a buena, para lo cual en estaciones cuya calidad es muy mala se propone la realización de una re excavación de los taludes, así mismo en las estaciones cuya calidad geotécnica es mejor se propone la realización de drenajes ya sea superficiales y/o profundos, o bien reforzar los taludes mediante la aplicación de hormigón complementado con contrafuertes y vigas. Para las estaciones con mucha mejor calidad geotécnica bastaría con la simple implementación de bulones o vallas a pie de talud para su estabilización.
- e) Se delimitaron un total de 6 unidades litológicas de las cuales 4 tienen relación con el tramo carretero en estudio, fueron estas la Unidad de Anfibolita, que es la que más predomina en el área de estudio, la Unidad de Basalto, la Unidad de Ceniza la cual solo por sus características físicas

genera riesgos en el tramo carretero y por último la Unidad de Aluvión la cual mediante su relación con las redes fluviales genera condiciones hidrológicas que aceleran la meteorización y deterioro de los taludes de carretera, así mismo se delimitaron las Unidades de Coluvión y Filita. Se delimitaron estructuras geológicas que afectan a los taludes del área de estudio, tales como fallas, foliación y fracturas los cuales infieren en la calidad geotécnica de los taludes debido a la acción de corte que provocan roturas a lo largo del tramo carretero.

RECOMENDACIONES

- a) Considerar las zonas críticas identificadas sobre el tramo carretero, para la ejecución pronta de las medidas correctivas sugeridas, con la finalidad de evitar exponer a riesgos a los transeúntes.
- b) Identificar los taludes sobre la carretera que estén constituidos por suelos, para generar el corte de talud óptimo propuesto en el documento.
- c) Reducir la dirección de buzamiento de los taludes definidos como inestables, en un rango de 7° a 15°, como medida correctiva en los cortes de carretera que presentan deficiencias generadas por roturas.
- d) Realizar una zonificación bajo determinados criterios, de los macizos rocosos inconsistentes, con la finalidad de sectorizar las áreas más propensas a movimientos de ladera.
- e) Determinar las características geotécnicas de los cortes de carretera constituidos por pómez, pues este tipo de roca tiene condiciones especiales para la realización de taludes sobre el mismo.

BIBLIOGRAFÍA

- Armas Zagoya, Juan Miguel. *Cartografía geológica estructural del valle de Huizachal, como base para el análisis de estabilidad de taludes de la carretera Rumbo Nuevo, Tamaulipas. México.* Universidad Autónoma de Nuevo León. Nuevo León, México: Facultad de Ciencias de la Tierra, 2004.
- Bongiorno, Francisco. Et. Al. *Clasificaciones geomecánicas de los macizos rocosos según Bieniawski, Barton, Romana, Hoek y Brown.* Universidad de los Andes. Chile: Facultad de Ingeniería. Escuela de Geología, 2012.
- Caal Caal, Cristian D. *Estudio Geotécnico de Macizos rocosos ubicados sobre la carretera AV- 29, San Antonio Senahú, Alta Verapaz, Guatemala.* Tesis Ingeniero Geólogo. Centro Universitario del Norte– Universidad de San Carlos de Guatemala. Cobán, Alta Verapaz, Guatemala: Carrera de Geología, 2014.
- Cosillo Pinto, Allan Giovani. *Consideraciones geológico- geotécnicas para el diseño de taludes en macizos rocosos.* Tesis Ingeniero Civil. Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala: Facultad de Ingeniería, 1999.
- Coy Figueroa, Marlon Joaquín. *Geología en El Progreso: Análisis litológico, estructural y geomorfológico en un área de 16 km² a escala 1:20 000 en alrededores de aldea Sinaca al Noreste de San Antonio la Paz.* Trabajo Final de Campo. Técnico en Geología. Centro Universitario del Norte– Universidad de San Carlos de Guatemala, Cobán, Alta Verapaz, Guatemala: Carrera de Geología, 2012.
- Giunta, G., Et Al. *Geología de las márgenes de la placa del Caribe: Generalidades en Guatemala, Costa Rica, La Española y resultados preliminares del análisis de una transversal en la cordillera de la costa de Venezuela.* Universidad de Palermo. Sicilia, Italia: Facultad de Ciencias de la Tierra, 2010.
- Harlow, George Et. Al. *High-pressure, metasomatic rocks along the Motagua Fault Zone, Guatemala.* Michigan University. United States Of America: Barnes, Wiley Interscience Publication, 1979.

Herra, J *Implementación de la técnica de Etapas Múltiples en el ensayo de corte directo*. 2006. <http://repositorio.sibdi.ucr.ac.cr:8080/jspui/bitstream/123456789/939/1/27847.pdf> (02 de junio de 2017).

Lawrence, David P *Petrology and Structural Geology of the Sanarate-EI Progreso Area, Guatemala*. State University of New York at Binghamton, United States of America. Faculty of Earth Sciences, 1975.

Pateman, JD *Ensayos de Resistencia a Compresión e Influencia del Curado*. 1978. ftp://ftp.unicauca.edu.co/Facultades/FIC/IngCivil/Especificaciones_Normas_INV-07/Normas/Norma%20INV%20E-323-07.pdf (31 de junio de 2017).

Romero, Jorge E. *Estudio de Geología aplicada para el tramo carretero Modesto Méndez- Raxruhá, Franja Transversal del Norte*. Guatemala: Solel Bonehftn, 2010



