



**UNIVERSIDAD DE CHILE**

**FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS**

**DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA**

**RELACIÓN ENTRE EL GRADO DE METEORIZACIÓN Y LOS TIPOS DE  
INESTABILIDADES EN TALUDES ASOCIADOS A LA RUTA E-47**

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGO**

**FABIÁN EDUARDO MUÑOZ MÁRQUEZ**

**PROFESORA GUÍA:  
SOFÍA REBOLLEDO LEMUS**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
MARISOL LARA CASTILLO  
SERGIO SEPÚLVEDA VALENZUELA**

**SANTIAGO DE CHILE**

**2022**

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA  
OPTAR AL TÍTULO DE:** Geólogo  
**POR:** Fabián Eduardo Muñoz Márquez  
**AÑO:** 2022  
**PROFESORAGUÍA:** Sofía Rebolledo Lemus

## RELACIÓN ENTRE EL GRADO DE METEORIZACIÓN Y LOS TIPOS DE INESTABILIDADES EN TALUDES ASOCIADOS A LA RUTA E-47

Los taludes son laderas artificiales frecuentemente utilizadas en muchas obras de ingeniería y su diseño depende esencialmente de la resistencia del terreno. Cuando la calidad del macizo rocoso se encuentra deteriorada y la geometría tampoco es favorable se producen inestabilidades que pueden afectar la seguridad y/o economía de un proyecto de ingeniería.

A lo largo de la Cuesta El Melón, ubicada en la V región de Chile, los taludes fueron excavados en rocas jurásicas meteorizadas principalmente de origen intrusivo y volcánico. Los macizos rocosos analizados se encuentran en la transición roca-suelo exhibiendo propiedades mixtas que dificultan su caracterización, clasificación y análisis, lo que supone un desafío para la ingeniería. Por esta razón, es necesario integrar la mayor cantidad de factores posibles en el análisis.

El comportamiento de los materiales es fuertemente influenciado por los planos de debilidad heredados del macizo rocoso y por el desarrollo de suelo residual. Presentan evidencias de deslizamientos de distintos tipos en función del grado de meteorización. Este trabajo destaca la influencia de dichas condiciones en la estabilidad de los taludes, así como los factores que potencialmente pueden desencadenar una inestabilidad.

*Dedicado a Eduardo, mi padre.*

## Tabla de Contenido

<b>1. Introducción.....</b>	<b>1</b>
1.1 Formulación	1
1.2 Objetivos	1
1.3 Metodología	2
1.4 Ubicación y accesos	2
<b>2. Antecedentes de la zona de estudio.....</b>	<b>4</b>
2.1 Geología	4
2.2 Geomorfología	11
2.3 Datos Climáticos	12
2.4 Sismicidad	13
<b>3. Marco Teórico.....</b>	<b>15</b>
3.1 Taludes	15
3.2 Remociones en Masa	16
3.3 Tipos de Rotura	17
3.4 Análisis Cinemático	20
3.5 Meteorización	22
3.6 Geological Strength Index	27
3.7 Clasificación de Suelos Residuales	28
3.8 Parámetros resistentes de discontinuidades con relleno	30
<b>4. Resultados.....</b>	<b>31</b>
4.1 Rocas Intrusivas	32
4.2 Rocas Estratificadas	47
<b>5. Discusiones.....</b>	<b>59</b>
<b>6. Conclusiones.....</b>	<b>61</b>
<b>7. Bibliografía.....</b>	<b>62</b>
<b>8. Anexos.....</b>	<b>65</b>



## Índice de Figuras

- Figura 1.1: Red Vial Región de Valparaíso (Dirección de Vialidad 2016).
- Figura 2.1: Mapa geológico Hojas de Quillota-Portillo, escala 1:25000 (SERNAGEOMIN, 1993).
- Figura 2.2: Mapa geológico ampliado, Hojas de Quillota-Portillo (SERNAGEOMIN, 1993).
- Figura 2.3: Columna estratigráfica de la Fm. Ajial en el sector Cerro Piedra Trepada (Piracés, 1976).
- Figura 2.4: Distribución de plutones jurásicos (Rivano, 1996).
- Figura 2.5: Mapa geomorfológico con unal (PRC 2011 - Zapallar).
- Figura 2.6: Promedio de precipitaciones mensuales los últimos 20 años en Catapilco (Climate-Data.org).
- Figura 2.7: Sismos en Chile durante el 2020 (Informe CSN - 2020).
- Figura 3.1: Nomenclatura de taludes (Suárez, 1998).
- Figura 3.2: Tipos de superficie de rotura en suelos (González de Vallejo, 2002).
- Figura 3.3: Deslizamiento circular combinado (Hoek y Bray, 1981).
- Figura 3.4: Desarrollo de deslizamientos curvilíneos (Hudson y Harrison, 1997).
- Figura 3.5: Condiciones de deslizamiento para falla plana (Monte, 2020).
- Figura 3.6: Condiciones de deslizamiento para falla en cuña (Monte, 2020).
- Figura 3.7: Condiciones de deslizamiento para falla por vuelco (Monte, 2020).
- Figura 3.8: Meteorización mecánica por exfoliación luego de una descarga por erosión (Suárez, 2009).
- Figura 3.9: Meteorización diferencial en juntas, posterior erosión (Suárez, 2009).
- Figura 3.10: Representación esquemática del proceso de meteorización química (Geological Society, 1995).
- Figura 4.1: Ruta E-47 "Cuesta El Melón" en rojo y Ruta 5 en amarillo (imagen de Google Earth).
- Figura 4.2: Taludes analizados en rocas intrusivas (imagen de Google Earth).
- Figura 4.3: Esquema GSI para Talud 1.1.
- Figura 4.4: Perfil de meteorización Talud 1.1.
- Figura 4.5: Análisis cinemático de rotura plana en Talud 1.1.
- Figura 4.6: Perfil de meteorización Talud 1.2.
- Figura 4.7: Análisis cinemático de rotura plana en Talud 1.2.
- Figura 4.8: Perfil de meteorización Talud 1.4.
- Figura 4.9: Esquema GSI para Talud 1.4.
- Figura 4.10: Análisis cinemático de rotura en cuña en Talud 1.4.
- Figura 4.11: Perfil de meteorización Talud 1.5.
- Figura 4.12: Esquema GSI para Talud 1.5.
- Figura 4.13: Análisis cinemático de rotura plana en Talud 1.5.
- Figura 4.14: Análisis cinemático de rotura en cuña en Talud 1.5.
- Figura 4.15: Deslizamiento de bloques por rotura plana y en cuña Talud 1.5.
- Figura 4.16: Perfil de meteorización Talud 1.6.
- Figura 4.17: Análisis cinemático de rotura plana en Talud 1.6.
- Figura 4.18: Análisis cinemático de rotura en cuña en Talud 1.6.
- Figura 4.19: Perfil de meteorización Talud 1.7.
- Figura 4.20: Análisis cinemático de rotura en cuña en Talud 1.7.
- Figura 4.21: Taludes en rocas estratificadas (imagen de Google Earth).
- Figura 4.22: Perfil de meteorización y estructura en bloques del Talud 2 Tramo oeste.
- Figura 4.23: Perfil de estructura mayor en Talud 2.
- Figura 4.24: Perfil de meteorización Talud 2 Tramo este.
- Figura 4.25: Perfil de meteorización Talud 3.
- Figura 4.26: Arriba: Estructura del Talud 4. Abajo: Perfil de meteorización Talud 4.
- Figura 4.27: Análisis cinemático de rotura plana en Talud 4.
- Figura 4.28: Análisis cinemático de rotura en cuña en Talud 4.
- Figura 4.29: Perfil de meteorización Talud 5.
- Figura 4.30: Análisis cinemático de rotura plana en Talud 5.
- Figura 4.31: Análisis cinemático de rotura en cuña en Talud 5.
- Figura 4.32: Perfil de meteorización Talud 6.
- Figura 4.33: Análisis cinemático de rotura plana en Talud 6.

## Índice de Tablas

Tabla 2.1: Datos climáticos de la zona de Catapilco (Climate-Data.org).

Tabla 3.1: Clasificación de remociones en masa (Varnes, 1978).

Tabla 3.2: Perfil de meteorización Phillipson y Brand (1985).

Tabla 3.3: Perfil de meteorización ISRM (1981).

Tabla 3.4: GSI para macizos rocosos (Hoek y Marinos, 2000).

Tabla 3.5: Clasificación Wesley (2009) de suelos residuales.

Tabla 3.6: Parámetros resistentes de discontinuidades con relleno (González de Vallejo, 2002).

Tabla 8.1: Orientaciones Talud 1.1.

Tabla 8.2: Orientaciones Talud 1.2.

Tabla 8.3: Orientaciones Talud 1.4.

Tabla 8.4: Orientaciones Talud 1.5.

Tabla 8.5: Orientaciones Talud 1.6.

Tabla 8.6: Orientaciones Talud 1.7.

Tabla 8.7: Orientaciones Talud 4.

Tabla 8.8: Orientaciones Talud 5.

Tabla 8.9: Orientaciones Talud 6.

# Capítulo 1: Introducción

## 1.1 Formulación

Los estudios geotécnicos abordan los problemas de construcción desde un punto de vista geológico y contribuyen a la seguridad y economía de un proyecto u obra de ingeniería. Dentro de dichas obras, los taludes se definen como cualquier superficie artificial inclinada con respecto a la horizontal y son frecuentemente excavados en todo tipo de material geológico. Los taludes están presentes en las obras de ingeniería que requieran una superficie plana en una zona de pendiente o alcanzar una profundidad por debajo de la superficie. Se diseñan y construyen con la pendiente más elevada que permita la resistencia del terreno (González de Vallejo, 2002).

El área de investigación se desarrolla en la Cuesta El Melón en taludes excavados en macizos rocosos meteorizados in-situ cuyo producto final son los suelos residuales. Los materiales rocosos se encuentran en la transición roca-suelo (saprolito), presentando propiedades y características mixtas entre ambos materiales. Por otro lado, los taludes analizados exhiben diferentes tipos de deslizamientos controlados por las discontinuidades que representan los principales planos de debilidad de los macizos rocosos.

En este estudio, el análisis de inestabilidades de los taludes se basa en la influencia de los factores geológicos (litología y grado de meteorización) y geométricos (orientación, altura y pendiente del talud, disposición y frecuencia de las superficies de discontinuidades) que lo condicionan. Se propone relacionar el grado de meteorización de los materiales con los tipos de deslizamientos observados en los taludes a lo largo de la ruta E-47 Cuesta El Melón. Dicho análisis contribuye a la caracterización geomecánica de los materiales y para el conocimiento del comportamiento mecánico de los taludes.

## 1.2 Objetivos

### *1.2.1 Objetivo General*

- Determinar la influencia del grado de meteorización en la ocurrencia y tipo de deslizamientos en taludes asociados a la ruta E-47.

### *1.2.2 Objetivos Específicos*

- Caracterizar los tipos de deslizamientos en los taludes asociados a la Cuesta El Melón.

- Caracterizar y clasificar geotécnicamente los macizos rocosos.
- Realizar un análisis cinemático de los taludes estudiados.

### **1.3 Metodología**

La metodología empleada en este estudio consta de tres fases:

#### **Gabinete 1:**

En primer lugar se define la ubicación y el acceso a la zona de estudio. Luego se identifican los principales taludes y deslizamientos asociados a la zona de estudio a través de un análisis fotogeológico. Posteriormente se procede a revisar los antecedentes de la zona: clima, precipitaciones, temperaturas, sismicidad, geomorfología y geología. Se realiza un marco teórico con las principales características y clasificaciones de los macizos rocosos además de los tipos de inestabilidades y sus métodos de análisis.

#### **Terreno:**

Mediante observación visual, se identifican los deslizamientos principales en los taludes seleccionados. Luego se caracterizan los macizos rocosos con descripciones de la matriz rocosa y discontinuidades. En cuanto a la matriz rocosa, se define su litología y grado de alteración mediante una descripción mineralógica macroscópica detallada. Por otro lado, se describen las características que definen las discontinuidades y se miden las orientaciones de las familias de discontinuidades involucradas en los deslizamientos. Se registran fotográficamente los taludes.

#### **Gabinete 2:**

En base a las mediciones composicionales y estructurales realizadas en terreno se definen los grados de meteorización, se edifican perfiles de meteorización y se clasifican los taludes mediante el índice GSI. Luego se procede a realizar un análisis cinemático de los principales deslizamientos mediante el uso de las redes estereográficas, asumiendo un  $\phi$  bibliográfico dependiente de la litología y grado de meteorización. Luego se discuten los resultados analizando en conjunto los datos e interpretaciones realizadas.

### **1.4 Ubicación y acceso**

La zona de estudio se encuentra ubicada en la V región de Valparaíso, en el límite entre las provincias de Quillota y Petorca, ruta conocida como cuesta El Melón (ruta E-47 entre 32°35' S - 32°38' S) que une las comunas de Nogales y Zapallar. Tiene un

fácil acceso por la Ruta 5 presentándose como una ruta alternativa al Túnel El Melón conectando los pueblos El Melón con Catapilco entre los cerros Cuajo y Ajial.



Figura 1.1: Red Vial Región de Valparaíso (Dirección de Vialidad 2016). Zona de estudio dentro del área amarilla, comuna de Zapallar.

## Capítulo 2: Antecedentes de la zona de estudio

### 2.1 Geología

Chile es un país que se extiende por más de 4000 Km a través del continente Sudamericano desde los 18°S hasta los 56°S. Está limitado por Perú, Bolivia y Argentina en el norte, por la Tierra de Fuego en el sur, y por el Océano Pacífico y la Cordillera de Los Andes al oeste y este respectivamente. Las variaciones climáticas a lo largo del territorio se ven reflejadas en la variada topografía que presenta, desde un ambiente árido-desértico en el norte hasta un ambiente húmedo-glaciario en el sur. Las características tectónicas y geomorfológicas de la parte **norte** y **central** de Chile pueden ser agrupadas en tres zonas con orientación norte-sur. La zona 1 corresponde a la Cordillera de la Costa, la cual consiste principalmente en rocas ígneas del Paleozoico Tardío y Mesozoico, además de afloramientos de rocas metamórficas del basamento Paleozoico. La zona 2 corresponde a la Depresión Intermedia, la cual consiste en rellenos sedimentarios del Mesozoico al Cuaternario, en donde se ubican importantes ciudades y actividad agrícola. La zona 3 corresponde a la Cordillera de los Andes, un cordón montañoso cuyo alzamiento (Mioceno-actualidad) es producto de la subducción de la placa oceánica bajo el continente Sudamericano en dirección este y se extiende a lo largo de todo el territorio chileno. En la parte **sur** de Chile, la zona costera se compone de turbiditas metasedimentarias en gran parte de edades Mesozoicas. No se reconocen valles centrales, en su lugar, la transición entre ambas cordilleras es dominado por las rocas ígneas del batolito Patagónico de edad Mesozoica-Cenozoica. La subducción es evidenciada por la abundante actividad sísmica y también por la línea continua de volcanes activos e inactivos, en su mayoría estratovolcanes andesíticos. Existen más de 200 volcanes de arco de edad Pleistocena y Holocena distribuidos en cuatro segmentos o Zonas Volcánicas: Norte (NVZ; 2°N–5°S), Centro (CVZ; 14°S–28°S), Sur (SVZ; 33°S–46°S) y Austral (AVZ; 49°S–55°S). Entre la Zona Volcánica Centro y Sur se encuentra la zona “flat slab”, caracterizada por la ausencia de volcanismo y de valle central, producto de la disminución del ángulo de subducción. En la Zona Volcánica Norte ocurre enriquecimiento mineral (Cu, Au, Ag) con importante potencial económico, mientras que en la Zona Volcánica Austral los productos volcánicos son de composición más basáltica (Pankhurst y Hervé en *Geology of Chile*, 2007).

Gran parte del material rocoso de la Cordillera de la Costa y de los Andes está compuesto por rocas de origen magmático, ya sea intrusivos o emisiones volcánicas. La actividad plutónica durante el **Paleozoico** (régimen compresivo) generó lo que hoy se conoce como los Complejos Metamórficos de Santo Domingo y Nahuelbuta, con rocas como tonalitas de Hb-Bt, granodioritas y granitos, con minerales de grano grueso y tectónicamente orientados, comúnmente intruidos por diques de menor edad. Las intrusiones bimodales del **Triásico-Jurásico Temprano** se caracterizan por leucogranitos y gabros de Hb-Px con texturas desde grano grueso hasta porfíricas, desarrollados en un régimen extensional. El plutonismo del **Jurásico**

**Medio** deja como resultado rocas como dioritas de Px-Hb, tonalitas de Hb-Bt, granodioritas y en menor cantidad leucogranitos caracterizados por una textura de grano medio y presencia local de enclaves y orientaciones de minerales. Los plutones de edad **Cretácica** se componen principalmente de dioritas y gabros de Px-Hb, tonalitas de Bt y granodioritas de diferentes texturas con enclaves máficos locales y ausencia de diques máficos emplazados epizonalmente en sucesiones volcanoclásticas y en formaciones deformadas sedimentarias y volcánicas de edad Triásica a Paleógena (Parada et al. en Geology of Chile, 2007).