VºBº

Adán García Véliz

Licenciado en Pedagogía e Investigación Educativa
Bibliotecario

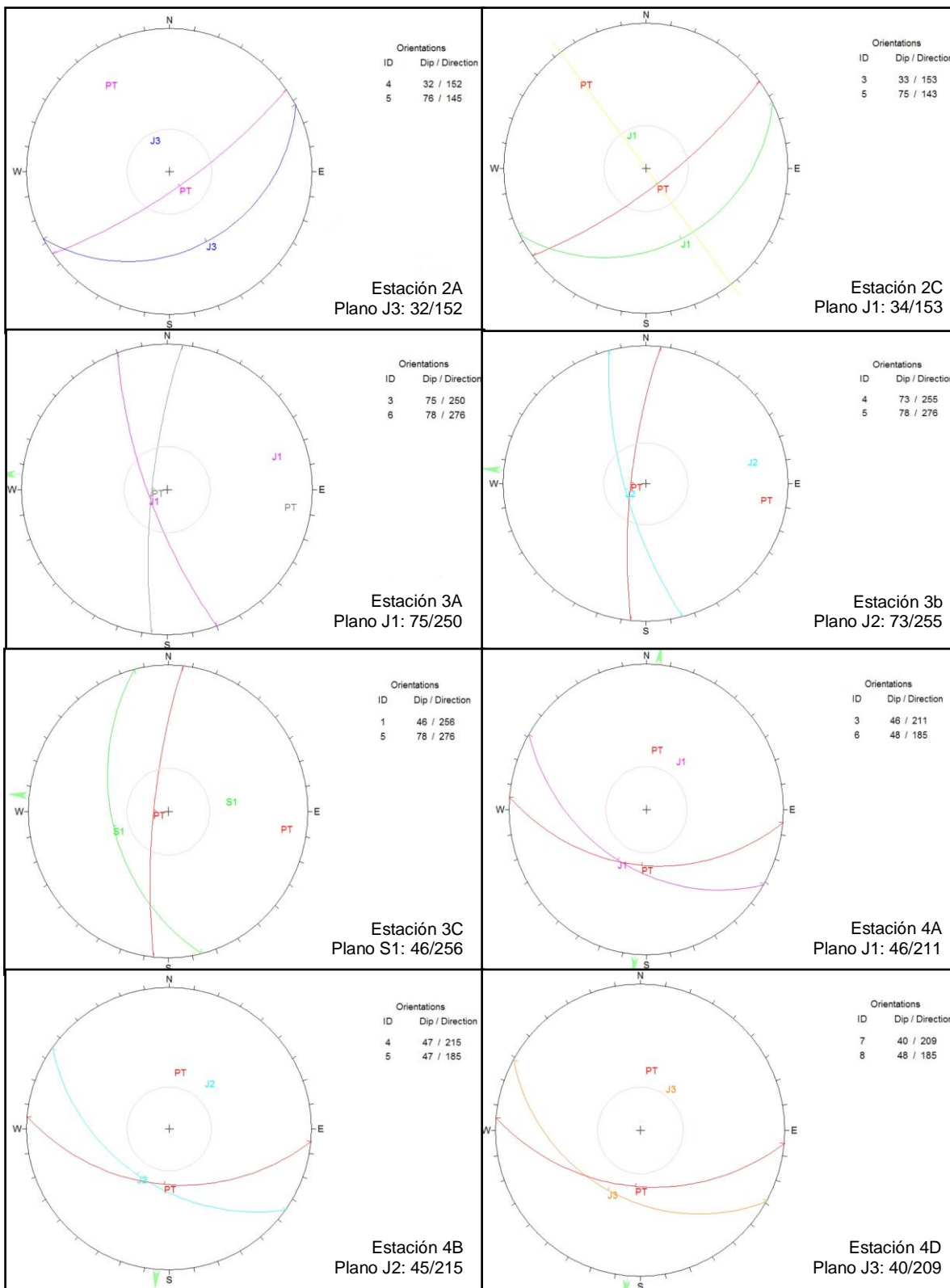
ANEXOS

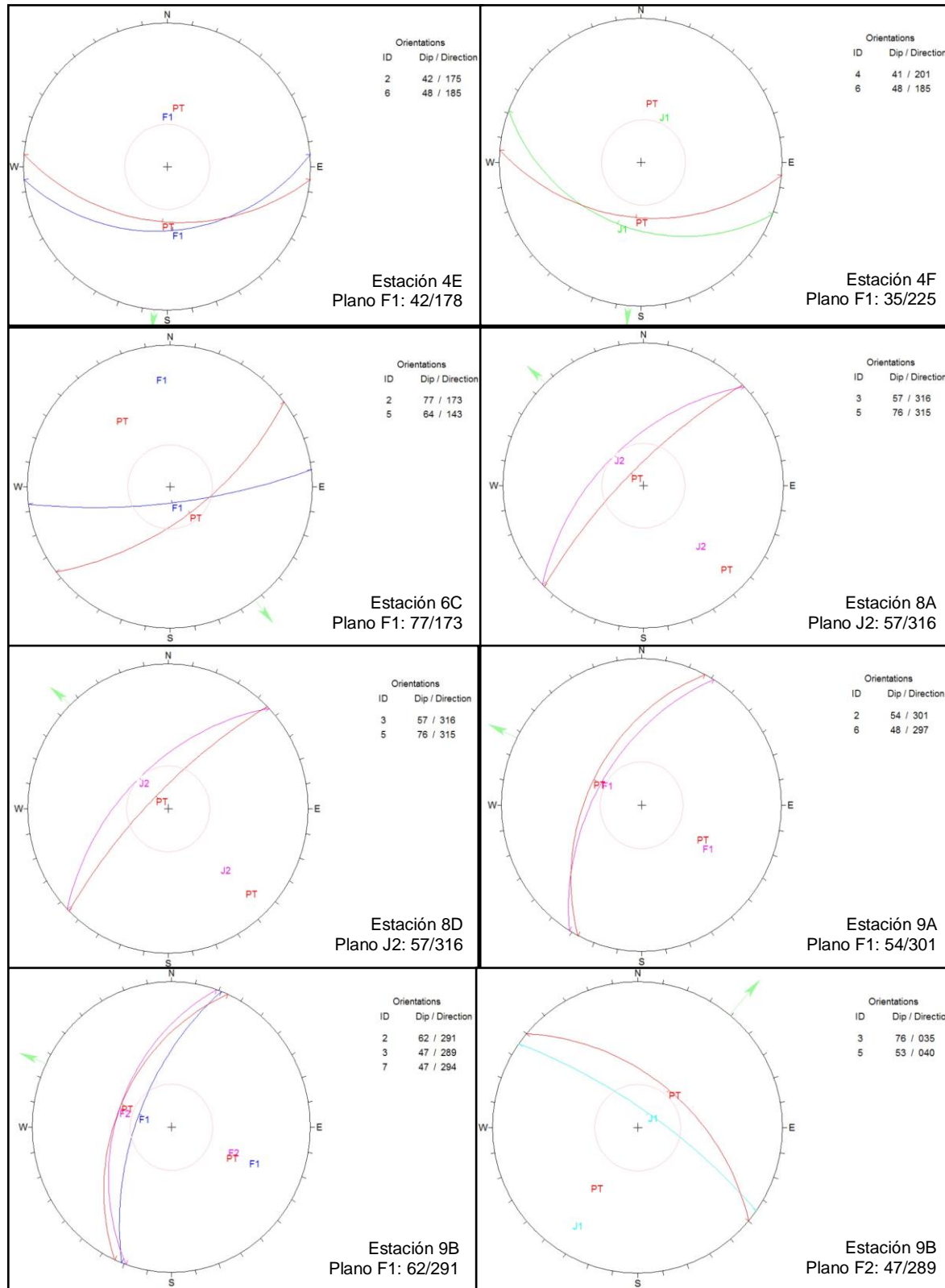
ANEXO II
ESCALA DE METEORIZACIÓN

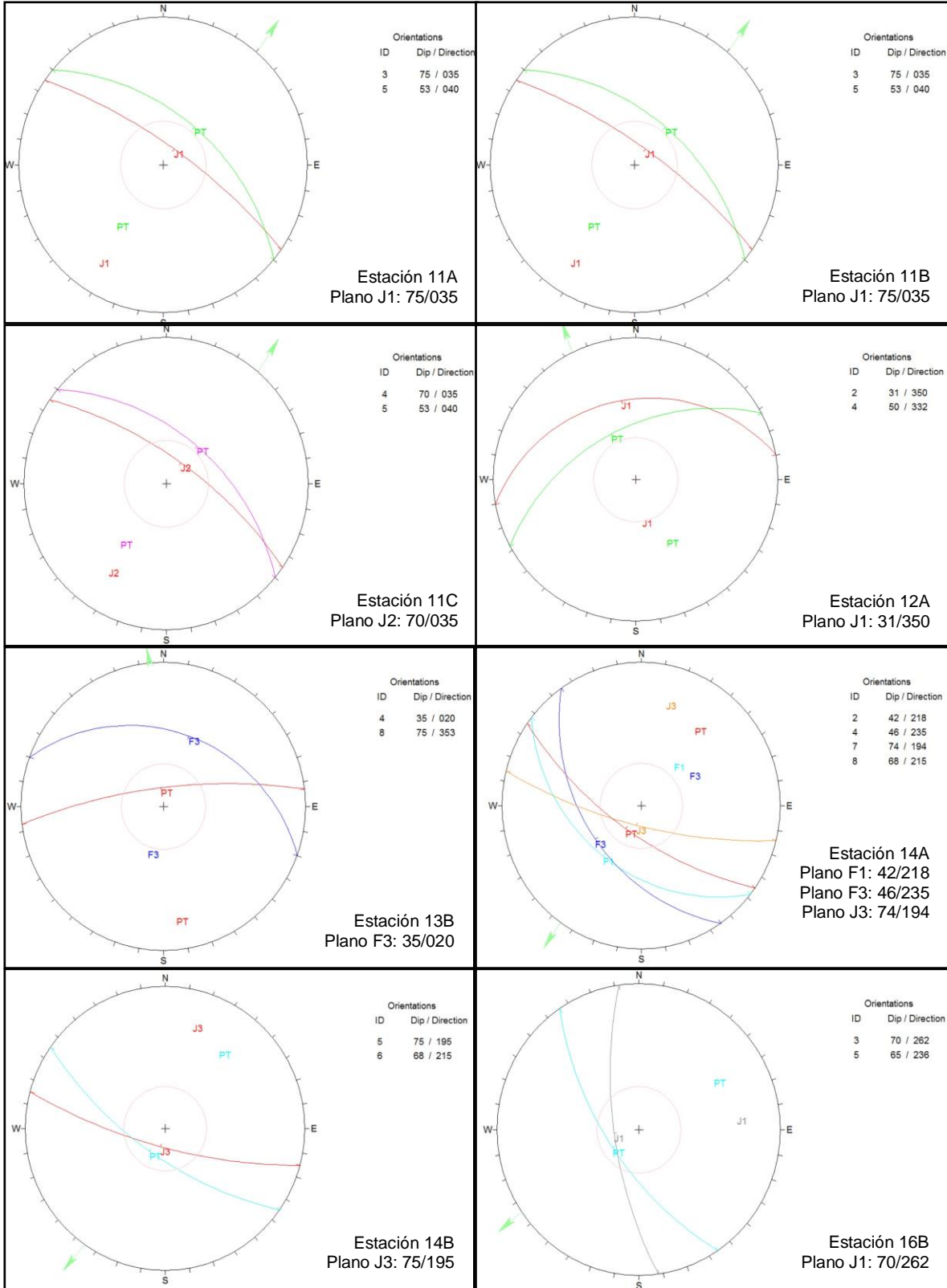
GRADO	DENOMINACIÓN	CRITERIOS
I	Roca sana o fresca	No presenta signos visibles de meteorización.
II	Roca ligeramente meteorizada	La roca y planos presenta signos de decoloración
III	Roca moderadamente meteorizado	La roca está decolorada en la pared, empieza a penetrar al interior.
IV	Roca meteorizada o muy meteorizada	Más de la mitad de material está descompuesto a suelo
V	Roca completamente meteorizada	Todo el material está descompuesto a suelo.
VI	Suelo residual	La roca es suelo y no se reconoce ninguna estructura. ni textura original

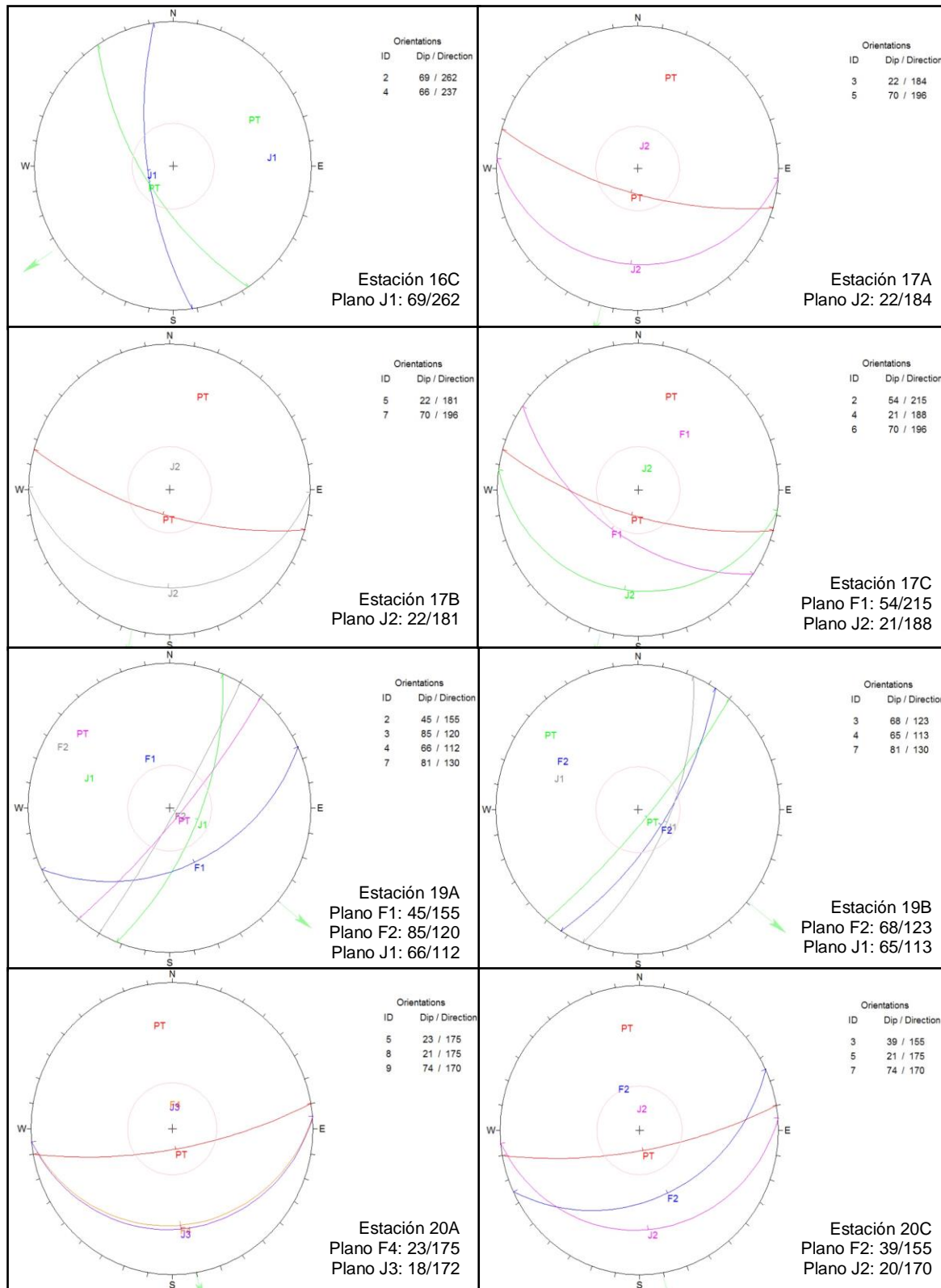
Fuente: Garces, Berenice. *“Propuesta Metodológica para el Desarrollo de la Cartografía Geomorfológica para la Zonificación Geomecánica”*, Bogotá, Colombia. Diciembre de 2004. Disponible en: <https://es.scribd.com/doc/105419689/cartilla-geomorfologia-INGEOMINAS> (19/07/2011).