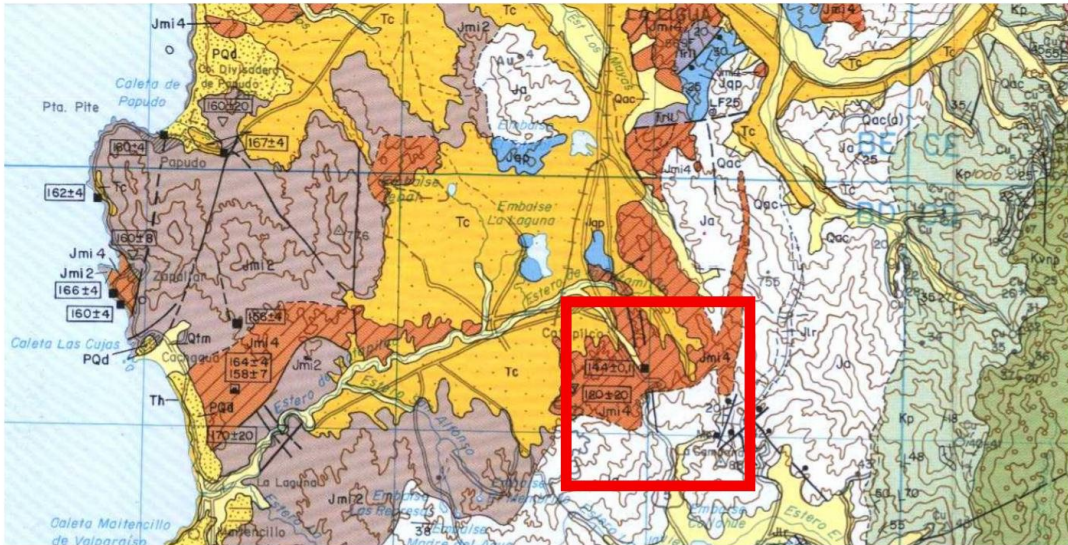
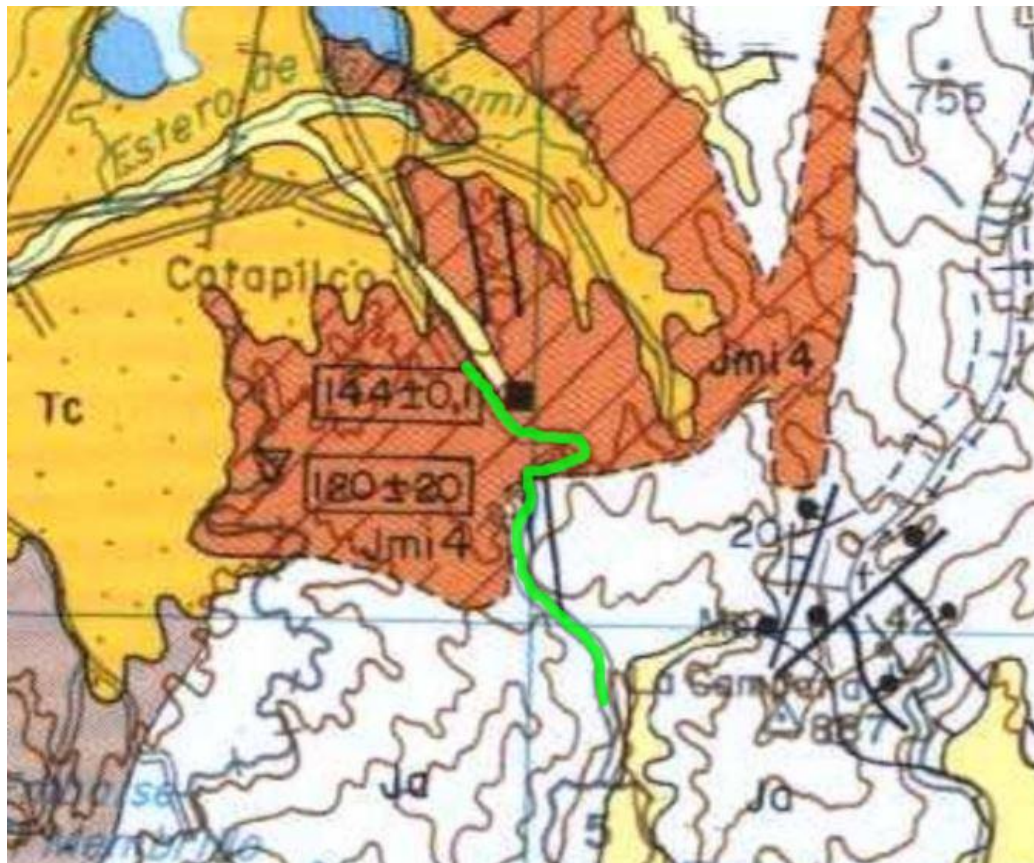
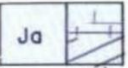


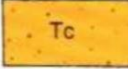
Figura 2.1: Mapa geológico Hojas de Quillota-Portillo, escala 1:250000 (SERNAGEOMIN, 1993). El cuadro rojo delimita la zona de estudio.

Durante el Ciclo Andino entre los 31°S y 32°S, la actividad volcánica de arco Jurásica se evidencia en las formaciones Ajial y Horqueta. Intercalada entre ellas, la Formación Cerro Calera representa una sucesión marina fosilizada con rocas piroclásticas, detríticas y calcáreas. Las intercalaciones marinas en Fm. Ajial sugiere intensa subsidencia en el dominio del arco, el cual no se encontraba a grandes alturas. Por otro lado, la Fm. Horqueta representa el alzamiento del terreno y el incremento de la actividad volcánica en condiciones sub-aéreas. Asignada a la primera sub-etapa del Ciclo Andino, la **Superunidad Mincha** representa la actividad plutónica entre los 30°S y 32°S, con sus unidades Millahue, Tranquilla, Puerto Oscuro y **Cavilolén** durante el Jurásico Medio al Cretácico Temprano. La variada geoquímica entre las unidades sugiere un importante rol del fraccionamiento de la cámara magmática durante la cristalización.






**Formación Ajal** (volcánica, continental)  
 Lavas y depósitos piroclásticos ácidos a intermedios  
 (a) Rocas metamórficas atribuidas a la Formación Ajal  
 (Jurásico Inferior-Medio)


**Formación Confluencia** (continental)  
 Conglomerados, areniscas, brechas y limolitas poco consolidadas.  
 (¿Mioceno-Plioceno?)

**Superunidad Mincha**

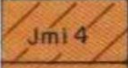
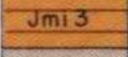
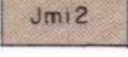
	<b>2. Unidad Puerto Oscuro</b> Dioritas cuarcíferas de piroxeno y/o anfíbola; monzodioritas de hiperstena y biotita; gabros de piroxeno y olivino; gris verdoso
	<b>3. Unidad Tranquila</b> Principalmente sienogranitos, gris claro, de grano fino Sienitas cuarcíferas mirmequíticas subordinadas
	<b>4. Unidad Cavilón</b> Granodioritas y tonalitas, de grano fino a medio (Jurásico)

Figura 2.2: Mapa geológico ampliado, Hojas de Quillota-Portillo, escala 1:250000 (SERNAGEOMIN, 1993). Cuesta El Melón en verde.



### 2.1.1 Formaciones Estratificadas

#### **Mesozoico (Jurásico)**

##### **Ja. Formación Ajial:**

Sus afloramientos se extienden desde el norte del Cerro Imán en la hoja de Illapel (Estratos de Pupio), hasta el sector de Olmué por el sur. Aparece como una franja elongada NS, se apoya en aparente concordancia sobre la Formación Quebrada del Pobre e infrayace concordantemente a la Formación Cerro Calera. Está intruida por granitoides jurásicos (Rivano, 1996).

Las calizas de la base de la Formación Cerro Calera, en el techo de la Formación Ajial, se reconocen desde el Cerro Cuajo hacia el sur y en el Cerro Los Pozos al norte. Se evidencia un fuerte metamorfismo (dinámico y termal) entre Catapilco y el río Aconcagua.

La Formación Ajial está compuesta por tobas, brechas volcánicas y lavas andesítico-basálticas y riodacíticas, asociadas a pórfidos andesítico-dacíticos, y escasas intercalaciones sedimentarias de conglomerados, areniscas y pelitas calcáreas siendo las más importantes las que afloran al norte del Río Petorca. Los niveles sedimentarios muestran a menudo pliegues sinsedimentarios con orientación irregular, figuras de carga y estratificación cruzada.

La edad de la Formación Ajial está comprendida entre el Pliensbachiano y el Bajociano, de acuerdo a antecedentes paleontológicos (Covacevich, 1975; Sepúlveda, 1988).

- Las tobas son de colores gris a pardo, con clastos entre 5 a 45% no mayores a 1 cm de diámetro y que son fragmentos pumíceos, más raramente dacítico-riolíticos; la matriz es cuarzo feldespática y alterada a clorita-epidota-sericita; también se reconoce calcita.
- Las brechas volcánicas son de colores pardo rojizo con clastos de hasta 10 cm de diámetro de composición andesítica (fragmentos con textura porfírica y hialopilitica), riodacítica (fragmentos pumíceos y riodacitas) y clastos sedimentarios siempre en menor proporción; la abundancia relativa de los tipos de clastos volcánicos permite diferenciar entre brechas volcánicas félsicas o máficas; los clastos varían entre el 10 a 40% del volumen de las brechas.
- Las lavas andesítico-basálticas son rocas de colores pardo oscuro a pardo rojizo, porfíricas con fenocristales de plagioclasa subhedrales, clinopiroxenos con maclas simples, algunos cristales presentan textura poikilitica; la mesostasis es de textura pilotaxítica, hialoofítica, intersertal o vitrofídica, con microlitos de plagioclasa y gránulos de piroxeno; a menudo la matriz está parcialmente devitrificada .

- Los flujos dacíticos son de color gris rojizo a rosado con textura porfiro-volcanoclástica; se observan clastos pumiciticos alargados, los cristales corresponden a plagioclasa, feldespato K y cuarzo además de escasos pseudomorfos de anfibola (<1%), la masa fundamental es un agregado criptocrystalino con tenues líneas de fluidez alterado a sericita, clorita y epidota.
- Los conglomerados son de color amarillento con clastos de hasta 10 cm de fragmentos volcánicos (andesitas, dacitas, riolitas) la matriz es arena fina a limo con cemento calcáreo.
- Las areniscas son de color amarillento a ocre variando desde subarcosas a grauwacas, es frecuente el cemento calcáreo.
- Las rocas pelíticas son lutitas calcáreas que gradan a veces a calcilutitas y calcarenitas.

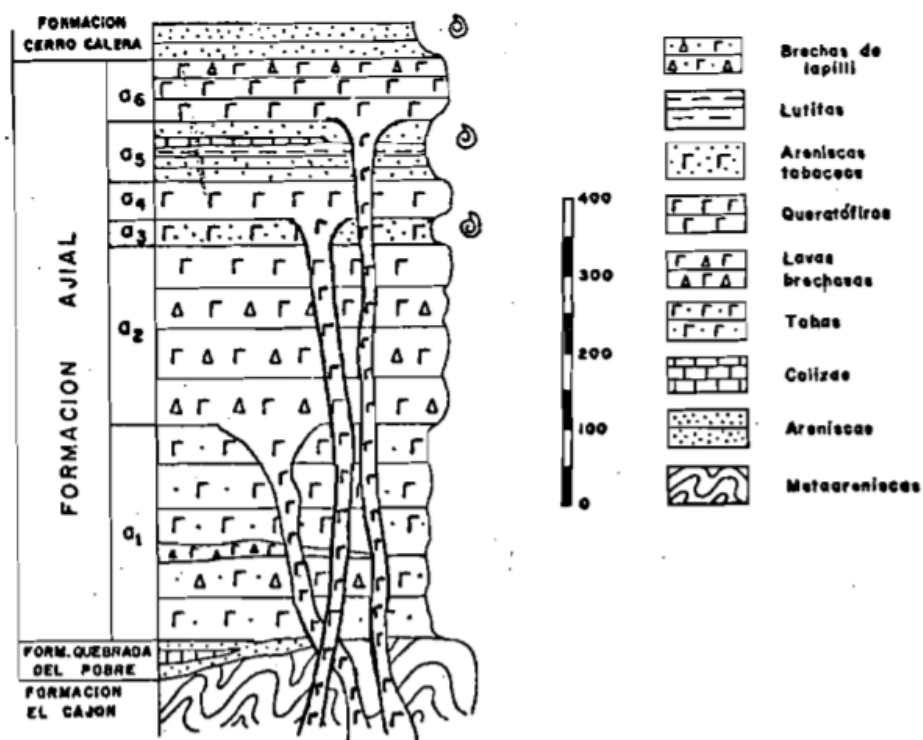


Figura 2.3: Columna estratigráfica de la Fm. Ajial en el sector Cerro Piedra Trepada (Piracés, 1976).

### 2.1.2 Intrusivos Franja Jurásica

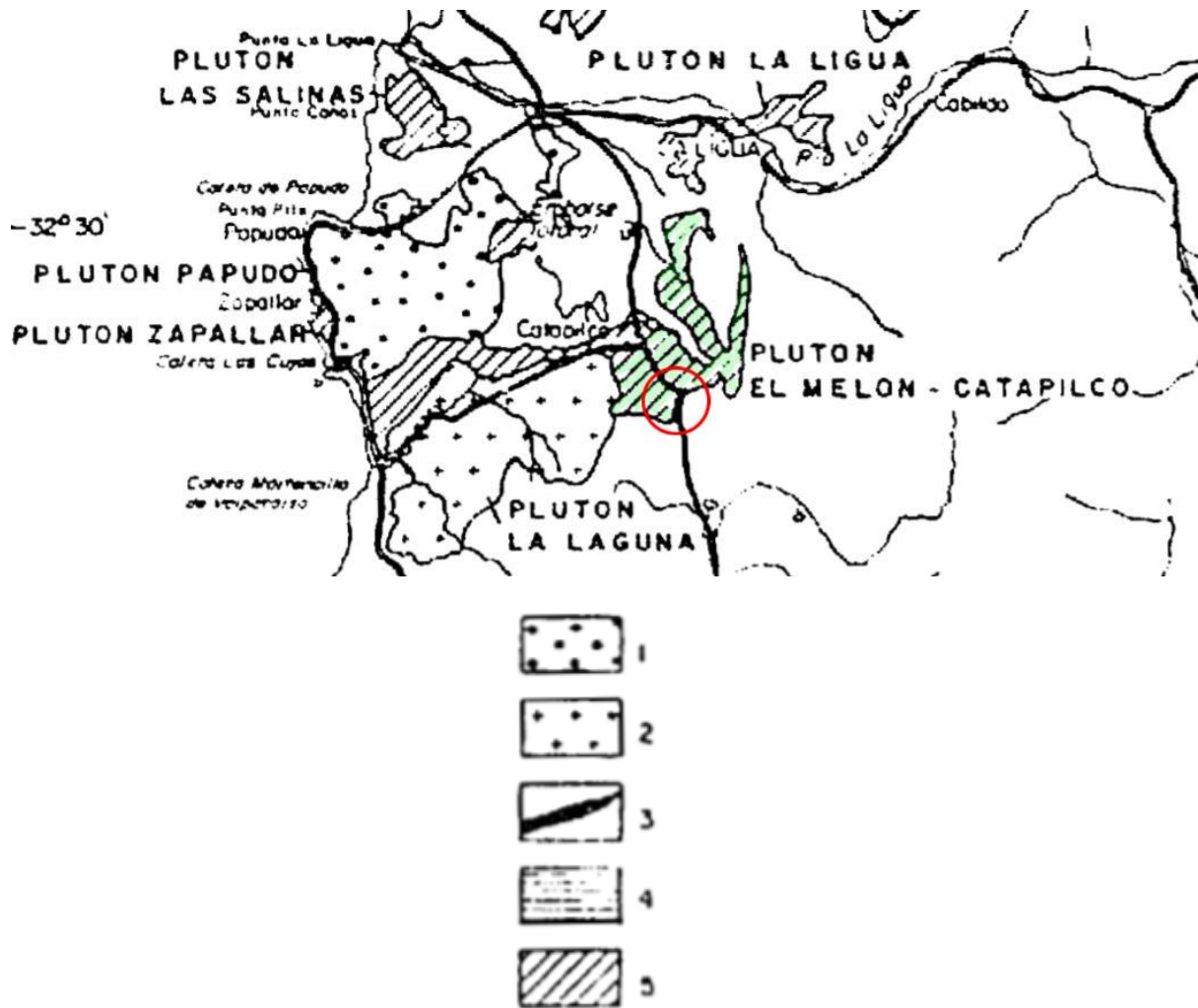


Figura 2.4: Distribución de plutones jurásicos. 1) Unidad Puerto Oscuro: subunidad Cuarzodioritas de Cachagua. 2) Unidad Puerto Oscuro: subunidad Gabro de Las Cujas. 3) Quebradas. 4) Unidad Tranquilla. 5) Unidad Cavilolén (Rivano, 1996). Plutón El Melón-Catapilco en verde. Cuesta El Melón dentro de la circunferencia roja.

#### **Superunidad Mincha** (Rivano et al., 1985):

Constituye la franja más occidental de los intrusivos Meso-Cenozoicos y conforma gran parte de la Cordillera de la Costa y planicies litorales, aflorando en forma discontinua con rumbo general NS con un ancho promedio de unos 15 Km y con máximo de 35 Km en el borde sur de la Hoja Quillota. Los intrusivos de la Superunidad Mincha intruyen a rocas paleozoicas (Unidad Cochoa) y a rocas del Triásico-Jurásico Medio (Formaciones Pichidangui, La Ligua, Los Molles, Quebrada del Pobre, Ajial y Cerro Calera) . Los afloramientos de rocas de la Superunidad Mincha son cubiertos por sedimentos consolidados y no consolidados del Neógeno y Cuaternario.

- **Jmi2. Unidad Puerto Oscuro:** aflora en dos cuerpos batolíticos de forma irregular que se extienden entre el río La Ligua por el norte (Plutón Papudo) y el estero la Canela por el sur (Plutón La Laguna). Ambos cuerpos están separados por una franja de intrusivos perteneciente a la Unidad Cavilolén. Esta unidad se distingue por sus colores oscuros a gris verdoso, debido a su alto contenido en máficos. En ella se han reconocido tres subunidades: las Cuarzodioritas de Cachagua y el Gabro de Las Cujas en el Plutón Papudo y las Cuarzodioritas de La Laguna que ocupan la totalidad del Plutón de La Laguna.
  
- **Jmi3. Unidad Tranquilla:** corresponde al Plutón Mauco, de forma ligeramente ovoide, con su eje mayor orientado NS y con un apéndice elongado en dirección NW-SE y del cual lo separa una falla de igual rumbo que ha desarrollado foliación en la roca de caja. Hacia el este estas rocas intruyen rocas metamórficas cuyo protolito original son rocas volcánicas asignadas a la Formación Ajial. Hacia el oeste son cubiertas por depósitos Neógenos y Cuaternarios.
  
- **Jmi4. Unidad Cavilolén:** aflora en grandes plutones batolíticos y cuerpos menores asociados. Los principales plutones son: el Plutón de Petorca-Quilimari, Plutón de Guaquén, Plutón de La Ligua, Plutón de Las Salinas, **Plutón de El Melón-Catapilco**, Plutón de Zapallar, Plutón Quintero, Plutón Santa Teresa y Plutón de Limache. Petrográficamente corresponden a granodioritas, tonalitas y más raramente, a monzogranitos de biotita, hornblenda y en menor proporción, clinopiroxenos, con textura fanerítica de grano grueso. Presenta alteración clorita-epidota y minerales accesorios como esfeno, opacos, apatito y circón. Se observan inclusiones máficas con bordes definidos y algunas de ellas presentan una zonación de color. Las edades radiométricas (Levi et al., 1963; Muñizaga, 1972; Espiñera, 1989) sugieren un promedio de edades entre 156-170 Ma.

## 2.2 Geomorfología

En la zona de estudio, tres morfologías predominantes son identificadas (*Figura 2.5*). La faja costera fue descrita por Andrade y Castro (1988), los cuales la dividen en 5 tramos con morfologías de acantilados, terrazas, playas y dunas. Los macizos montañosos son la morfología de mayor expresión en la comuna con el 80% de la superficie, dominando el sector poniente, sur y norte con alturas máximas en los cerros Las Cenizas (776 msnm) y Las Astas (774 msnm). El Valle del Estero Catapilco es la subcuenca asociada al estero caracterizada por laderas cóncavas.

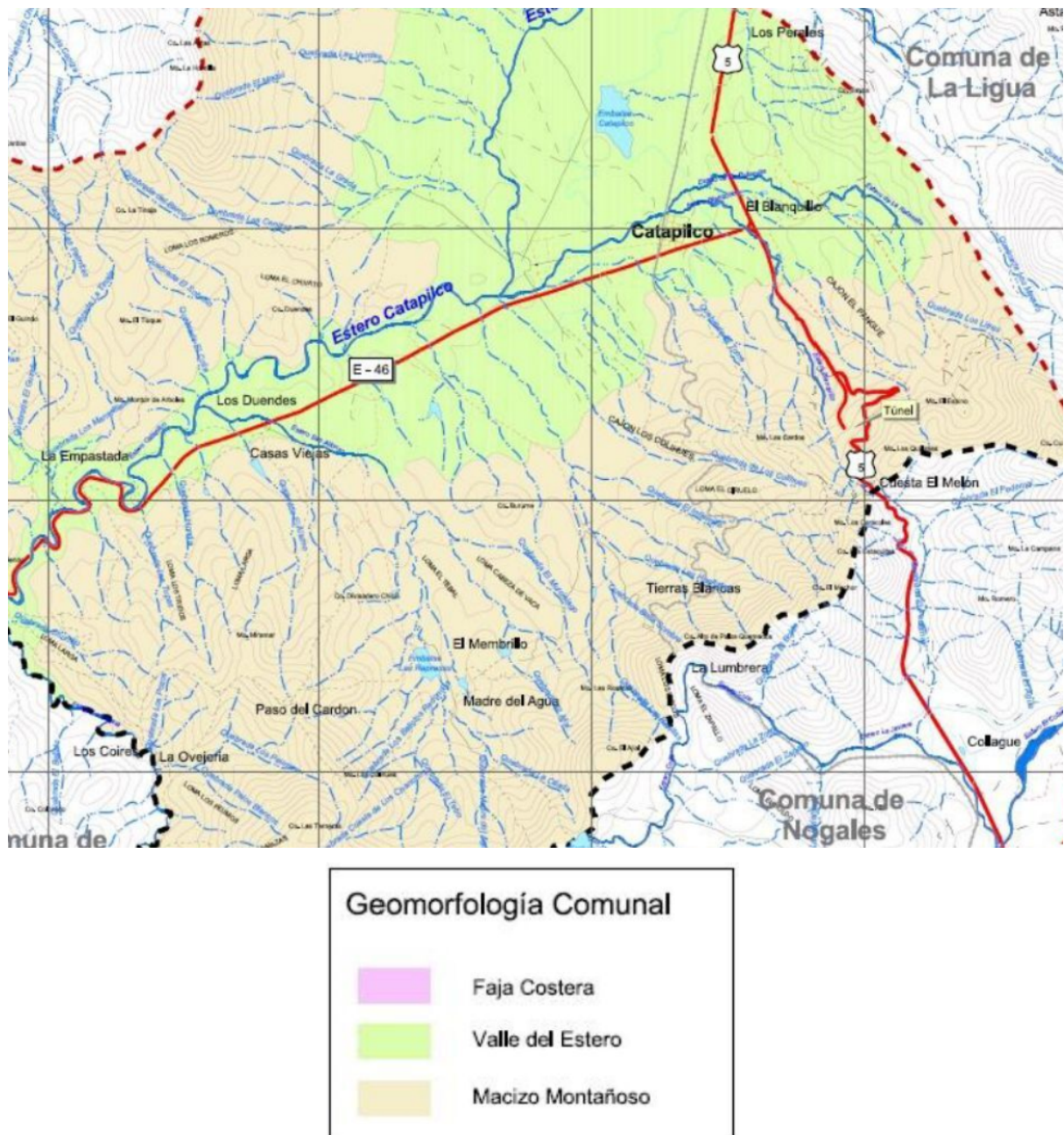


Figura 2.5: Mapa geomorfológico comunal (PRC 2011 - Zapallar).

## 2.3 Datos climáticos

La comuna de Zapallar presenta un clima de estepa con gran sequedad atmosférica en los valles interiores y un clima templado cálido con lluvias invernales con estación seca prolongada (7-8 meses) y gran nubosidad en la costa (Plan Regulador Comunal PRC - 2011).

El clima en Catapilco y sus proximidades se le conoce también como un clima de estepa local con relativamente pocas precipitaciones durante el año, considerado como BSk según la clasificación climática de Köppen-Geiger. La temperatura media anual es de 15,3 °C y la precipitación es de 299 mm al año (Climate-Data.org).

La *Tabla 2.1* incluye datos meteorológicos relevantes como las temperaturas máxima, mínima y media, la humedad, los días lluviosos y las horas de sol al día. Pueden ser relevantes a la hora de planificar un programa de muestreo, ensayos in-situ, ensayos de laboratorio o al diseñar una obra de ingeniería.

Tabla 2.1: Datos climáticos de la zona de Catapilco (Climate-Data.org).

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Temperatura media (°C)	19.5	19.4	18.3	16	13.8	11.8	10.9	11.6	12.7	14.5	16.6	18.2
Temperatura min. (°C)	15.5	15.6	14.8	12.8	10.7	8.3	7.3	8	9.3	10.9	12.5	14
Temperatura máx. (°C)	24.8	24.6	23.5	20.9	18.1	16	15.3	16.1	17.3	19.5	22	23.6
Precipitación (mm)	0	1	6	16	45	78	54	52	26	16	3	2
Humedad(%)	69%	70%	72%	75%	79%	80%	79%	80%	79%	74%	68%	67%
Días lluviosos (días)	0	0	1	2	3	4	4	4	3	2	1	0
Horas de sol (horas)	10.4	9.6	9.0	7.9	7.2	7.4	7.4	7.4	7.6	8.8	10.3	10.8

El gráfico de la *Figura 2.6* indica las precipitaciones (mm) y temperaturas (°C) promedio del sector de Catapilco con datos recolectados entre 1999 y 2019. La menor cantidad de precipitaciones ocurre en enero con un promedio de 0 mm y la mayor cantidad se registra en junio con un promedio de 78 mm.

Por otro lado, las temperaturas más altas se registran en enero con un promedio de 19,5°C y las más bajas durante julio con 10,9°C promedio.



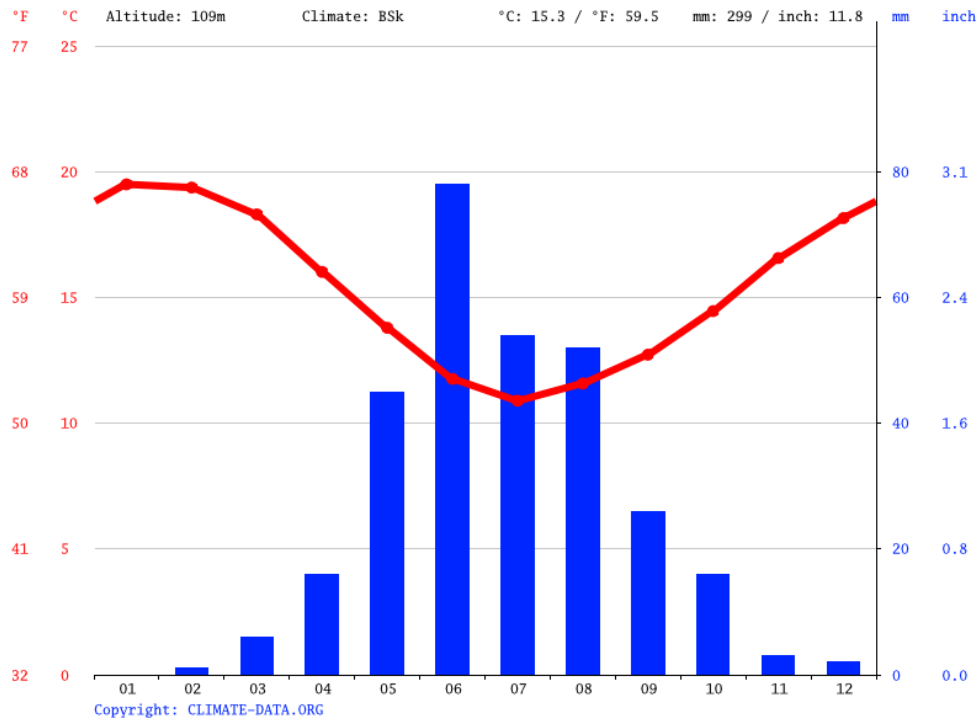


Figura 2.6: Promedio de precipitaciones mensuales los últimos 20 años en Catapilco(Climata-Data.org).

## 2.4 Sismicidad

Chile es uno de los países más sísmicos del mundo debido principalmente a la convergencia entre las placas Sudamericana, Nazca y Antártica en el borde occidental del continente. La velocidad de convergencia de la placa de Nazca bajo la Sudamericana se estima en 6,8 cm/año, lo que produce una actividad sísmica frecuente e intensa (Sismicidad y terremotos en Chile - CSN).

Madriaga (1998) identifica cuatro posibles mecanismos generadores de sismos en Chile. El mecanismo interplaca es producido por el rozamiento de las placas involucradas en subducción y es el dominante en Chile. Los sismos tipo “outer-rise” ocurren por la flexión o “bending” de la placa de Nazca antes de descender bajo el continente. Los sismos intraplaca-oceánica se producen por la activación de fallas normales por el peso de la placa subductada y el fuerte acoplamiento interplaca existente, generando sismos a mayor profundidad y generalmente de magnitud moderada. Por último, los sismos intraplaca-continental ocurren en el continente Sudamericano con profundidades menores a 30 km generados por las deformaciones compresivas de subducción y esfuerzos locales.

En la región de estudio fuertes movimientos telúricos históricos han sido registrados desde 1700:

- Terremoto de Valparaíso: 8 de julio de 1730 (8,7 Mt)
- Terremotos de Copiapó y Valparaíso: 19 de noviembre de 1822 (8,5 MS)

- Terremoto de La Ligua-Petorca: 7 de julio de 1873 (8,0 Richter)
- Terremoto de Valparaíso: 16 de agosto de 1906 (8.2 Mw - 7,9 MS)
- Terremoto de La Ligua: 28 de marzo de 1965 (7,4 Mw)
- Terremoto de La Ligua-Petorca: 16 de octubre de 1981 (7,5 MS)
- Terremoto de Algarrobo: 3 de marzo de 1985 (8,0 Mw - 7,8 MS)
- Terremoto de Valparaíso: 24 de abril de 2017 (6,9 Mw)

El Centro Sismológico Nacional (CSN) de la Universidad de Chile informó 7826 sismos con magnitudes entre 2.5 y 7.0 durante el año 2020 (Figura 2.7). El país promedió 652 sismos mensuales, es decir, 21 sismos diarios. La actividad sísmica registrada aumenta en comparación con los años 2108 (7079 sismos) y 2019 (7733 sismos).

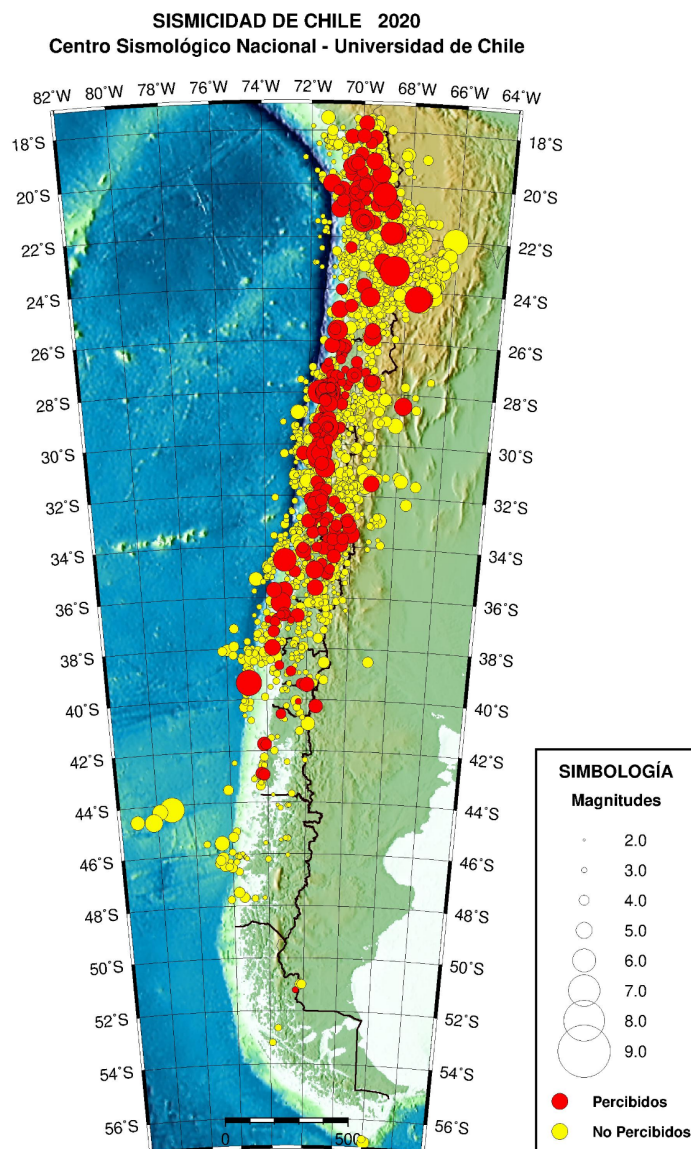


Figura 2.7: Sismos en Chile durante el 2020 (Informe CSN - 2020).



## Capítulo 3: Marco Teórico

### 3.1 Taludes

Un talud o ladera es una masa de tierra no plana que posee cambios de pendiente o cambios de altura significativos (Suárez, 1998). Se le conoce como ladera si su configuración actual es de origen natural y talud si es de origen artificial.

Los taludes están presentes en la mayoría de las obras de infraestructura lineal y en general cualquier construcción que requiera una superficie plana en una zona de pendiente o alcanzar una profundidad determinada por debajo de la superficie. Se identifican los taludes permanentes si se diseñan para ser estables a largo plazo y los taludes temporales si se proyectan a corto plazo (González de Vallejo, 2002).

La edificación de una carretera en una zona montañosa requiere por lo general de varios cortes de roca. En rocas blandas por ejemplo lutitas, zonas de alteración hidrotermal o en granitos intensamente meteorizados, el diseño de taludes estables es una extensión de la mecánica de suelos y sus materiales tienden a fallar a través de la matriz de la roca. En la mayoría de las rocas duras y también en algunas rocas blandas, los movimientos de roca son controlados por las discontinuidades heredadas del macizo rocoso original (Goodman, 1989).

En una ladera o talud, se identifican los siguientes elementos geométricos que los constituyen (*Figura 3.1*):

- Altura
- Pie
- Cabeza o Escarpe
- Pendiente
- Longitud
- Convexidad (vertical)
- Curvatura (horizontal)
- Nivel freático

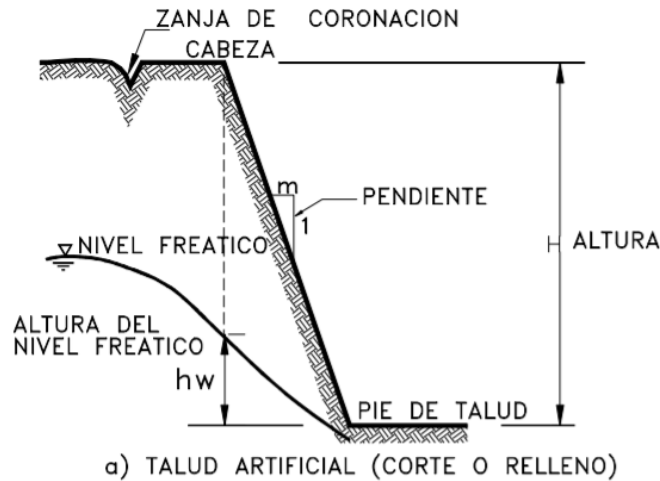


Figura 3.1: Nomenclatura de taludes (Suárez, 1998).

### 3.2 Remociones en Masa

En este estudio las remociones en masa son clasificadas según los trabajos de Varnes (1978) de acuerdo a tipo de movimiento y material involucrado. Se definen 5 tipos de movimientos: caídas (o desprendimientos), volcamientos (toppling o basculamientos), deslizamientos, propagaciones laterales y flujos. Por otro lado, se clasifican los materiales como roca o suelo, y a su vez estos últimos como detritos (<80% de partículas <2 mm) y tierra (>80% de partículas <2 mm). La *Tabla 3.1* muestra las clasificaciones de Varnes por tipo de movimiento y material.

Tabla 3.1: Clasificación de remociones en masa (Varnes, 1978).

Tipo de Movimiento	Tipo de Material			
	Caída	Suelo		
Volcamiento				
Deslizamiento	Rotacional	Roca		
	Traslacional			
Propagaciones laterales	Detritos			Tierra
Flujos				
Complejos				

Los factores que controlan los movimientos de las laderas son aquellos capaces de modificar las fuerzas internas y externas que actúan sobre el terreno (González de Vallejo, 2002). Se pueden dividir en factores condicionantes y desencadenantes.

Los **factores condicionantes** o pasivos dependen de la naturaleza, estructura y forma del terreno. Dentro de estos factores se encuentran el relieve, la estructura geológica, estratigrafía y litología, el comportamiento hidrogeológico y las propiedades geomecánicas de los materiales.

Los **factores desencadenantes** o activos provocan la inestabilidad y son responsables de la magnitud y velocidad de los movimientos. Los más importantes son las precipitaciones, los cambios en las condiciones hidrogeológicas de las laderas, la modificación de la geometría, la erosión y los terremotos.

### 3.3 Tipos de Rotura

#### Roturas en Suelos

Los taludes en suelos rompen generalmente a favor de superficies curvas, en la mayoría de los casos por superficies aproximadamente circulares. Las condiciones estratigráficas y geomorfológicas de los taludes definen la superficie de falla (González de Vallejo, 2002).

En la *Figura 3.2* se muestran 4 posibles superficies de rotura en suelos. En el caso de la rotura plana (a) y la rotura según una poligonal (d), están condicionadas por la presencia de estratos o capas de distinta consistencia. La rotura circular de pie (b) se da generalmente en suelos con un ángulo de fricción mayores a  $3^\circ$  o en cualquier suelo cuya pendiente de talud sea mayor a  $53^\circ$ . La rotura circular profunda (c) tiende a ocurrir en suelos cohesivos o suelos con ángulos de fricción muy pequeños. Ambas superficies pueden ser tangenciales a un estrato o capa y limitan su profundidad (Smith, 2014).