ANEXO III GRÁFICO DE LAS ESTACIONES CON ROTURA PLANAR

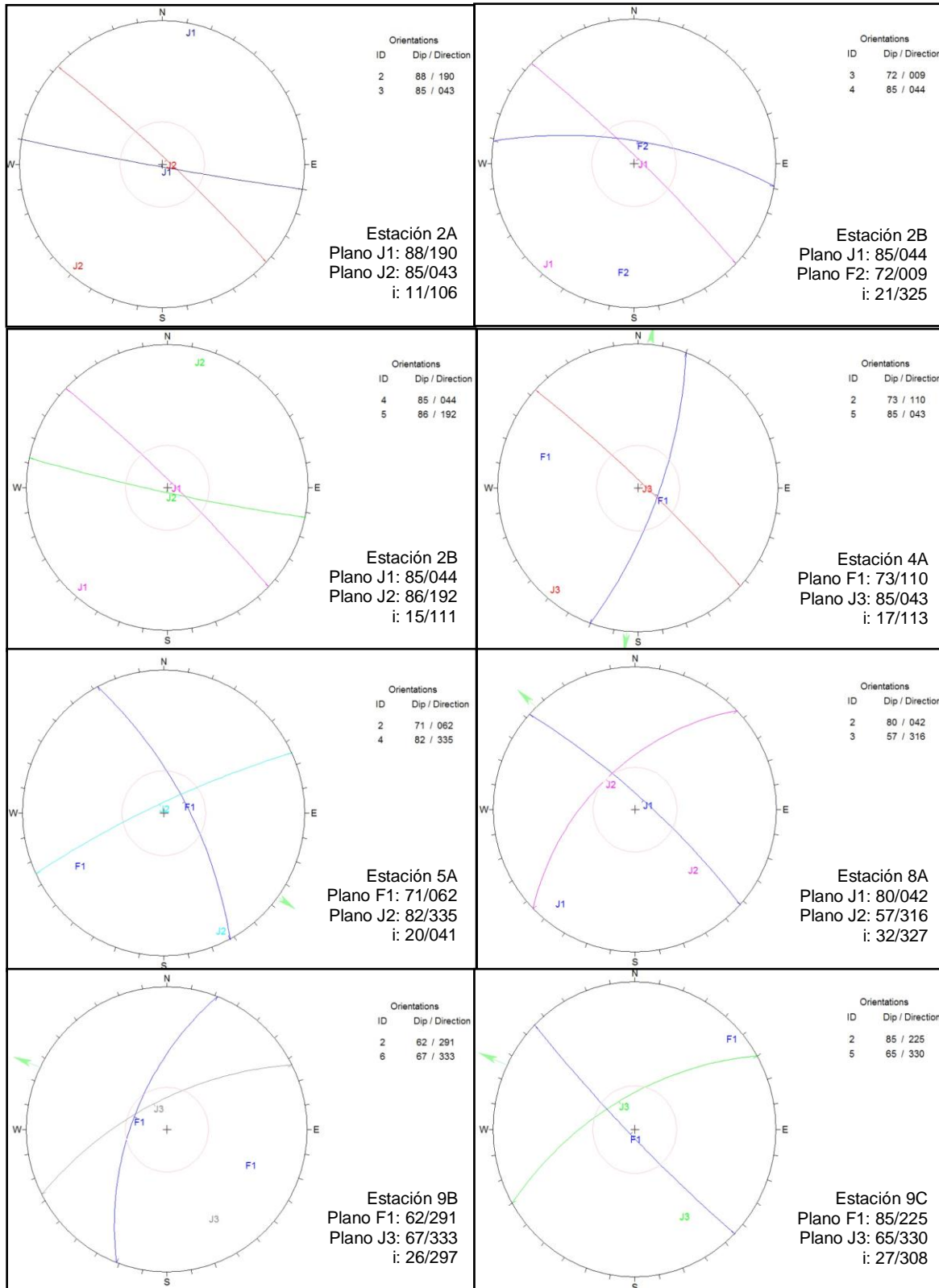


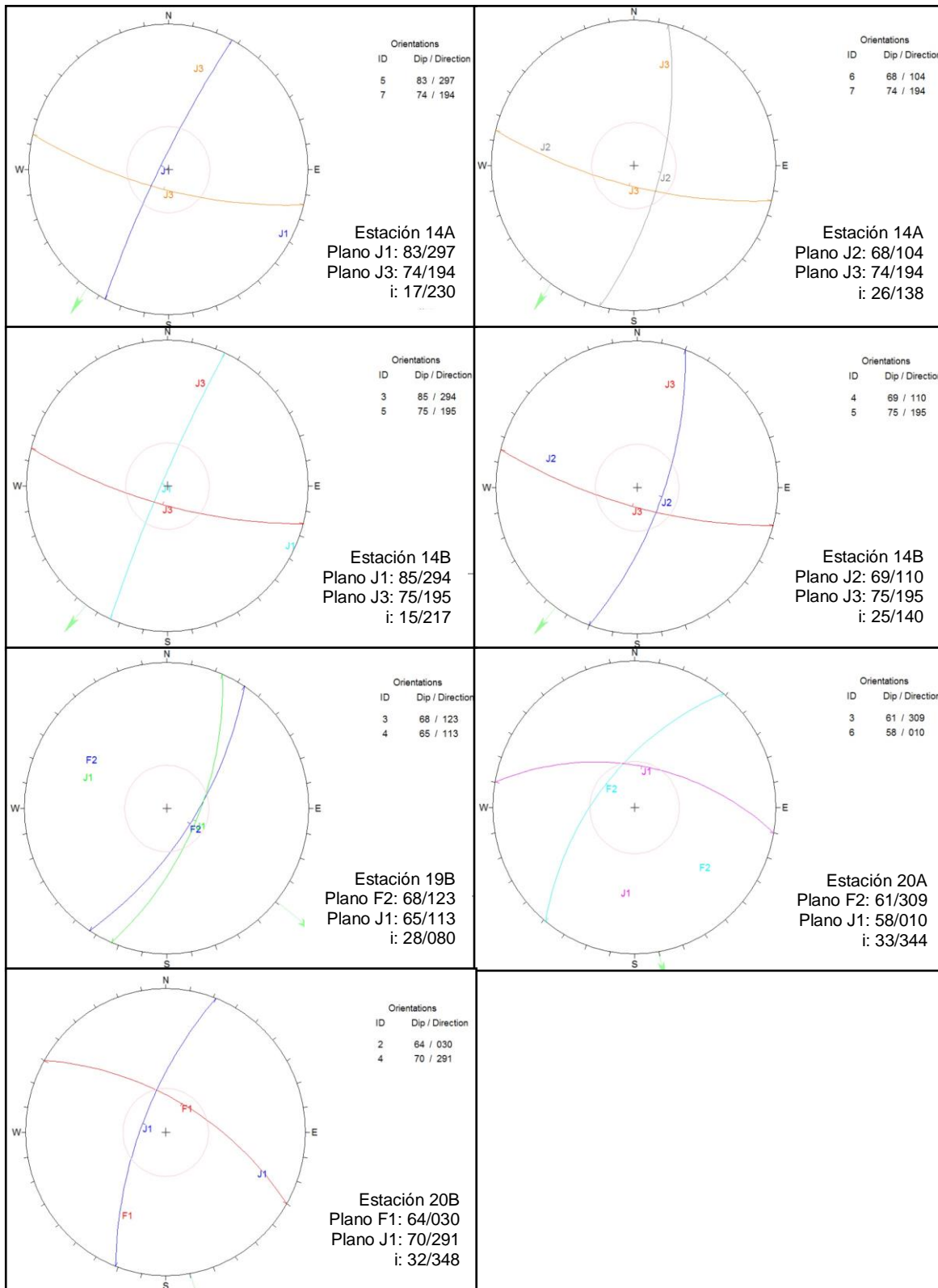




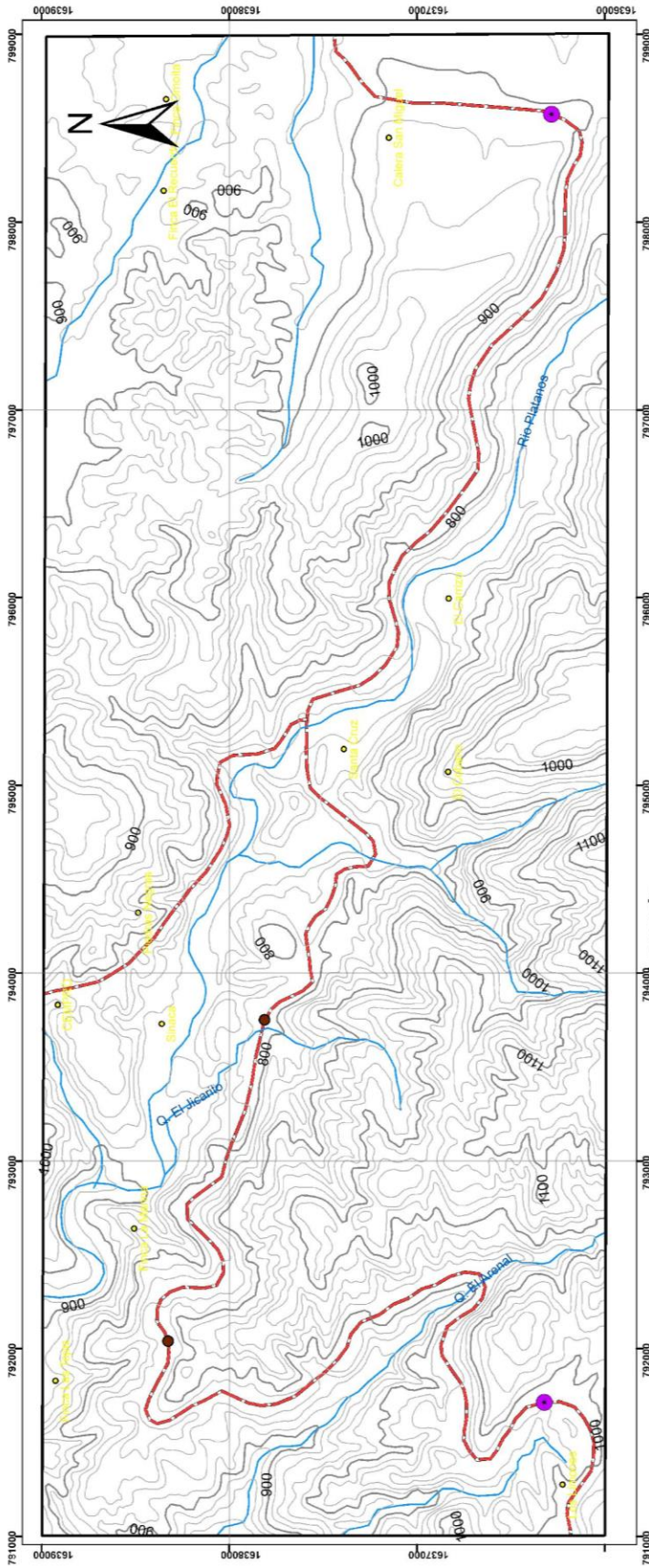


ANEXO IV GRÁFICO DE LAS ESTACIONES CON ROTURA EN CUÑA





ANEXO V MAPA DE UBICACIÓN DE MUESTRAS DE SUELOS




Leyenda

- Ubicación de Suelos
- Área
- Limite
- Curvas 100
- Curvas 20
- Rios
- Carretera
- Localidad


Muestra	Ubicación		Tipo de Suelo	Familia de Suelo
	X	Y		
1	792094	1638345	Limo Arcilloso Color Café	Suelos Chuarraicho
2	793761	1637806	Limo Arenoso Color Café	Suelos Mongoy

ANEXO VII

CARTILLA DE RESULTADOS PARA LA MUESTRA 1 DE SUELOS



CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



Informe No.: 183 S.S.