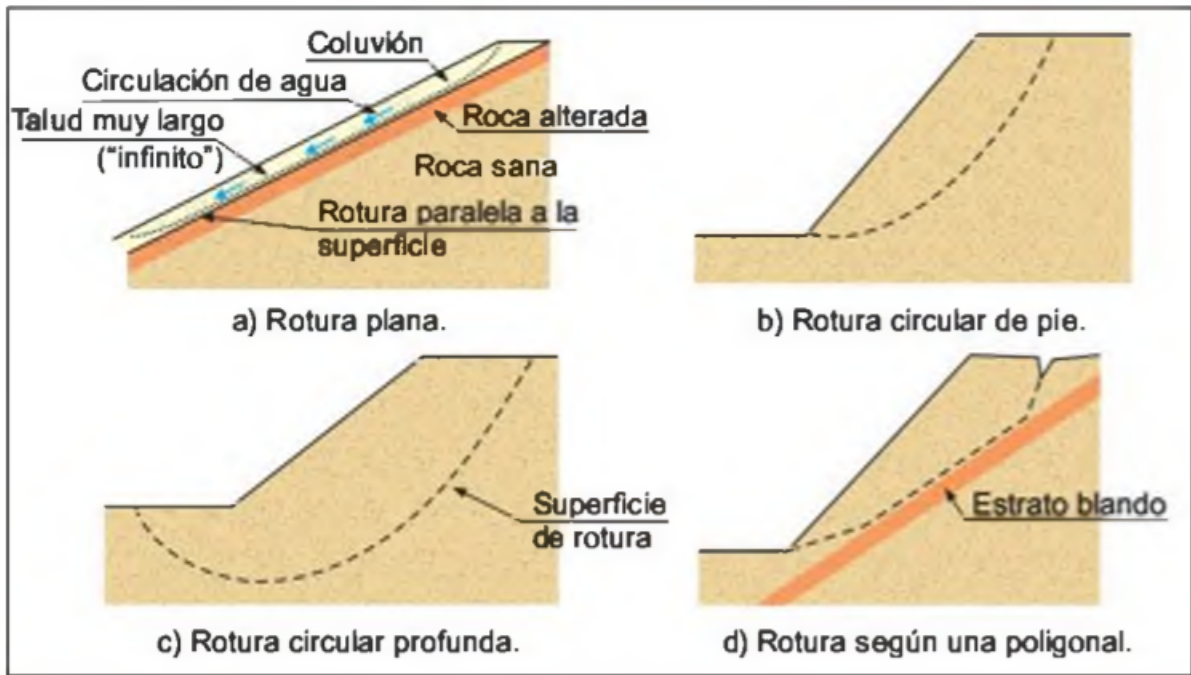


Figura 3.2: Tipos de superficie de rotura en suelos (González de Vallejo, 2002).

### Roturas en Rocas

En macizos rocosos duros o resistentes, los tipos de roturas están condicionados por la orientación y distribución de las discontinuidades con respecto al talud y al grado de fracturación del mismo. Entre menor sea la resistencia de la matriz rocosa, menor es el control estructural de los macizos rocosos (González de Vallejo, 2002). A continuación se presentan los 5 modelos de rotura más frecuente:

- 1) Rotura plana: deslizamiento de uno o más bloques a través de una superficie plana orientada sub-paralelamente a la superficie del talud y buzando a favor de este con un ángulo mayor que el de fricción interna de la superficie de rotura.
- 2) Rotura en cuña: deslizamiento de bloques limitados por 2 superficies no-paralelas y cuya línea de intersección aflora en la superficie del talud, buzando con un ángulo mayor al de fricción interna de las superficies de rotura.
- 3) Rotura por vuelco o *toppling*: caída o deslizamientos de bloques en macizos rocosos que presentan una familia de discontinuidades paralelas con buzamiento alto, con un rumbo similar a la superficie del talud y orientadas hacia el interior del mismo.

- 4) Rotura por pandeo o *buckling*: ocurre a favor de los planos de estratificación sub-paralelos a la superficie del talud con buzamiento mayor que el ángulo de fricción interna de las superficies de rotura. Los estratos deben ser relativamente esbeltos en comparación con la altura del talud.
- 5) Rotura curva: puede ocurrir en macizos rocosos blandos poco competentes y en macizos rocosos muy alterados o intensamente fracturados, que presenten un comportamiento isótropo y donde los planos de discontinuidad no controlen el comportamiento mecánico. El macizo rocoso se comporta como un suelo y la presencia de otros planos de debilidad puede condicionar los modelos de rotura. Como consecuencia de este tipo de movimiento aparecen las grietas de tracción en la parte superior del deslizamiento y hacia la dirección del movimiento.

Un talud puede presentar rotura curva en combinación de otro tipo de roturas. El esquema de la *Figura 3.3* propuesta por Hoek y Bray (1981) muestra 4 deslizamientos circulares combinados: A) Deslizamientos circular por cortante; B) Deslizamientos circular por cortante en combinación con deslizamiento plano; C) Deslizamientos circular por cortante en combinación con grieta de tracción cercana a la cabeza del talud; D) Deslizamientos circular en un macizo rocoso y a través de discontinuidades.

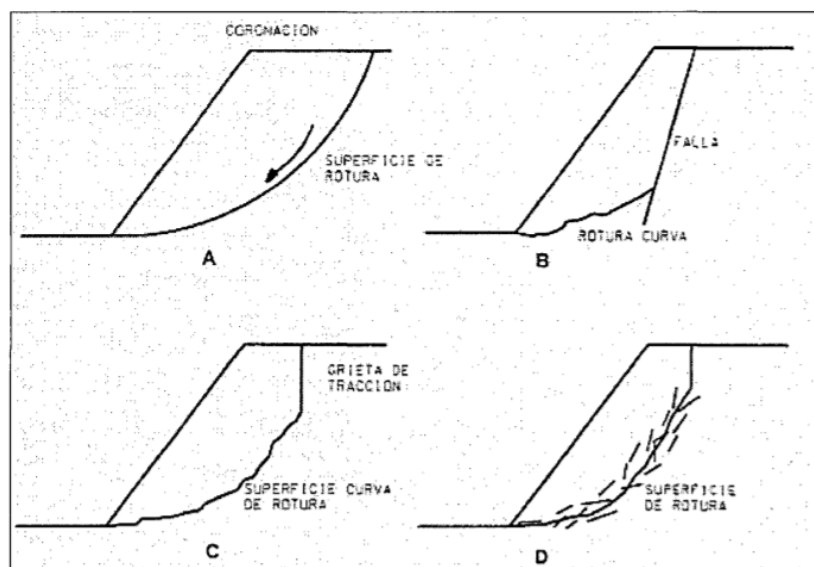


Figura 3.3: Deslizamiento circular combinado (Hoek y Bray, 1981).

Hudson y Harrison (1997) utilizan el término “deslizamiento curvilíneo” para describir un grupo de inestabilidades mostradas en la *Figura 3.4* que presentan diferentes condiciones geológicas: (a) materiales isótropos, ocurre en macizos fuertemente diaclasados, fragmentados, alterados y/o meteorizados, en rocas blandas, etc.; (b) materiales anisótropos, ocurre en macizos compuestos de rocas laminadas; (c) la superficie curva son planos de debilidad heredados del macizo original ; (d) materiales rocosos con una

resistencia poco cohesiva y de naturaleza granular; (e) materiales rocosos heterogéneos donde la diferencia entre dos materiales es muy marcada.

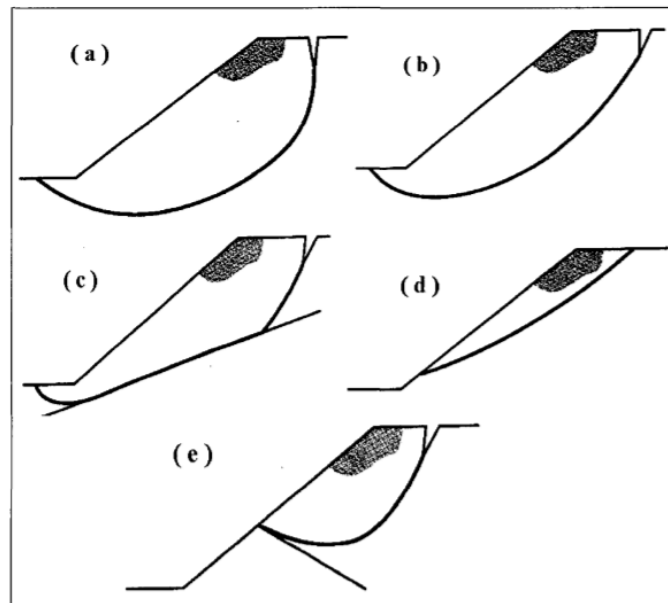


Figura 3.4: Desarrollo de deslizamientos curvilíneos (Hudson y Harrison, 1997).

### 3.4 Análisis Cinemático

El análisis cinemático (Piteau y Peckover, 1978) es una representación gráfica 2D de la fábrica estructural de un macizo rocoso o talud y es utilizado para determinar si la orientación de las discontinuidades podrían resultar en una inestabilidad. En este trabajo se emplea la proyección estereográfica de *Schmidt* mediante el software *Dips* de *Rocscience*. A continuación se indican las condiciones geométricas para la ocurrencia de una falla del talud en los modelos de rotura más frecuentes (rotura plana, en cuña y volteo):

#### Rotura Plana (Figura 3.5):

- 1) La dirección de buzamiento de la discontinuidad planar debe estar  $20^\circ$  dentro de la dirección de buzamiento de la cara del talud en ambas direcciones.
- 2) El buzamiento de la discontinuidad planar debe ser menor que la pendiente del talud, además de inclinarse hacia esta.
- 3) El buzamiento de la discontinuidad planar debe ser mayor que el ángulo de fricción de la superficie de deslizamiento.

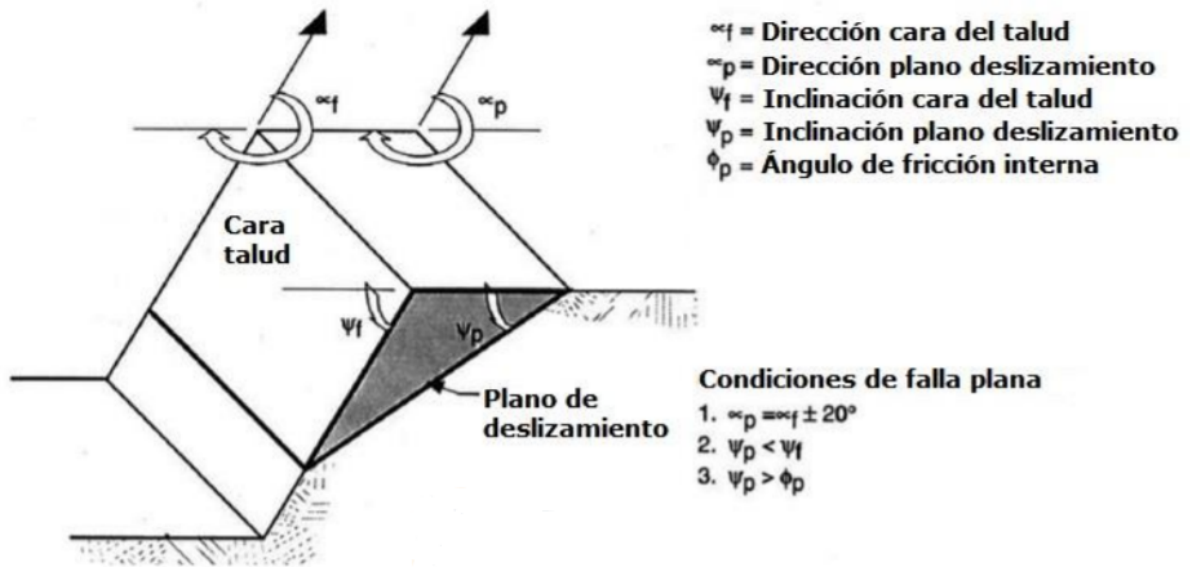


Figura 3.5: Condiciones de deslizamiento para falla plana (Monte, 2020).

**Rotura en Cuña (Figura 3.6):**

- 1) El rumbo de la línea de intersección debe ser aproximadamente igual a la dirección de buzamiento de la cara del talud.
- 2) La línea de intersección aflora en dirección hacia la cara del talud.
- 3) El buzamiento de la línea de intersección debe ser mayor que el ángulo de fricción de las superficies de deslizamiento.

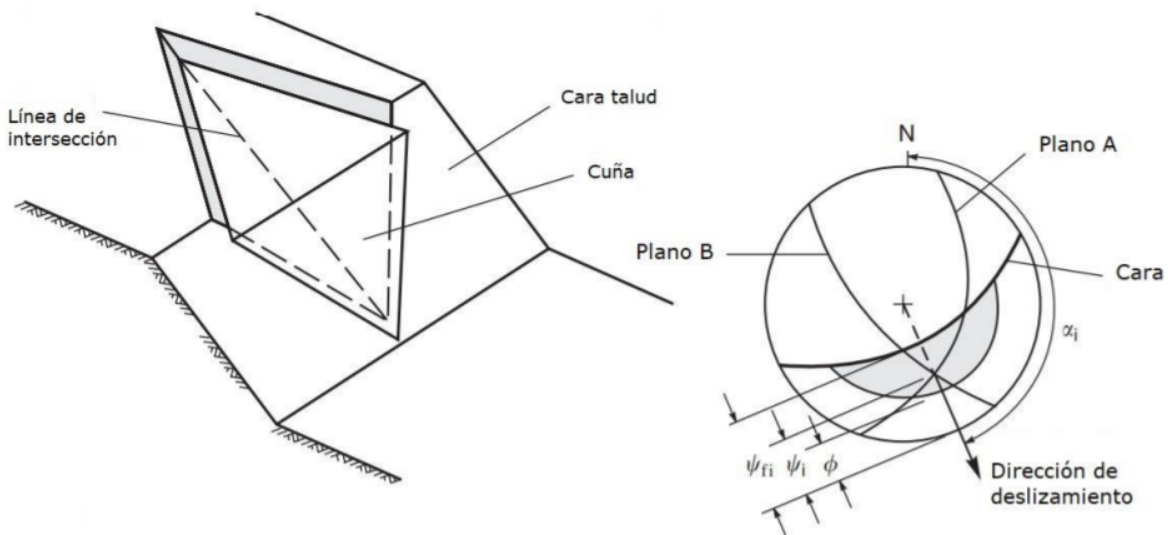


Figura 3.6: Condiciones de deslizamiento para falla en cuña (Monte, 2020).

### Rotura por Vuelco (Figura 3.7):

- 1) La dirección de buzamiento de las discontinuidades debe ser aproximadamente ortogonal a la dirección de buzamiento del talud. Por lo general, se considera que la diferencia entre la dirección de buzamiento de las discontinuidades y la dirección de buzamiento del talud debe encontrarse en un rango de entre  $160^\circ$  y  $200^\circ$  (es decir  $180^\circ \pm 20^\circ$ ).
- 2) La inmersión de la normal a los planos de discontinuidad debe ser menor que la inclinación resultante de restar al buzamiento del talud el ángulo de fricción de los planos de deslizamiento.

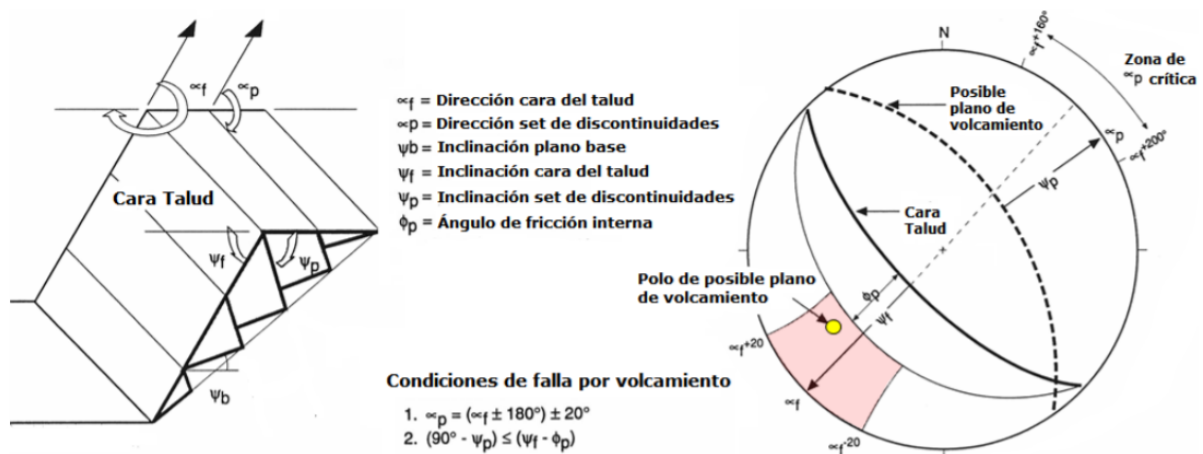


Figura 3.7: Condiciones de deslizamiento para falla por vuelco (Monte, 2020).

## 3.5 Meteorización

### Meteorización Física

La meteorización física o mecánica es un proceso de fragmentación sin un cambio químico y como consecuencia se abren las discontinuidades, se generan nuevas fracturas, la disminución del tamaño de las partículas reduce la cohesión entre ellas y aumenta la relación de vacíos y permeabilidad (Suaréz, 2009; Mitchell y Soga, 2005). Diversos subprocesos pueden contribuir a la meteorización física. Las rocas son formadas bajo grandes presiones y la erosión de la superficie puede generar una relajación de esfuerzos (Nichols y Abel (1975) en Suaréz (2009)). Como consecuencia existe una abertura de las fracturas preexistentes y nuevas fracturas pueden ser desarrolladas (Figura 3.8).

La meteorización química también puede ser un gatillante de procesos físicos y viceversa, por ejemplo al generar nuevos minerales que debilitan al material en general, o por la reducción del volumen debido a descomposición química.

Los materiales geológicos en general pueden desintegrarse por procesos de humedecimiento y secado, muy común en la superficie de nuevos cortes expuestos al medio ambiente. El resultado de esta desintegración puede provocar



descascaramiento de la superficie de los taludes (The Geological Society, 1995). Las fuerzas externas debido al agua o la actividad biológica también pueden generar una desintegración física.

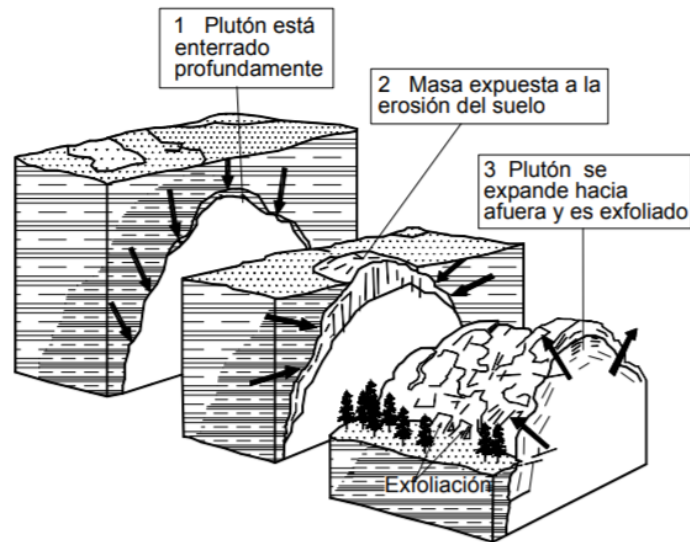


Figura 3.8: Meteorización mecánica por exfoliación luego de una descarga por erosión (Suárez,2009).

Las remociones en masa son cambios físicos en la geometría de las laderas, provocado por la meteorización diferencial en juntas heredadas del macizo rocoso original. La orientación de las nuevas fracturas está fuertemente condicionada por las estructuras preexistentes del material parental. Lo anterior termina por aumentar la superficie disponible para el ataque químico (Figura 3.9).

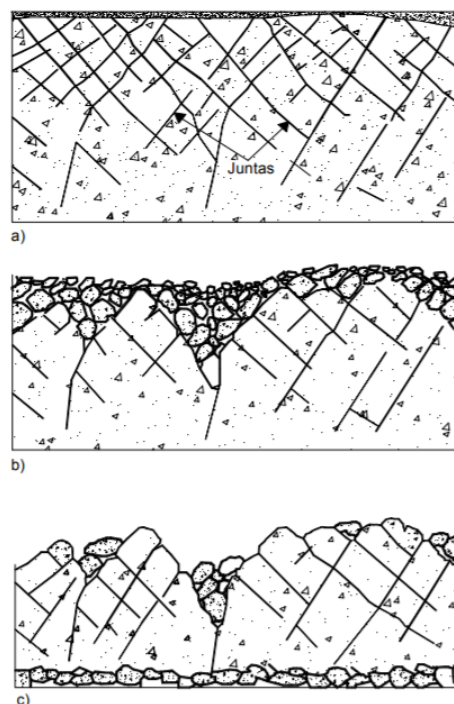


Figura 3.9: Meteorización diferencial en juntas, posterior erosión (Suárez,2009).

### Meteorización Química

La meteorización química transforma un mineral en otro distinto o bien lo disuelve por completo y depende principalmente de la disponibilidad de agua para llevar a cabo la reacción. La meteorización generalmente avanza hacia abajo de la superficie y a través de las juntas y demás conductos de percolación (Suárez, 2009). Según The Geological Society (1995), el comportamiento de un talud de suelo residual es controlado por los grandes bloques de material rocoso separados por discontinuidades cuando la meteorización es incipiente. Con el avance de la meteorización la resistencia de la matriz rocosa es el factor de importancia. Algunos procesos químicos influyentes son explicados a continuación.

La **hidrólisis** es probablemente el proceso de mayor importancia en la meteorización química, con especial susceptibilidad en minerales silíceos, los cuales reaccionan con agua para formar un ácido o base. La formación de nuevos minerales producto de la hidrólisis liberan iones en solución, como por ejemplo el ión silicato, sodio, potasio, calcio y magnesio. El agua no es el único requisito para la hidrólisis; se requiere remover los materiales en solución e ingresar al sistema iones de hidrógeno continuamente (Mitchell y Soga, 2005). La presencia de ácido carbónico acelera el proceso de meteorización química, al igual que otros ácidos producidos por bacterias, plantas y animales. Es importante conocer el pH del sistema pues condiciona la cantidad disponible de  $H^+$ , la solubilidad de  $SiO_2$  y  $Al_2O_3$  y el tipo de arcilla que pueda formarse. El **intercambio catiónico** produce el reemplazo de  $H^+$  en coloides, los iones retenidos por  $SiO_2$  y  $Al_2O_3$  influyen en el tipo de arcilla y a su vez en la propiedades físicas del material. Los cationes de calcio y sodio son fácilmente intercambiables. La **oxidación** de un mineral es controlada por la disponibilidad de oxígeno disuelto en agua y se generan soluciones ácidas. Otros procesos químicos como la **hidratación** (cambio de volumen), la **recementación** (formación de lateritas y bauxitas), o la **descomposición biológica** (acelera la meteorización) juegan un rol importante en la génesis y el estado actual del material (Figura 3.10).

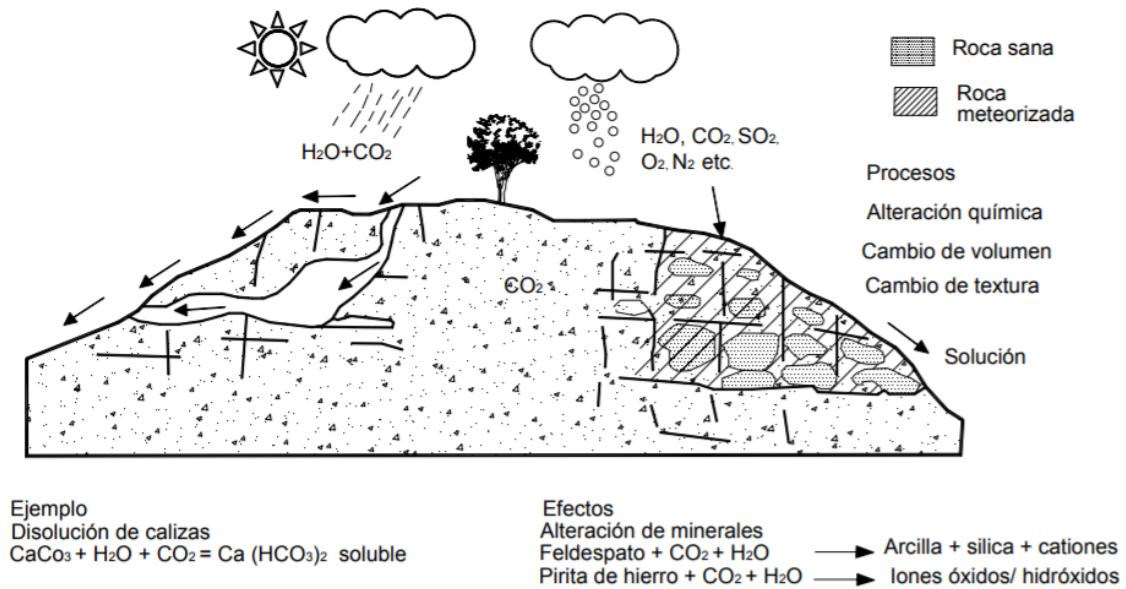


Figura 3.10: Representación esquemática del proceso de meteorización química (Geological Society Engineering Group, 1995).

### Factores que afectan la meteorización

La susceptibilidad de las rocas a la acción química es una función de su composición mineralógica, textura y presencia de fracturas (Suárez, 2009). En cuanto a su **composición mineralógica**, la meteorización química actúa sobre los minerales de manera diferencial, siendo unos más susceptibles que otros en función a la estabilidad de los minerales bajo condiciones meteorológicas. Esto permite comprender qué proceso de meteorización (física o química) es más influyente en la formación de suelos. Por ejemplo, en los suelos de origen granítico dominan los procesos químicos, en cambio, en rocas sedimentarias los procesos físicos. El **clima** es otro factor que condiciona la intensidad de meteorización y la profundidad de sus perfiles. Los suelos residuales se extienden con mayor abundancia en zonas tropicales, donde la cantidad de agua disponible es mayor. La textura y presencia de fracturas controlan la **permeabilidad** del material que se define como la capacidad que tiene dicho material para permitir el flujo de agua a través de él, y por consiguiente la tasa de meteorización. El movimiento de las aguas superficiales y subterráneas muchas veces está influenciado por el **relieve**, típicamente en sectores altos predomina la meteorización física, ciclos de humedecimiento y secado o cristalización materiales; mientras que en pendientes bajas aumenta la meteorización química y la profundidad de meteorización.

## Grado de Meteorización

En este estudio, los grados de meteorización de las rocas se determinan según las descripciones originales de Phillipson y Brand (1985) más tarde adoptadas por el ISRM (1981). Consta de 6 grados de descomposición desde roca intacta (grado I) hasta suelo residual (grado VI). La decoloración de los minerales además de la textura y la fábrica de los materiales son las principales características indicadores del grado.

Tabla 3.2: Perfil de meteorización Phillipson y Brand (1985).

Grado	Descomposición	Detalles de Diagnóstico en las Muestras
VI	Suelo	Todos los materiales de roca se convirtieron en suelo. La estructura y la textura de la roca fueron totalmente destruidas. No aparece textura reconocible de roca. El material generalmente es limoso o arcilloso y muestra un color relativamente homogéneo. Las capas superficiales pueden contener materia orgánica y raíces.
V	Completamente descompuesta	Todos los materiales de roca se convirtieron en suelo. Roca completamente descompuesta, pero aún aparece textura de roca ligeramente reconocible. Los materiales son arenosos y friables si se sumergen en agua o se presionan con la mano.
IV	Muy descompuesta	El material de roca se encuentra en una etapa de transición para formar suelo. En sectores aparece roca y suelo. El material se encuentra totalmente decolorado, pero la fábrica se conserva y la estructura del macizo rocoso se mantiene parcialmente. Pedazos grandes que pueden ser destruidos con las manos.
III	Moderadamente descompuesta	Los materiales de roca muestran decoloración parcial. La estructura y la fábrica de la roca se conservan completamente. Las discontinuidades comúnmente están rellenas de materiales ricos en hierro. Pedazos grandes que no pueden ser descompuestos por las manos (muestras tomadas con broca a rotación).
II	Algo descompuesta	Hay decoloración a lo largo de las discontinuidades y parcialmente, en la masa de roca. La estructura y la textura se conservan completamente. Aparece como roca sana pero tiene manchas con muestras de descomposición. Los ángulos de los fragmentos no pueden ser destruidos fácilmente.
I	Roca sana	No hay signos visibles de meteorización, aunque puede haber alguna decoloración en las superficies de las discontinuidades más importantes.

Tabla 3.3: Perfil de meteorización ISRM (1981).







Evaluación del grado de meteorización del macizo rocoso		
Grado de meteorización	Tipo	Descripción
I	Fresco	No aparecen signos de meteorización.
II	Ligeramente meteorizado	La decoloración indica alteración del material rocoso y de las superficies de discontinuidad. Todo el conjunto rocoso está decolorado por meteorización.
III	Moderadamente meteorizado	Menos de la mitad del macizo rocoso aparece descompuesto y/o transformado en suelo. La roca fresca o decolorada aparece como una estructura continua o como núcleos aislados.
IV	Altamente meteorizado	Más de la mitad del macizo rocoso aparece descompuesto y/o transformado en suelo. La roca fresca o decolorada aparece como una estructura continua o como núcleos aislados.
V	Completamente meteorizado	Todo el macizo rocoso aparece descompuesto y/o transformado en suelo. Se conserva la estructura original del macizo rocoso.
VI	Suelo residual	Todo el macizo rocoso se ha transformado en un suelo. Se ha destruido la estructura del macizo y la fábrica del material.

(ISRM, 1981).

### 3.6 Geological Strength Index

La clasificación geomecánica GSI para macizos rocosos fue desarrollada inicialmente por Hoek (1994), Hoek et al. (1995) y Hoek y Brown (1997). Luego se incluyen las extensiones de Hoek et al. (1998) y Marinos y Hoek (2000, 2001) para macizos rocosos de baja calidad y heterogéneos. El índice es determinado mediante la evaluación visual de la litología, estructura y estado de las discontinuidades en un afloramiento, superficie de excavación o sondeo.

Tabla 3.4: GSI para macizos rocosos (Hoek y Marinos, 2000).

<p><b>GEOLOGICAL STRENGTH INDEX FOR JOINTED ROCKS (Hoek and Marinos, 2000)</b></p> <p>From the lithology, structure and surface conditions of the discontinuities, estimate the average value of GSI. Do not try to be too precise. Quoting a range from 33 to 37 is more realistic than stating that GSI = 35. Note that the table does not apply to structurally controlled failures. Where weak planar structural planes are present in an unfavourable orientation with respect to the excavation face, these will dominate the rock mass behaviour. The shear strength of surfaces in rocks that are prone to deterioration as a result of changes in moisture content will be reduced if water is present. When working with rocks in the fair to very poor categories, a shift to the right may be made for wet conditions. Water pressure is dealt with by effective stress analysis.</p>		<p><b>SURFACE CONDITIONS</b></p> <p><b>VERY GOOD</b> Very rough, fresh unweathered surfaces</p> <p><b>GOOD</b> Rough, slightly weathered, iron stained surfaces</p> <p><b>FAIR</b> Smooth, moderately weathered and altered surfaces</p> <p><b>POOR</b> Slickensided, highly weathered surfaces with compact coatings or fillings or angular fragments</p> <p><b>VERY POOR</b> Slickensided, highly weathered surfaces with soft clay coatings or fillings</p>				
<p><b>STRUCTURE</b></p>		<p><b>DECREASING SURFACE QUALITY</b> →</p>				
 <p><b>INTACT OR MASSIVE</b> - intact rock specimens or massive in situ rock with few widely spaced discontinuities</p>	90			N/A	N/A	
 <p><b>BLOCKY</b> - well interlocked undisturbed rock mass consisting of cubical blocks formed by three intersecting discontinuity sets</p>	80	70				
 <p><b>VERY BLOCKY</b>- interlocked, partially disturbed mass with multi-faceted angular blocks formed by 4 or more joint sets</p>		60	50			
 <p><b>BLOCKY/DISTURBED/SEAMY</b> - folded with angular blocks formed by many intersecting discontinuity sets. Persistence of bedding planes or schistosity</p>			40	30		
 <p><b>DISINTEGRATED</b> - poorly interlocked, heavily broken rock mass with mixture of angular and rounded rock pieces</p>				20		
 <p><b>LAMINATED/SHEARED</b> - Lack of blockiness due to close spacing of weak schistosity or shear planes</p>	N/A	N/A			10	

### 3.7 Clasificación de Suelos Residuales

La clasificación más difundida en suelos residuales es propuesta por Wesley (1997), basado en los que según el autor, son los aspectos más importantes de un suelo: **composición** (naturaleza de las partículas, tamaño, forma, mineralogía) y **estructura** (estado en el que se encuentran las partículas).

#### Composición

- a) Suelos sin una fuerte influencia mineralógica con arcillas de baja actividad: se incluyen suelos derivados de la meteorización de areniscas y rocas ígneas ácidas e intermedias. Generalmente son suelos de grano grueso (grava, arena) con menor contenido de finos (limo, arcilla). Las estructuras presentes son el factor de mayor importancia en el comportamiento.
- b) Suelos con una fuerte influencia de minerales de arcilla: se incluyen suelos oscuros con materia orgánica (vertisols) en donde los minerales del grupo de la esmectita son dominantes. Poseen en general alta compresibilidad, potencial de hinchamiento y bajas propiedades de ingeniería.
- c) Suelos con una fuerte influencia mineralógica de arcillas no sedimentarias: la haloisita y la alofana son minerales de arcilla silicatados generalmente de origen volcánico. Se incluyen los sesquióxidos como la gibbsita y la goethita.

#### Estructura

- a) Macro-estructura: son aspectos discernibles a simple vista, incluye estratificación, discontinuidades, fisuras, poros y presencia de bloques.
- b) Micro-estructura: son aspectos no discernibles a simple vista, incluye fábrica, cementación de partículas, agregado de partículas, poros, etc. Son difíciles de identificar, pero se pueden inferir al evaluar los efectos de la sensibilidad, el remoldeado o el índice de liquidez.

Tabla 3.5: Clasificación Wesley (2009) de suelos residuales.

Grupo	Subgrupo	Identificación	Comentarios
A - Suelos sin influencia mineralógica fuerte	Influencia fuerte de la macro-estructura	Inspección visual.	Este es un grupo muy grande de suelos, incluyendo los saprolitos, cuyo comportamiento en las laderas está dominado por la influencia de las discontinuidades, fisuras, etc.
	Influencia fuerte de la micro-estructura	Inspección visual y evaluación de la sensibilidad, índice de liquidez y efecto del remoldeado.	Son suelos esencialmente homogéneos completamente meteorizados. Se evalúan las discontinuidades heredadas para comprender su comportamiento.
	Poca influencia de la estructura	Poca o nula sensibilidad, apariencia uniforme.	Se comportan en forma similar a los suelos moderadamente sobreconsolidados.
B - Suelos fuertemente influenciados por minerales comunes	Grupo de la esmectita	Color oscuro, alta plasticidad.	Suelos problemáticos encontrados en zonas planas; son de baja resistencia, alta compresibilidad y características fuertes de expansión y contracción.
	Otros minerales de arcilla		
C - Suelos fuertemente influenciados por minerales arcillosos propios de los suelos residuales	Grupo de los alófanos	Posición en la carta de plasticidad, cambios irreversibles tras secado.	Altos límites líquidos y plásticos. Las características de ingeniería son generalmente buenas, aunque en algunos casos, la alta sensibilidad hace difícil el manejo y la compactación.
	Grupo de la Halosita	Color rojizo, la topografía favorece el drenaje, origen volcánico.	Suelos finos de baja a media plasticidad, pero de baja actividad. Las propiedades de ingeniería son generalmente buenas.
	Grupo de los sesquióxidos	Nula o poca plasticidad, apariencia granular o nodular.	Es un grupo muy amplio que van desde arcillas limosas hasta gravas y arenas gruesas. Su comportamiento varía desde la baja plasticidad hasta la grava no plástica.

### 3.8 Parámetros resistentes de discontinuidades con relleno

La resistencia al cortante de los planos de debilidad está condicionado por el tipo y espesor de su relleno. Estos pueden ser arcillas (este trabajo), brechas o minerales cristalizados.

Según la *Tabla 3.6*, el ángulo de fricción de las discontinuidades depende tanto del relleno como de la litología de la roca. El granito y el basalto son las litologías que más se asemejan a las encontradas en terreno (granodiorita y andesita). El valor utilizado para los análisis cinemáticos es de 42° para ambas litologías. Este valor es considerado elevado puesto que no considera el efecto de la meteorización.

Tabla 3.6: Parámetros resistentes de discontinuidades con relleno (González de Vallejo, 2002).

Roca	Descripción	Resistencia de pico		Resistencia residual	
		Cohesión (kg/cm <sup>2</sup> )	Ángulo de fricción (°)	Cohesión (kg/cm <sup>2</sup> )	Ángulo de fricción (°)
Basalto	Brecha arcillosa con fragmentos rocosos.	2,4	42		
Caliza	Relleno arcilloso de 6 mm.	1	13-14	0	13
	Id. de 1 a 2 cm.	0,5-2	17-21		
	Id. < 1 mm.	0	25	0	15-24
Diorita	Marga de 2 cm.	0	26,5		
	Relleno de arcilla.	0,41	14,5	0,22	17
Dolomía	Relleno arcilloso de ≈ 15 cm de espesor.				
Esquistos y cuarcitas	Relleno arcilloso 10-15 cm de espesor.	0,3-0,8	32		
	Relleno arcilloso fino en planos de estratificación.	6,1-7,4	41		
	Relleno arcilloso espeso en planos de estratificación.	3,8	31		
Granito	Fallas con relleno arcilloso.	0-1,0	24-25		
	Fallas con relleno arenoso.	0,5	40		
	Zona de cizalla, granito roto, roca desintegrada y rellenos arcillosos.	2,42	42		
Grauvaca	Relleno arcilloso de 1-2 mm en planos de estratificación.			0	21
Lutita	Relleno de arcilla.	0,6	32		
	Arcilla en planos de estratificación.			0	19,5
Pizarra	Alteradas y laminadas	0,5	33		



## Capítulo 4: Resultados

El terreno programado hacia la Cuesta El Melón consta de 2 días de terreno con una duración aproximada de 11 hrs. Se recorre la ruta desde el acceso norte dirección Catapilco-El Melón. Se observa abundante flujo vehicular al ser una ruta alternativa al Túnel El Melón (*Figura 4.1*).