O.T.: 37,260

No. 11553

Interesado: José Estuardo Alvarado Bermudez

Proyecto: Tesis "Evaluación Geotécnica de los taludes del Corte de Carretera Ubicado del Km.39 al Km.51 de la Carretera al

Ubicación: Km.39 al Km.51 CA-9, del Municipio de Sanarate, El Progreso

Ensayo: CORTE DIRECTO

Norma: ASTM D 3080-04

Fecha: miércoles, 17 de mayo de 2017

Descripción del Suelo: Limo Arenoso Color Café

Tipo de Ensayo: No Consolidado, No Drenado

Tipo de Probeta: Tallada

Profundidad: x m

Pozo: 1

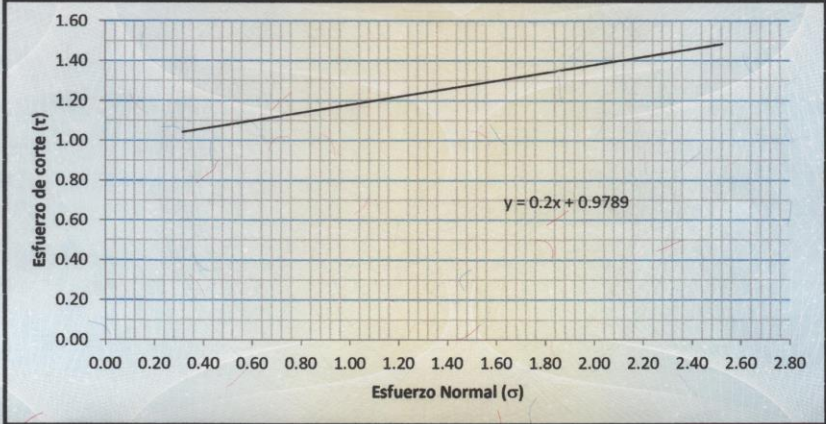
Muestra: 2

Diámetro Inicial: 6.35 cm

Área Inicial: 31.67 cm²

Altura Inicial: 2.54 cm

Volúmen Inicial: 80.44 cm³



Esfuerzo de corte (τ)

Esfuerzo Normal (σ)

PARAMETROS DE CORTE:

ANGULO DE FRICCIÓN INTERNA: $\phi = 11.31^\circ$	COHESIÓN APARENTE: $C_u = 9.78 \text{ Ton/m}^2$
--	---

PROBETA No.	1	2	3	4
ESFUERZO NORMAL (kg/cm ²)	0.32	0.63	1.26	2.53
ESFUERZO DE CORTE (kg/cm ²)	0.78	1.36	1.31	1.42
DENSIDAD SECA (T/m ³)	1.59	1.59	1.59	1.59
DENSIDAD HUMEDA (T/m ³)	1.74	1.74	1.74	1.74
HUMEDAD (%H)	9.30	9.30	9.30	9.30


OBSERVACIONES: Muestra proporcionada por el interesado.

Atentamente,

Vo. Bo.


Ing. Omar Enrique Medrano Méndez
 Jefe Sección Mecánica de Suelos

Ing. Francisco Javier Quiñonez de la Cruz
 DIRECTOR CII/USAC



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
 FACULTAD DE INGENIERIA
 CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
 SECCIÓN DE MECÁNICA DE SUELOS

FACULTAD DE INGENIERIA —USAC—
 Edificio T-5, Ciudad Universitaria zona 12
 Teléfono directo: 2418-9115, Planta: 2418-8000 Exts. 86209 y 86221 Fax: 2418-9121
 Página web: http://cii.usac.edu.gt



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
 CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
 DIRECCION GENERAL

ANEXO VIII CARTILLA DE RESULTADOS PARA LA MUESTRA 2 DE SUELOS



**CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**



Informe No.: 182 S.S.

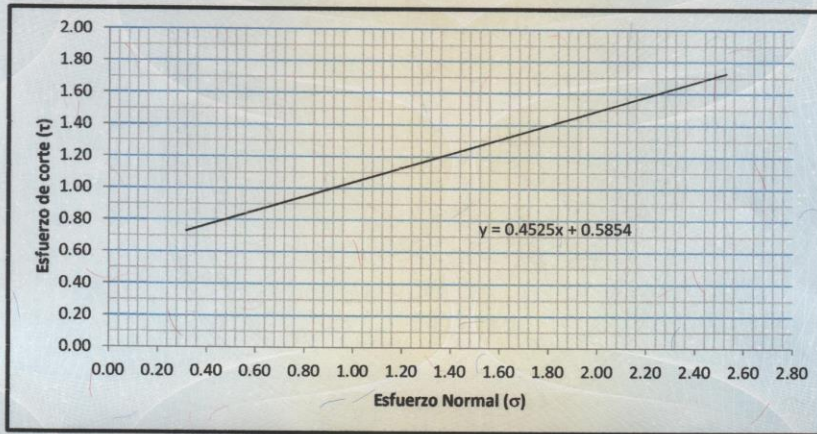
O.T.: 37,260

No. 11552

Interesado: José Estuardo Alvarado Bermudez
Proyecto: Tesis "Evaluación Geotécnica de los taludes del Corte de Carretera Ubicado del Km.39 al Km.51 de la Carretera al
Ubicación: Km.39 al Km.51 CA-9, del Municipio de Sanarate, El Progreso
Ensayo: CORTE DIRECTO
Norma: ASTM D 3080-04
Fecha: miércoles, 17 de mayo de 2017
Descripción del Suelo: Limo Arcilloso Color Café
Tipo de Ensayo: No Consolidado, No Drenado
Tipo de Probeta: Tallada

Pozo: 1
Muestra: 1

Profundidad: x m
Diámetro Inicial: 6.35 cm
Área Inicial: 31.67 cm²
Altura Inicial: 2.54 cm
Volúmen Inicial: 80.44 cm³



PARAMETROS DE CORTE:

ANGULO DE FRICCIÓN INTERNA: $\phi = 24.35^\circ$	COHESION APARENTE: $C_u = 5.85 \text{ Ton/m}^2$
--	---

PROBETA No.	1	2	3	4
ESFUERZO NORMAL (kg/cm ²)	0.32	0.63	1.26	2.53
ESFUERZO DE CORTE (kg/cm ²)	0.74	0.82	1.22	1.71
DENSIDAD SECA (T/m ³)	1.52	1.52	1.52	1.52
DENSIDAD HUMEDA (T/m ³)	1.76	1.76	1.76	1.76
HUMEDAD (%H)	15.98	15.98	15.98	15.98

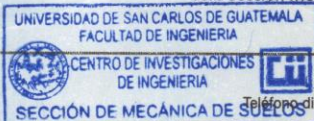
OBSERVACIONES: Muestra proporcionada por el interesado.

Atentamente,

Omar Enrique Medrano Méndez
 Ing. Omar Enrique Medrano Méndez
 Jefe Sección Mecánica de Suelos

Vo. Bo.

Francisco Javier Quiñonez de la Cruz
 Ing. Francisco Javier Quiñonez de la Cruz
 DIRECTOR CII/USAC



ANEXO IX CARTILLA DE RESULTADOS PARA LOS CUBOS DE ENSAYO A COMPRESIÓN SIMPLE



**CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**



INFORME DE ENSAYO A COMPRESIÓN DE CUBOS DE ROCA No. **11244**

O.T. No. **37259**

INFORME SACM - 196

HOJA 1/1

INTERESADO: José Estuardo Alvarado Bermudez.

PROYECTO: Tesis "Evaluación geotécnica de los taludes del corte de carretera ubicado del km. 39 al km. 51 de la Carretera al Atlántico CA-9, del municipio de Sanarate, El Progreso".

DIRECCIÓN: Ciudad.

RECEPCIÓN DE LA MUESTRA: 27 de abril de 2017

EMISIÓN DE INFORME: 28 de abril de 2017

RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

No. CUBO	FECHA DE RUPTURA	Área [cm ²]	Carga [Lb]	RESISTENCIA Mpa	RESISTENCIA lb/plg ²
1	28/04/2017	27,403	55 000	89,30	12 960
2	28/04/2017	29,205	62 000	94,40	13 700

OBSERVACIONES:

a) Muestra proporcionada por el interesado.

b) Muestras ensayadas en máquina de compresión RIEHLE Testing Machine División con capacidad de 300 000 libras, dial utilizado para lectura de carga: 300 000 libras.

ATENTAMENTE,



Inga. Dilma Yanet Mejicanos Jol
Jefa Sección de Agregados, Concreto y Morteros

Vo.Bo.



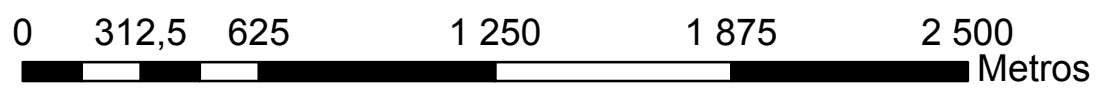
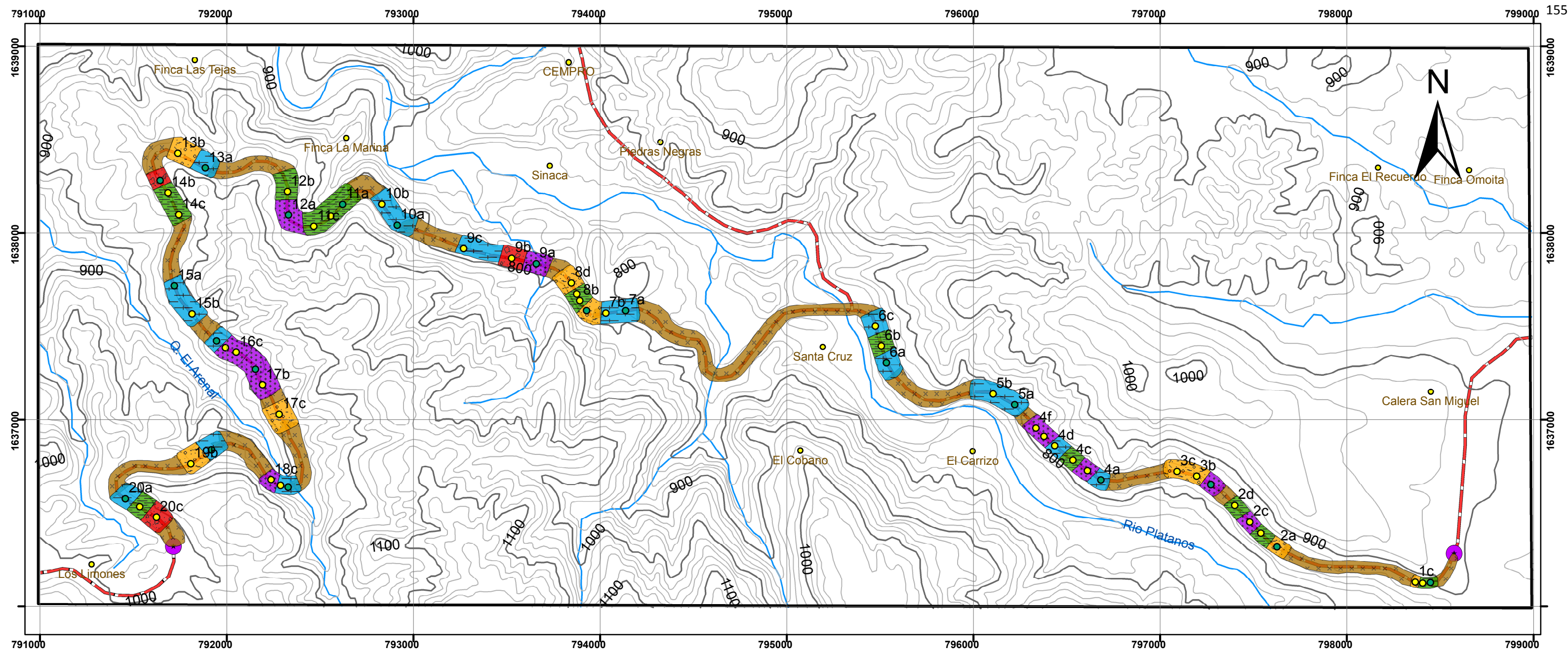
Ing. Francisco Javier Quiñónez de la Cruz
Director CII/USAC



LL

FACULTAD DE INGENIERÍA –USAC–
Edificio T-5, Ciudad Universitaria zona 12
Teléfono directo: 2418-9115, Planta: 2418-8000 Exts. 86209 y 86221 Fax: 2418-9121
Página web: <http://cii.usac.edu.gt>