Figura 4.1: Ruta E-47 “Cuesta El Melón” en rojo y Ruta 5 en amarillo(imágen de Google Earth).

Según el mapa geológico en las hojas de Quillota-Portillo (SERNAGEOMIN, 1993), la cuesta intersecta a las formaciones estratificadas de la Formación Ajial y a las rocas intrusivas de la Unidad Cavilolén. Se organiza por consiguiente el análisis en 2 partes correspondientes a taludes excavados en rocas intrusivas y estratificadas.

## 4.1 Rocas Intrusivas



Figura 4.2: Taludes analizados en rocas intrusivas (imagen de Google Earth).


Las rocas son parte de la Unidad Cavilolén y a su vez parte de la Superunidad Mincha de edad Jurásica. Los taludes fueron excavados en el plutón El Melón-Catapilco (Rivano, 1996). La litología corresponde a una roca ígnea intrusiva de textura fanerítica equigranular clasificada por componentes QAP como granodiorita de hornblenda. Está mineralógicamente compuesta principalmente por cuarzo (40%), plagioclasa (25%), feldespato potásico (10%), hornblenda (20%) y biotita (5%). Adicionalmente se observa reemplazo parcial a total de minerales secundarios como biotitas (reemplazando a hornblenda), arcillas y sesquióxidos producto de la avanzada meteorización de los macizos rocosos.

En los 7 taludes analizados se observan rocas con grados de meteorización III o superior según las descripciones de Phillipson y Brand (1985). A continuación se describen los materiales encontrados en terreno.


**Grado VI - Suelo Residual:** material arenoso no-consolidado color rojizo oscuro. Se encuentra regularmente en las coronas de los taludes con espesores no superiores a 1m. Contiene material orgánico vegetal de tipo matorral.

	<b>Nombre</b>	Arena (suelo residual)
	<b>Selección</b>	Moderadamente seleccionado,
	<b>Forma de clastos</b>	Muy angulares, baja esfericidad
	<b>Componentes</b>	Clastos inequigranulares sin matriz ni cemento (qz, bt, sesquióxidos, arcillas)
	<b>Estructuras sedimentarias</b>	No se observa
	<b>Grado de Meteorización</b>	VI


Grado V - Completamente Meteorizada: material descompuesto que aún preserva algunas estructuras del macizo original como diaclasas. El grado de meteorización de las discontinuidades es similar al de la matriz.

	<b>Nombre</b>	Granodiorita
	<b>Textura</b>	Fanerítica inequigranular
	<b>Composición</b>	Qz, Bt, OxFe, arcillas
	<b>Alteración</b>	Oxidación, sericitización, biotización
	<b>Morfologías</b>	No se observa
	<b>Grado de Meteorización</b>	V

Grado IV - Muy Meteorizada: material parcialmente decolorado, se preserva la textura y fábrica de la roca inalterada. Los bloques son bien definidos delimitados por discontinuidades con mayor grado de meteorización.

	<b>Nombre</b>	Granodiorita
	<b>Textura</b>	Fanerítica equigranular
	<b>Composición</b>	Qz, Plg, FelK, Bt, Hb
	<b>Alteración</b>	Oxidación, sericitización, biotización
	<b>Morfologías</b>	Enclaves máficos
	<b>Grado de Meteorización</b>	IV

Grado III - Moderadamente Meteorizada: los materiales muestran una suave decoloración y se preserva completamente la textura de roca. Está presente como bloques aislados generalmente en la base de los taludes.

	<b>Nombre</b>	Granodiorita
	<b>Textura</b>	Fanerítica equigranular
	<b>Composición</b>	Qz, Plg, FelK, Bt, Hb
	<b>Alteración</b>	Oxidación, sericitización
	<b>Morfologías</b>	Enclaves máficos
	<b>Grado de Meteorización</b>	III



## Talud 1.1

GPS: 325933S/712374W

Se observa talud aproximadamente de 11 m de altura y 80 m de largo, pendiente promedio de 66° y orientación noroeste. Su color predominante es anaranjado pálido con tonalidades rojizas. Presencia de vegetación en la corona y en la cara superficial del talud.

### GSI Talud 1.1

- Grado IV: estructura clasificada como *Very Blocky*, condición de las superficies de las discontinuidades clasificada como *Poor*. **GSI: 45-25**. Más de la mitad de la matriz rocosa se encuentra descompuesta y su estructura heredada en bloques se conserva.
- Grado V: estructura clasificada como *Blocky/Disturbed/Seamy*, condición de las superficies de las discontinuidades clasificada como *Very Poor*. **GSI: 25-15**. Más de la mitad de la matriz rocosa se encuentra descompuesta y su estructura heredada es reconocible a pesar de las nuevas discontinuidades no-sistemáticas generadas producto de la deformación.
- Grado VI: GSI no aplicable.

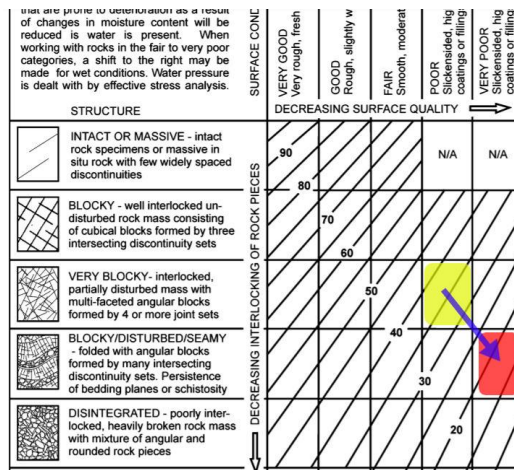


Figura 4.3: Esquema GSI para Talud 1.1.

## Perfil de meteorización Talud 1.1



Figura 4.4: Perfil de meteorización Talud 1.1.

## Análisis Cinemático Talud 1.1

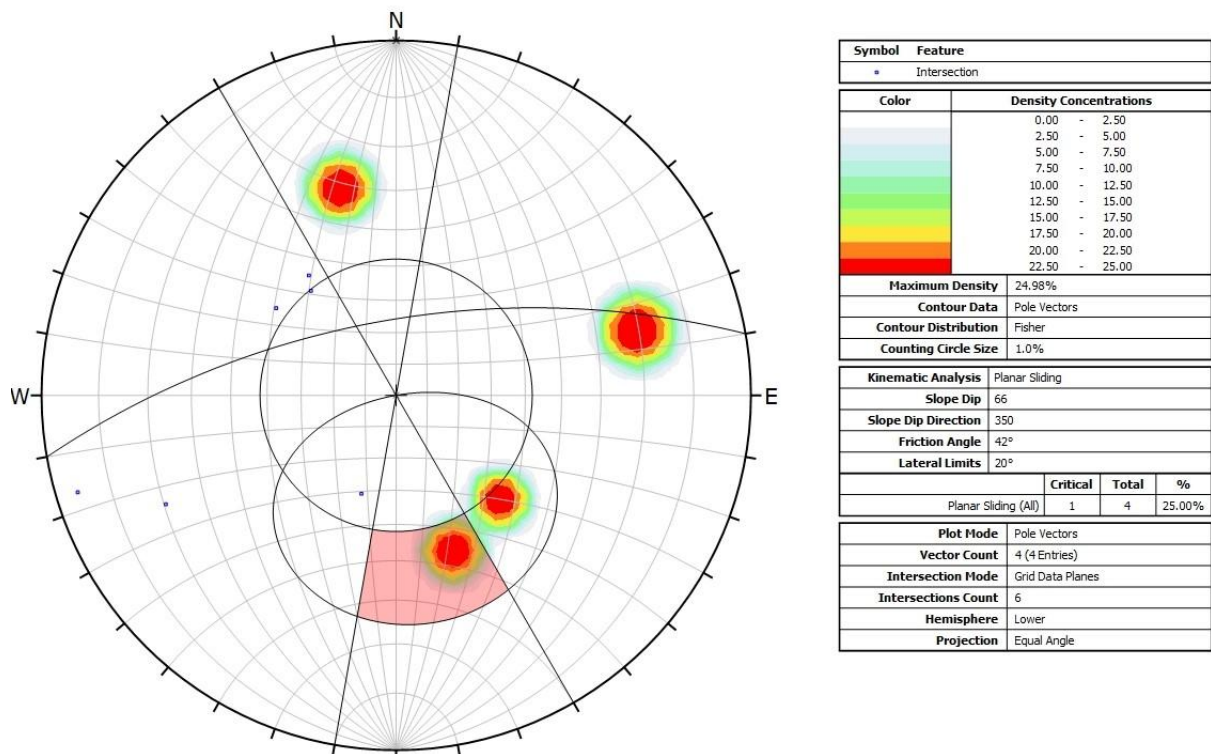


Figura 4.5: Análisis cinemático de rotura plana en Talud 1.1.

Con el análisis cinemático se interpreta que la rotura plana es el modelo más probable para un deslizamiento traslacional. Existen dos planos potencialmente críticos pero solo uno de ellos se encuentra dentro del rumbo  $\pm 20$  del talud y cae en la zona crítica roja (grado V). El otro set (grado IV) es igualmente inestable si se

consideran variaciones en la orientación del talud. Lo anterior puede condicionar futuras remociones en masa como deslizamientos traslacionales de bloques y suelo.

## **Talud 1.2**

GPS: 325932S/712363W

Se observa talud aproximadamente de 10 m de altura y 55 m de largo, pendiente promedio de 70° y orientación noroeste. Su color predominante es anaranjado pálido con tonalidades rojizas. Presencia de vegetación en la corona y en la cara superficial del talud.

### Perfil de Meteorización Talud 1.2



Figura 4.6: Perfil de meteorización Talud 1.2.

### GSI Talud 1.2

- Grado IV: estructura clasificada como *Very Blocky*, condición de las superficies de las discontinuidades clasificada como *Poor*. **GSI: 45-25.**
- Grado V: estructura clasificada como *Blocky/Disturbed/Seamy*, condición de las superficies de las discontinuidades clasificada como *Very Poor*. **GSI: 25-10.** La presencia de bloques bien definidos separa ambas zonas y condiciona los tipos de deslizamientos traslacionales (grado IV) y rotacionales (grado V-VI).
- Grado VI: GSI no aplicable.



## Análisis Cinemático Talud 1.2

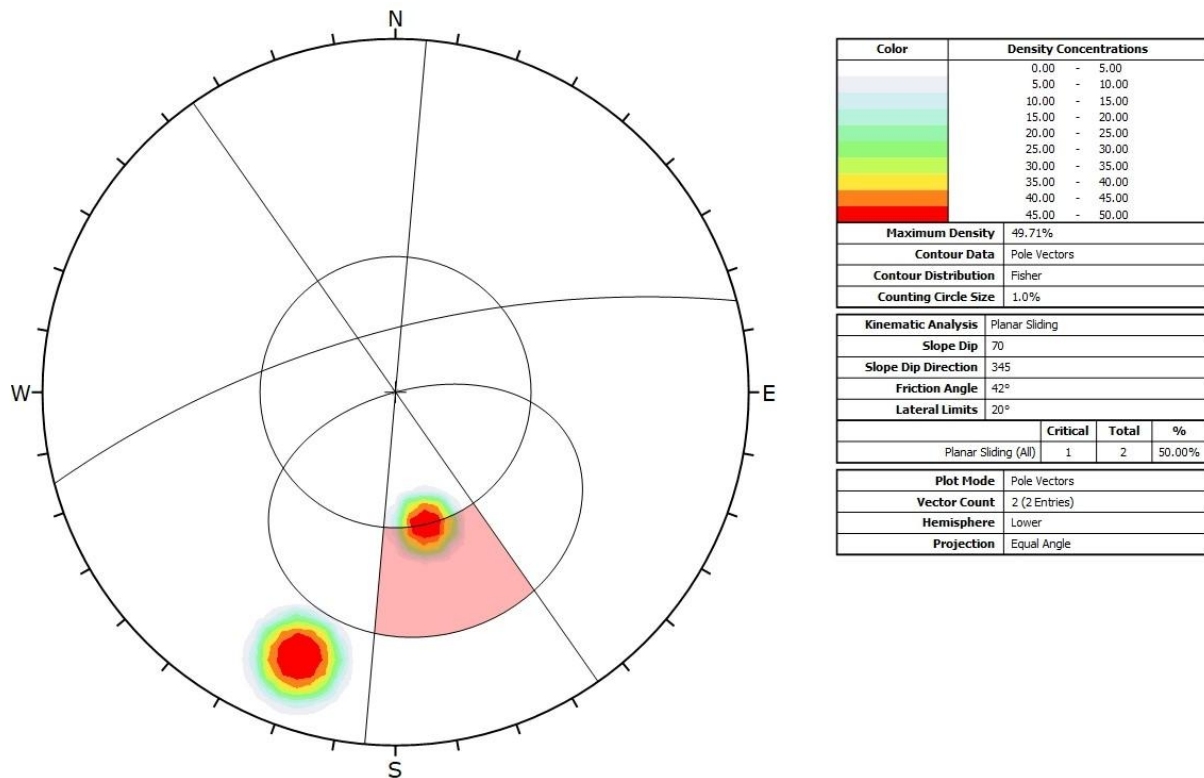


Figura 4.7: Análisis cinemático de rotura plana en Talud 1.2.

El modelo de rotura plana es el más probable según el análisis de estabilidad (*Figura 4.7*) y se condice con lo observado en terreno. En la *Figura 4.6* es posible apreciar deslizamientos de bloques en la base del talud. Las grietas de tracción identificadas en este caso favorece a la estabilidad que el ángulo de rozamiento real sea mayor al bibliográfico utilizado para este análisis, pues se disminuye el radio de la circunferencia central en la red estereográfica. En el caso contrario, una disminución del ángulo de fricción favorece la rotura a través de este plano, condición que puede existir, por ejemplo, con el aumento de la humedad.

## **Talud 1.3**

GPS: 325934S/712352W

Se observa talud aproximadamente de 10 m de altura y 56 m de largo, pendiente promedio de 68° orientación noreste (68/10). Se encuentra estabilizado por abundante presencia de vegetación en la corona y en la cara superficial del talud. Sin medidas ni fotografías. Corresponde en su mayoría a suelo residual de textura arenosa con algunos bloques angulares aislados observables en la cara del talud. GSI no aplicable. Remociones observadas: Caída de tierra.

## Talud 1.4

GPS: 325933S/712335W

Se observa talud aproximadamente de 10 m de altura y 52 m de largo, pendiente promedio de  $70^\circ$  o superior y orientación noroeste. Se observa dique de composición máfica textura porfírica color de masa fundamental gris oscuro con tonalidades rojizas en la superficies de discontinuidades. Es la discontinuidad de mayor relevancia en el proceso de meteorización ya que controla la permeabilidad local del macizo rocoso permitiendo un mayor intercambio entre roca y fluido. Se observa un mayor grado de fracturamiento (cambio estructural) y decoloración (cambio composicional) en zonas cercanas a la estructura principal.

### Perfil de Meteorización Talud 1.4



Figura 4.8: Perfil de meteorización Talud 1.4.

### GSI Talud 1.4

- Grado III: estructura clasificada como *Blocky*, condición de las superficies de las discontinuidades clasificada como *Fair*. **GSI: 65-45**
- Grado IV: estructura clasificada como *Very Blocky*, condición de las superficies de las discontinuidades clasificada como *Poor*. **GSI: 45-25**
- Grado V: estructura clasificada como *Blocky/Disturbed/Seamy*, condición de las superficies de las discontinuidades clasificada como *Very Poor*. **GSI: 25-10**
- Grado VI: no aplicable.



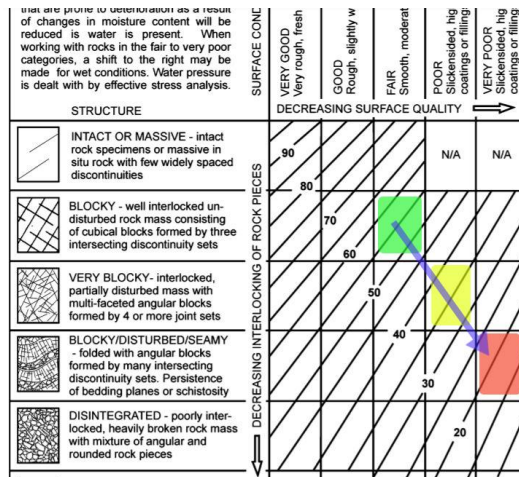


Figura 4.9: Esquema GSI para Talud 1.4.

### Análisis Cinemático Talud 1.4

El análisis cinemático indica 1 set crítico que reúne las condiciones geométricas de inestabilidad en cuña, pero otras 3 intersecciones cercanas a la zona de inestabilidad pueden ser potencialmente críticas. La condición necesaria para que estas intersecciones queden incluidas en la zona roja de la *Figura 4.10* es un aumento en la pendiente del talud en aproximadamente  $10^\circ$ . Las orientaciones de las discontinuidades se midieron en zonas cercanas al pie del talud, pero basado en las observaciones en terreno, la condición anterior puede ocurrir en zonas cercanas a la corona del talud, en donde se observa un sutil aumento de inclinación.

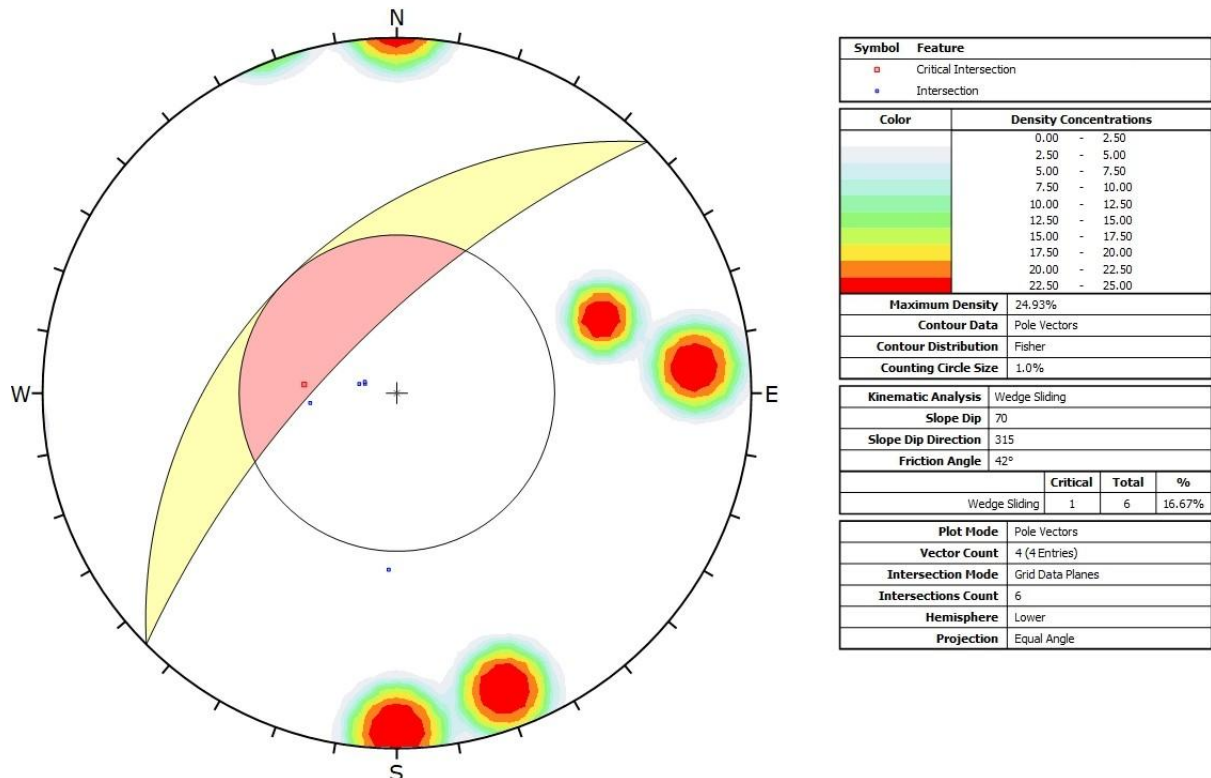


Figura 4.10: Análisis cinemático de rotura en cuña en Talud 1.4.

## Talud 1.5

GPS: 325941S/712350W

Se observa talud aproximadamente de 20 m de altura y 60 m de largo, pendiente promedio de 45° y orientación noroeste. Su color predominante es anaranjado pálido con tonalidades rojizas. Presencia de vegetación en la corona y en la cara superficial del talud. Se caracteriza por la presencia de bloques con grado de meteorización III.

### Perfil de Meteorización Talud 1.5



Figura 4.11: Perfil de meteorización Talud 1.5.

### GSI Talud 1.5

Grado IV: estructura clasificada entre *Blocky* y *Very Blocky*, condición de las superficies de las discontinuidades clasificada como Poor. **GSI: 50-30.**

Small text at top left: Small scale joints or discontinuities also as a result of changes in moisture content will be reduced if water is present. When working with rocks in the fair to very poor categories, a shift to the right may be made for wet conditions. Water pressure is dealt with by effective stress analysis.

STRUCTURE	DECREASING INTERLOCKING OF ROCK PIECES	DECREASING SURFACE QUALITY	VERY GOOD Very rough, fresh	GOOD Rough, slightly w	FAIR Smooth, moderate	POOR Slickensided, big coatings or filling	VERY POOR Slickensided, big coatings or filling
INTACT OR MASSIVE - intact rock specimens or massive in situ rock with few widely spaced discontinuities	90					N/A	N/A
BLOCKY - well interlocked undisturbed rock mass consisting of cubical blocks formed by three intersecting discontinuity sets	80						
VERY BLOCKY - interlocked, partially disturbed mass with multi-faceted angular blocks formed by 4 or more joint sets	70						
BLOCKY/DISTURBED/SEAMY - folded with angular blocks formed by many intersecting discontinuity sets. Persistence of bedding planes or schistosity	60						
DISINTEGRATED - poorly interlocked, heavily broken rock mass with mixture of angular and rounded rock pieces	50						
	40						
	30						
	20						

Figura 4.12: Esquema GSI para Talud 1.5.

## Análisis Cinemático Talud 1.5

El análisis de rotura plana (*Figura 4.13*) indica 1 set crítico con probabilidad alta de falla considerando un ángulo de fricción elevado ( $42^\circ$ ). Entre menor sea dicho ángulo, mayor probabilidad de falla existe.

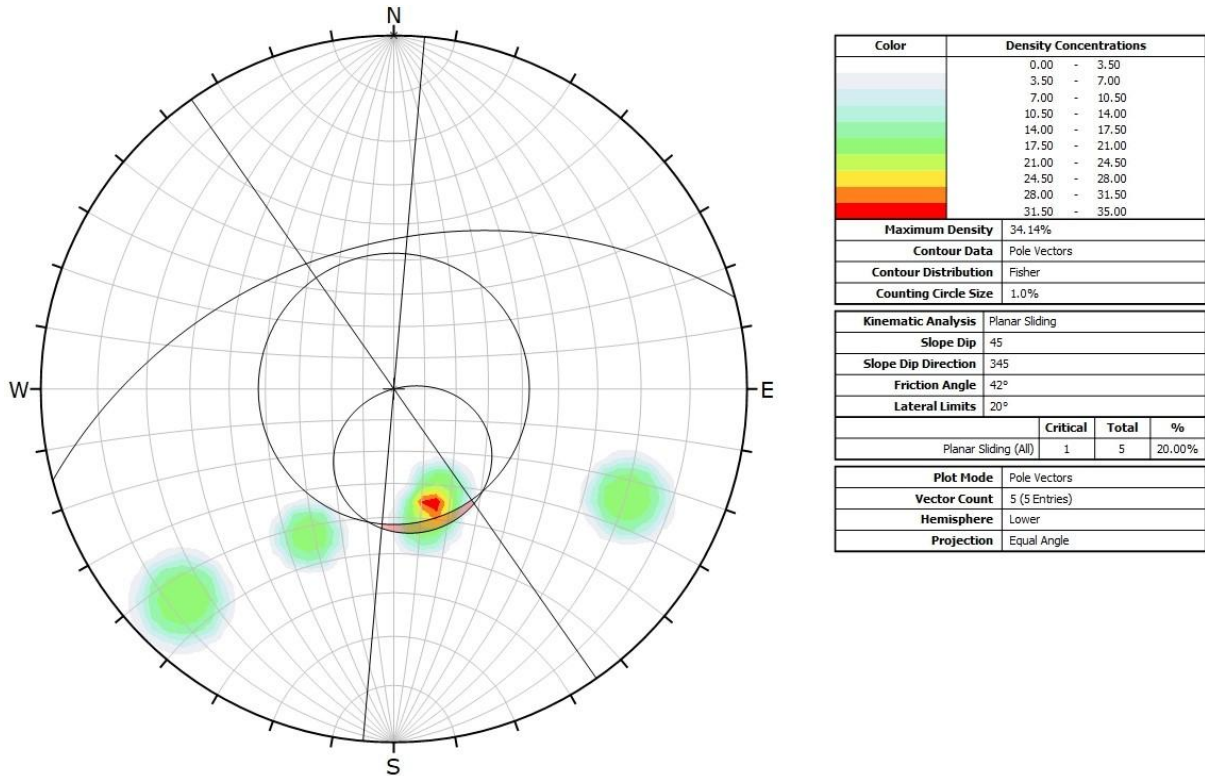


Figura 4.13: Análisis cinemático de rotura plana en Talud 1.5.

El análisis de rotura en cuña (*Figura 4.14*) muestra que todas las intersecciones son potencialmente inestables, pero solo 2 de ellas son críticas. Si aumenta la diferencia entre el ángulo del talud y el ángulo de rozamiento, aumenta también la probabilidad de falla.



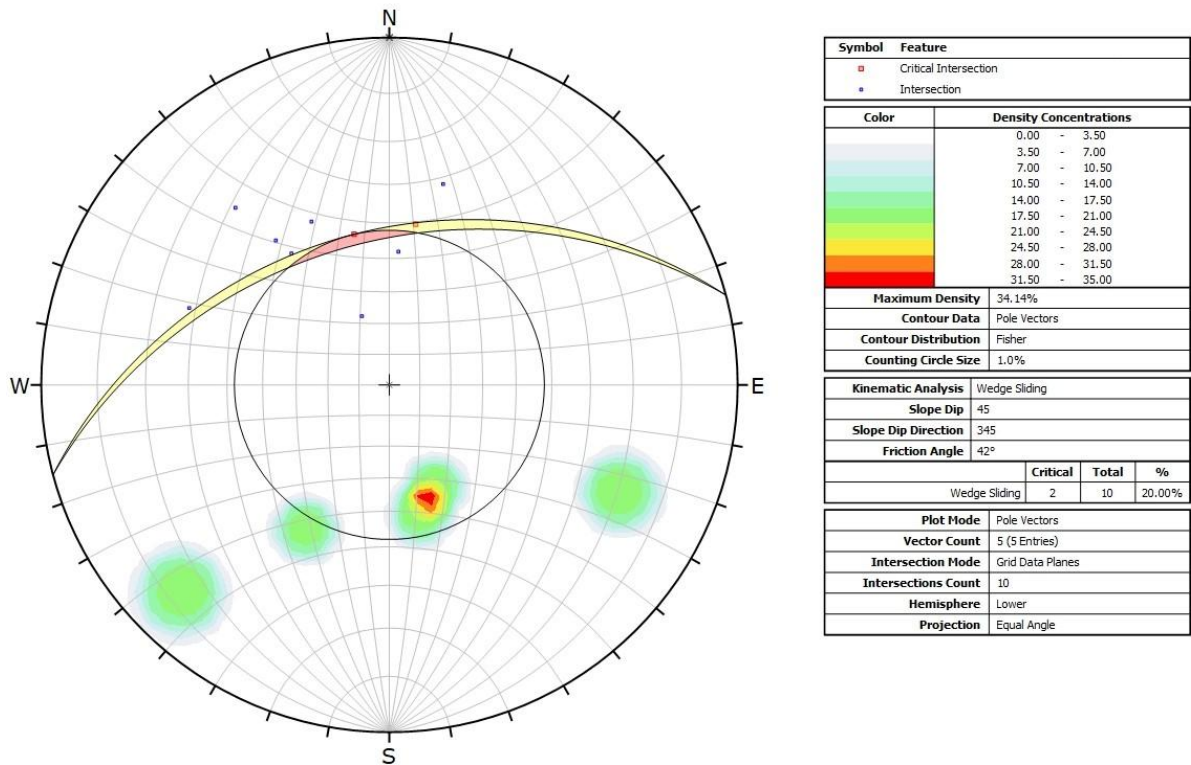


Figura 4.14: Análisis cinemático de rotura en cuña en Talud 1.5.

Figura 4.15: Izquierda: deslizamiento de bloques por rotura plana; Derecha: deslizamiento de bloques por rotura en cuña.

Los deslizamientos traslacionales de bloques pueden ser observados a simple vista en terreno (Figura 4.15). El macizo rocoso en esta zona se comporta como roca controlado por su estructura (orientación de discontinuidades) que favorece la ocurrencia de ambos tipos de rotura, a pesar de que aproximadamente la mitad de la matriz rocosa se encuentra alterada.





## Talud 1.6

GPS: 325941S/712365W

Se observa talud aproximadamente de 10 m de altura y 80 m de largo, pendiente promedio de  $65^\circ$  y orientación noroeste. Su color predominante es anaranjado pálido con tonalidades rojizas. Presencia de vegetación en la corona y en la cara superficial del talud. Se observa pronunciada estructura tabular identificada como dique máfico de textura porfírica de 4 m de espesor, caracterizado por su color rojizo y grano fino. Este se encuentra de igual manera meteorizado y generando un suelo pedregoso angular. Al menos 2 estructuras adicionales son identificadas, orientadas de forma subparalela aunque con menor espesor. En los contactos dique-matriz rocosa se observa una mayor concentración de minerales secundarios como arcillas y clorita, además de óxidos de hierro y manganeso.

### Perfil de Meteorización Talud 1.6



Figura 4.16: Perfil de meteorización Talud 1.6.

### GSI Talud 1.6

- Grado IV: estructura clasificada como *Blocky*, condición de las superficies de las discontinuidades clasificada como *Poor*. **GSI: 55-35.**
- Grado V: estructura clasificada como *Very Blocky*, condición de las superficies de las discontinuidades clasificada como *Very Poor*. **GSI: 35-15.**
- Grado VI: no aplicable.

### Análisis Cinemático Talud 1.6

El análisis cinemático en la zona de grado IV indica que un solo plano cumple con las condiciones de inestabilidad por rotura planar (*Figura 4.17*). Los materiales con grado de meteorización IV muestran evidencias de deslizamientos traslacionales de roca por planos preferenciales.

Por otro lado, las condiciones geométricas son desfavorables para el análisis de rotura en cuña (*Figura 4.18*), pero estas intersecciones no se identifican con facilidad en terreno. De lo anterior se interpreta que no existe intersección entre estas discontinuidades en la práctica, o bien, el talud en esta zona se comporta como suelo producto del avanzado grado de meteorización y los mecanismos de rotura preferenciales son de carácter curvilíneo. En terreno se evidencian deslizamientos rotacionales de tierra arenosa que ha sido acumulada en coluvios en el pie del talud.

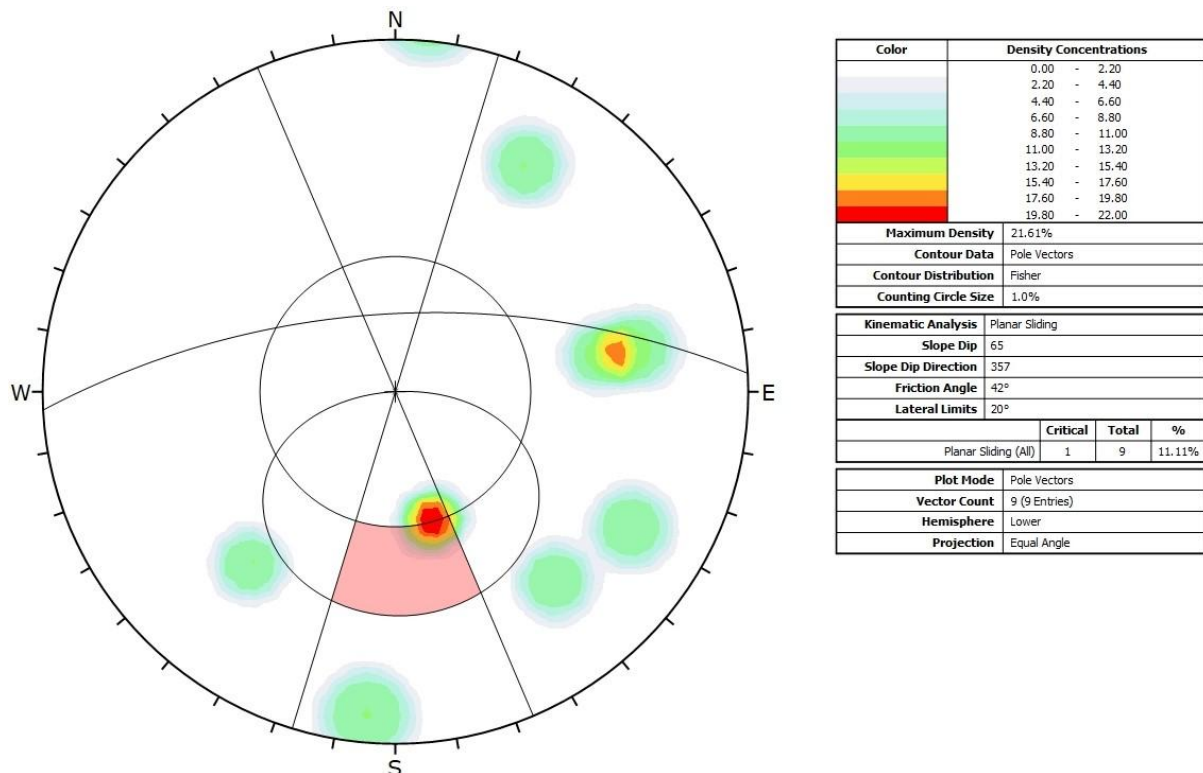


Figura 4.17: Análisis cinemático de rotura plana en Talud 1.6.



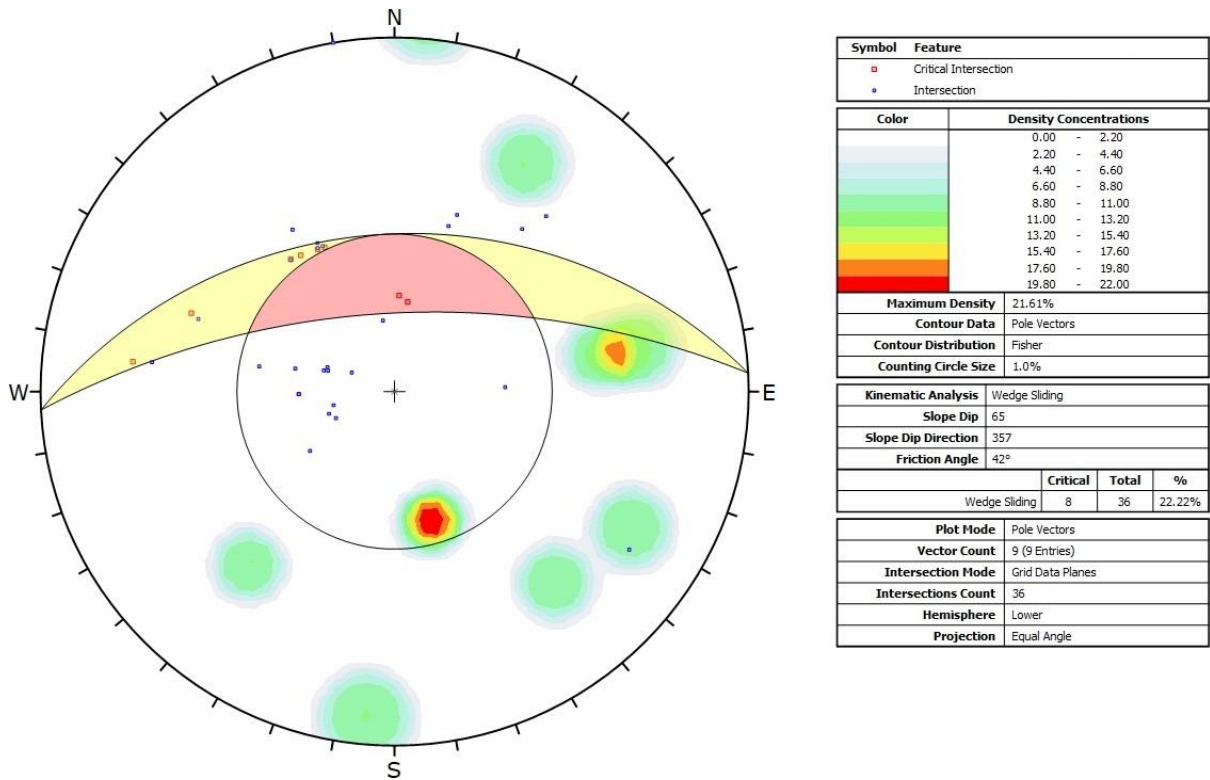


Figura 4.18: Análisis cinemático de rotura en cuña en Talud 1.6.