Anexo X



Leyenda

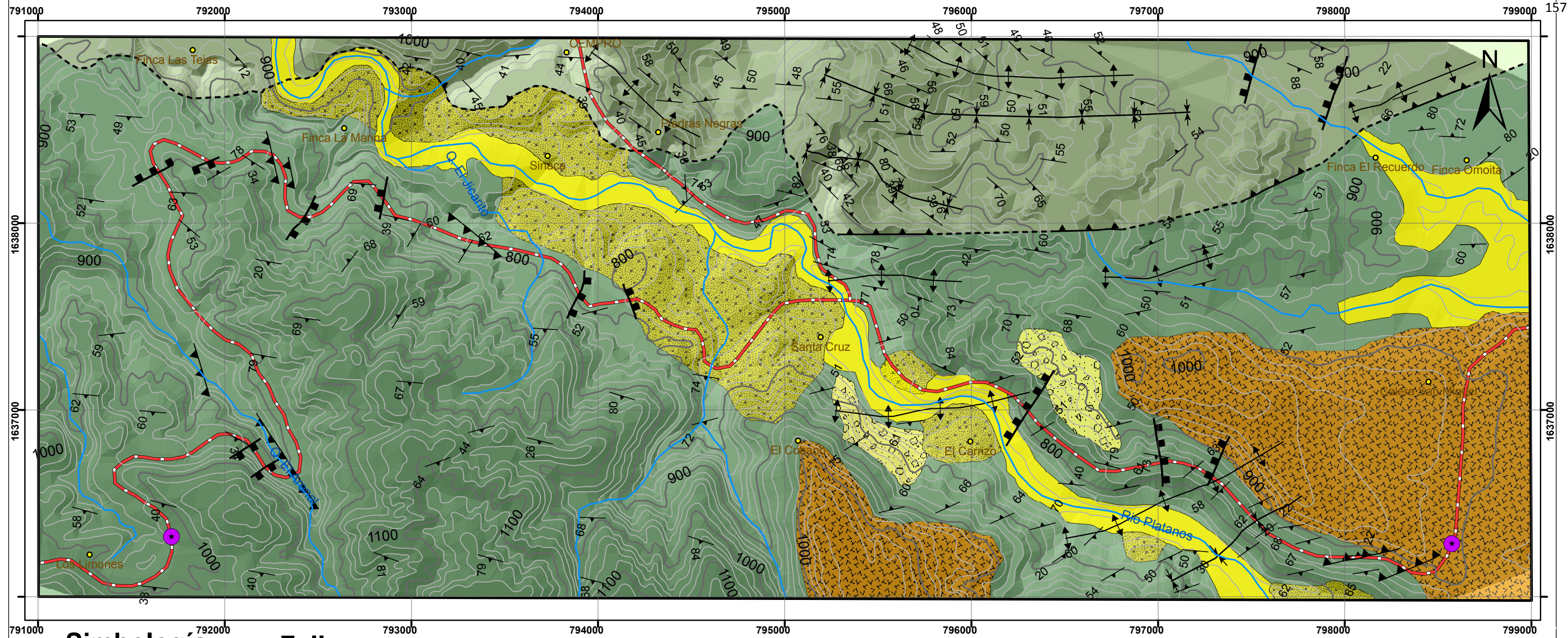
- Categoría SMR 5 — Zanjas de pie de talud, vallas de pie de talud, redes sobre talud.
- Categoría SMR 4 — Refuerzo con bulones o anclajes.
- Categoría SMR 3 — Hormigón (Gunita, hormigón de relleno, contrafuertes, vigas y muros de pie)
- Categoría SMR 2 — Drenaje, Superficial y profundo
- Categoría SMR 1 — Re excavación, tendido de muros de contención.

Corrección

- Macizos rocosos inconsistentes
- Area
- Estaciones
- Sub-estaciones
- Limite
- Curvas 100
- Curvas 20
- Ríos
- Carretera
- Localidad

	UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA CENTRO UNIVERSITARIO DEL NORTE	
	Evaluación geotécnica de los taludes del corte de carretera ubicado del km 39 al km 51 de la Carretera al Atlántico CA-9, del municipio de Sanarate, El Progreso.	
CONTIENE:	Zonificación de medidas correctivas sistema S.M.R.	
REALIZADO POR:	Jose Estuardo Alvarado Bermudez	
CARNÉ:	200940143	
Escala: 1:20 000 WGS-84	Revisor: Ing: Bernie Castillo	Fecha: Octubre de 2017

Anexo XI



Simbología

- Discordante
- Ríos
- Localidad
- ↕ Eje sinclinal
- ↕ Eje anticlinal
- ↗ Foliación
- Curvas 100
- Curvas 20

Fallas

- Discordante
- ▬ Falla normal
- ▲▲▲ Falla inversa

Accesos

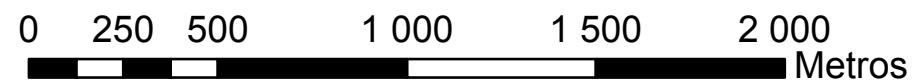
- Carretera Principal

Contactos

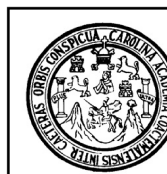
- Discordante
- - - - - Inferido

Leyenda

- Al Aluvión
- Col Coluvión
- Pmz Pómez
- Ba Basalto
- Fi Filita
- Anf Anfibolita



Hojas topograficas adyacentes



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
CENTRO UNIVERSITARIO DEL NORTE

Evaluación geotécnica de los taludes del corte de carretera ubicado del km 39 al km 51 de la Carretera al Atlántico CA-9, del municipio de Sanarate, El Progreso.

CONTIENE:	Mapa geológico	
REALIZADO POR:	Jose Estuardo Alvarado Bermudez	
CARNÉ:	200940143	
Escala: 1:20 000 WGS-84	Revisor: Ing: Bernnie Castillo	Fecha: Octubre de 2017

**USAC
CUNOR**

Universidad de San Carlos de Guatemala
Centro Universitario del Norte



No. 062-2018

El Director del Centro Universitario del Norte de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer los dictámenes de la Comisión de Trabajos de Graduación de la carrera de:

INGENIERO GEÓLOGO

Al trabajo titulado:

**EVALUACIÓN GEOTÉCNICA DE LOS TALUDES DEL CORTE DE CARRETERA
UBICADO DEL KM 39 AL KM 51 DE LA CARRETERA AL ATLÁNTICO CA-9, DEL
MUNICIPIO DE SANARATE, EL PROGRESO**

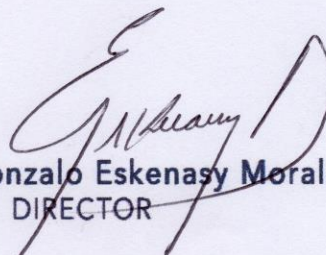
Presentado por el (la) estudiante:

JOSE ESTUARDO ALVARADO BERMUDEZ

Autoriza el

IMPRIMASE

Cobán, Alta Verapaz 27 de Febrero de 2018.


Lic. Erwin Gonzalo Eskenasy Morales
DIRECTOR