## Talud 1.7

GPS: 325947S/712373W

Se observa talud aproximadamente de 10 m de altura y 30 m de largo, pendiente promedio de  $70^\circ$  y orientación noroeste (Figura 4.19). Su color predominante es anaranjado pálido con tonalidades rojizas. Se observan diques máficos afaníticos subparalelos con grado de meteorización IV.

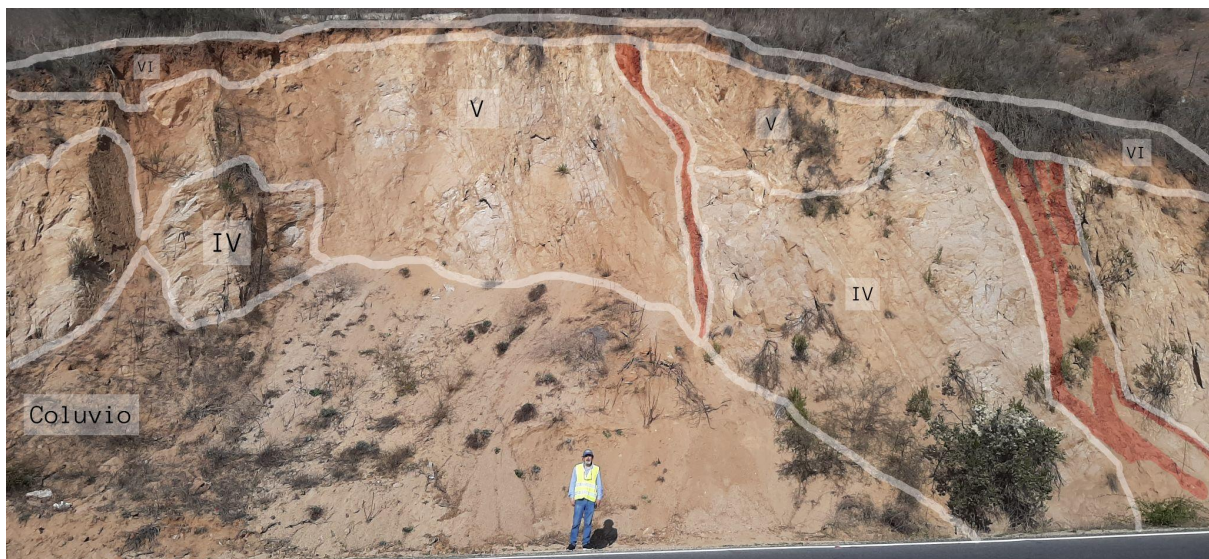


Figura 4.19: Perfil de meteorización Talud 1.7.

El grado de meteorización V es el de mayor extensión en el talud, con evidencia de deformación de las estructuras y bloques, además de exhibir una disminución en el espaciamiento producto de la aparición de nuevas discontinuidades no-sistemáticas. Presenta movimientos tipo deslizamientos rotacionales con superficie de falla curva (Figura 3.3 esquema D), es decir, se comporta mecánicamente como un suelo. El material removido es acumulado en un coluvio arenoso no-consolidado de considerables proporciones con respecto al talud. Nuevamente los diques controlan las zonas de meteorización y se emplazan respetando el diaclasado heredado.

En la zona de grado IV se observan bloques limitados por diaclasas con espaciamientos menores a 1 m y disminuyendo dicho valor hasta la meteorización extrema. Existen deslizamientos traslacionales en cuña (Figuras 4.19 y 4.20), es decir, existe control estructural a pesar que más de la mitad de la matriz rocosa se encuentra deteriorada con importante desarrollo de suelo en las estructuras.

GSI Talud 1.7

- Grado IV: estructura clasificada como *Blocky*, condición de las superficies de las discontinuidades clasificada como *Fair*. **GSI: 65-45.**
- Grado V: estructura clasificada como *Very Blocky*, condición de las superficies de las discontinuidades clasificada como *Very Poor*. **GSI: 45-25.**
- Grado VI: no aplicable.

Análisis Cinemático Talud 1.7

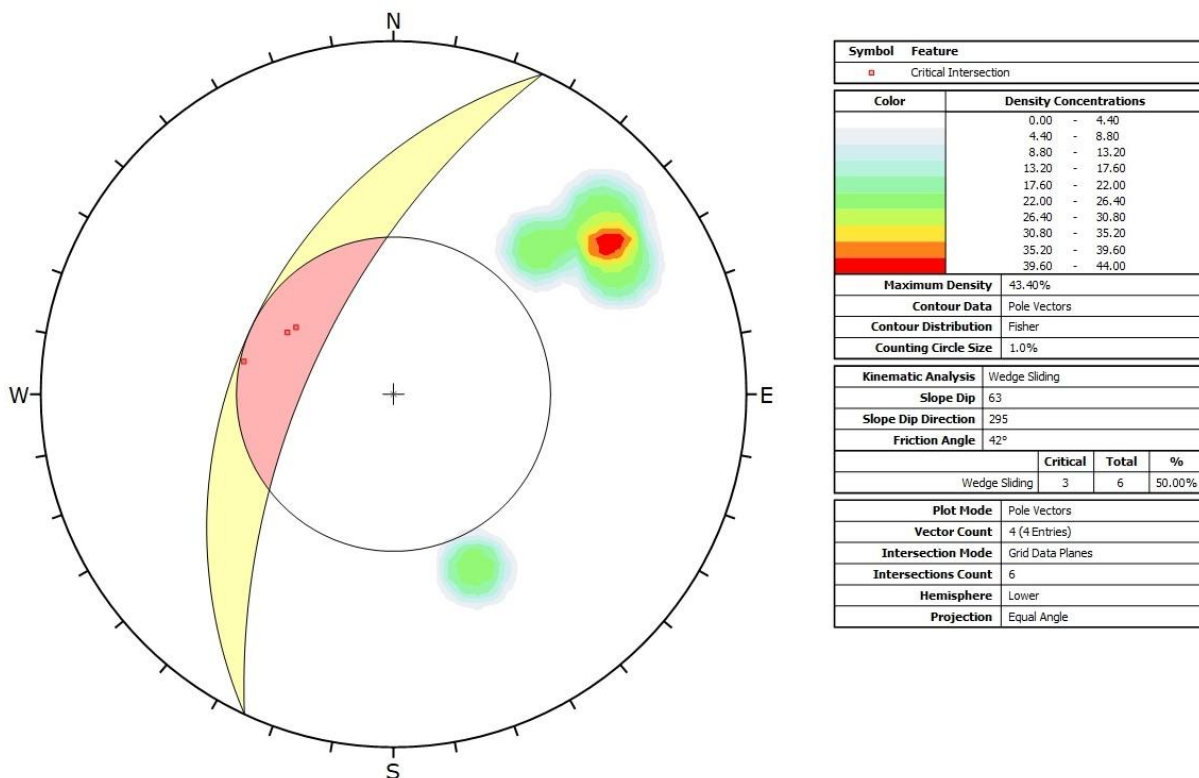


Figura 4.20: Análisis cinemático de rotura en cuña en Talud 1.7.



## 4.2 Rocas Estratificadas

Las rocas estratificadas son parte de la Formación Ajial compuesta según la literatura por tobas, brechas volcánicas y lavas andesítico-basálticas y riódacíticas (Rivano, 1996).

Se analizan en total 5 taludes en roca de origen principalmente volcánico. Los taludes estudiados corresponden a aquellos que presentan avanzado deterioro de los macizos rocosos y evidencia de remociones en masa.



Figura 4.21: Taludes en rocas estratificadas (imagen de Google Earth).

### Talud 2

GPS: 326010S/712398W

Se observa talud de 12 metros de altura y 100 de largo aproximadamente, pendiente promedio de  $50^{\circ}$  y orientación noroeste (DipDir=345).

Litología: lava andesítica gris oscura, textura porfírica-afanítica.

Alteración: arcillas en masa fundamental, óxidos de hierro en pátina.

Para el análisis del talud se identifican 3 elementos que lo componen:

**A)** Talud 2 tramo oeste:

Grado de meteorización IV: Altamente Meteorizado (ISRM, 1981).

Remoción en masa: Caída de bloques pequeños y detritos.

Estructura: en bloques angulares pequeños (<30 cm) con persistencia de estratos plegados.

Estado de discontinuidades: superficies lisas moderadamente meteorizadas y alteradas con presencia de óxidos de hierro.

**GSI: 45-30**



Figura 4.22: Derecha: Perfil de meteorización Talud 2 Tramo oeste. Izquierda: Estructura en bloques del Talud 2 Tramo oeste.

**B)** Estructura mayor: posible plano de cizalle con relleno arcilloso. Buzamiento en  $45^\circ$  aproximadamente, dirección de buzamiento hacia el este. La estructura separa el talud en dos tramos de igual litología pero diferente grado de meteorización.



Figura 4.23: Perfil de estructura mayor en Talud 2.



**C) Talud 2 tramo oriente:**

Grado de meteorización VI-V: Suelo residual con roca completamente meteorizada.

Deterioro del talud: surcos de erosión, caída de tierra y detritos.

Remoción en masa: deslizamientos rotacionales de tierra y detritos.

GSI: no aplicable.

Corresponde en su mayoría a suelo residual (grado IV) clasificado como suelo sin influencia mineralógica fuerte con influencia de la macroestructura (Wesley, 2009).

El talud en este tramo se comporta como suelo con dominancia de roturas curvas.

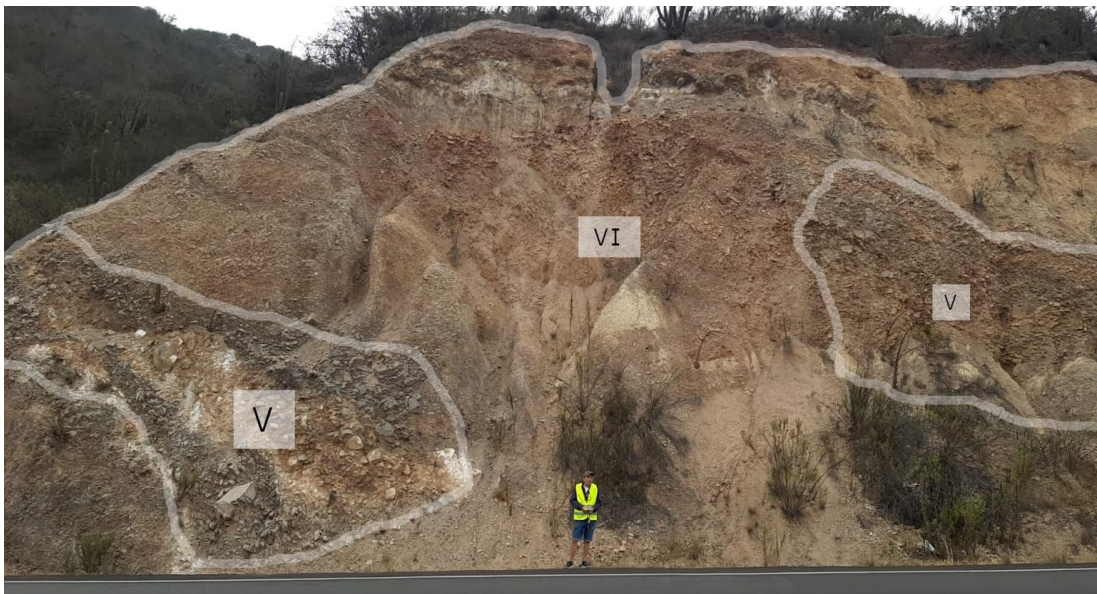


Figura 4.24: Perfil de meteorización Talud 2 Tramo este.

El talud se caracteriza por la presencia de una estructura posible falla que separa el talud en dos tramos. El cambio composicional de los materiales es evidente y abrupto, posiblemente uno de los lados fue más afectado estructuralmente y permitió un ataque químico más eficiente. La meteorización física actúa como factor influyente en la posterior meteorización química.

La estructura en el tramo oeste es en bloques angulares con una matriz rocosa competente. La clasificación GSI es aplicable y estimada entre 45-30.

El tramo este corresponde en su mayoría a suelo residual (grado IV) clasificado como suelo sin influencia mineralógica fuerte con influencia de la microestructura (Wesley, 2009). El talud en este tramo se comporta como suelo, con deslizamientos rotacionales como rotura dominante.

### Talud 3

GPS: 326029S/712407W

Se observa talud de 15 metros de altura y 70 de largo aproximadamente, pendiente promedio de  $62^{\circ}$  y orientación noroeste (DipDir=335).

Los materiales originales del macizo corresponden a rocas volcánicas andesíticas grises oscuras de textura afanítica-porfírica. La meteorización en diversos grados ha transformado más de  $\frac{3}{4}$  partes de talud en suelo residual, en donde la roca se encuentra totalmente obliterada producto del reemplazo total de minerales secundarios de alteración y pérdida de la estructura y fábrica del macizo rocoso. La composición y estructura aún es reconocible en zonas con grado de meteorización V, no así en zonas de grado VI.

En el grado V los bloques no superan los 20 cm promedio, son angulosos y la masa fundamental presenta alteración a arcillas. Las discontinuidades corresponden a diaclasas heredadas del macizo rocoso original y a fracturas propias del proceso de deterioro. Están rellenas óxidos de hierro-manganeso, arcillas y cuarzo. El GSI se estima entre **35-20**, con estructura clasificada como *Blocky/Disturbed/Seamy* y estructuras clasificadas como *Poor*. En esta zona, los movimientos de material se clasifican como caídas de bloques y detritos con desplazamientos traslacionales de bloques pequeños.

En la corona del talud se observa material arcilloso de color anaranjado con tonos rojizos que se repiten al pie del talud (sector parcialmente cubierto por coluvios). Si bien se observan estructuras, no es posible reconocer si se tratan se discontinuidades heredadas o producto de la deformación por el avanzado grado de meteorización. GSI no es aplicable. Se observan surcos de erosión en el pie del talud y deslizamientos rotacionales de tierra.



Figura 4.25: Perfil de meteorización Talud 3.



Se evidencia un retroceso del talud en la zona de mayor grado de meteorización (*Figura 4.25*), con superficies de falla curva típicas del comportamiento de un suelo en donde la resistencia de la matriz rocosa es de igual o mayor influencia que la resistencia entre superficies. Se clasifica como un suelo sin influencia mineralógica fuerte con influencia de la macroestructura.

#### Talud 4

GPS: 326073S/712401W

Se observa talud de 25 metros de altura y 100 de largo aproximadamente, pendiente estimada entre 70-85°, orientación noroeste (DipDir= 315) y forma cóncava.

Corresponde a una roca metamórfica descrita como corneana, color gris blanquecino, estructura masiva y fábrica no-orientada.

Sus discontinuidades son lisas rellenas con óxidos de manganeso y limonita.

Se observa una estructura tabular en la parte media-superior del talud, posiblemente un dique con orientación similar al principal set de diaclasas (*Figura 4.26*).



Figura 4.26: Arriba: Estructura del Talud 4. Abajo: Perfil de meteorización Talud 4.

El grado de meteorización del macizo en general es IV, se conservan las estructuras y la fábrica original, pero el grado de fracturación es alto al punto de generarse caída de bloques y detritos.

Al costado izquierdo del dique se identifica una zona de grado V con un mayor grado de fracturamiento y mayor decoloración por oxidación. y material coluvial de baja selección acumulado en el pie del talud.

Es reconocible suelo residual (VI) en la parte superior del talud de espesores no mayores a 1 m, asociado a materia orgánica y a material de tipo coluvial.

#### GSI Talud 4

Grado IV: la estructura es clasificada como *Blocky* y las condiciones de las superficies de discontinuidades son clasificadas como *Poor*. **GSI= 55-35**.

Grado V: la estructura es clasificada como *Very Blocky* y las condiciones de las superficies de discontinuidades son clasificadas como *Very Poor*. **GSI= 35-15**.

Grado VI: no aplicable.

#### Análisis Cinemático Talud 4

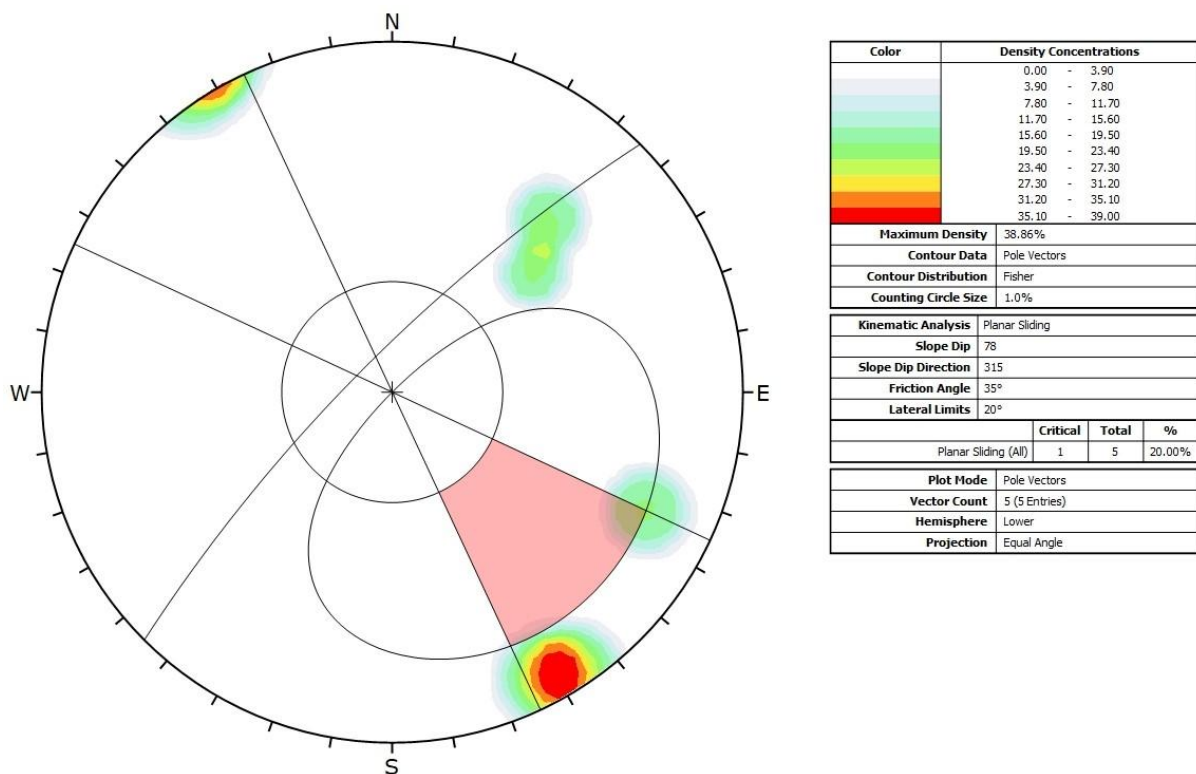


Figura 4.27: Análisis cinemático de rotura plana en Talud 4.

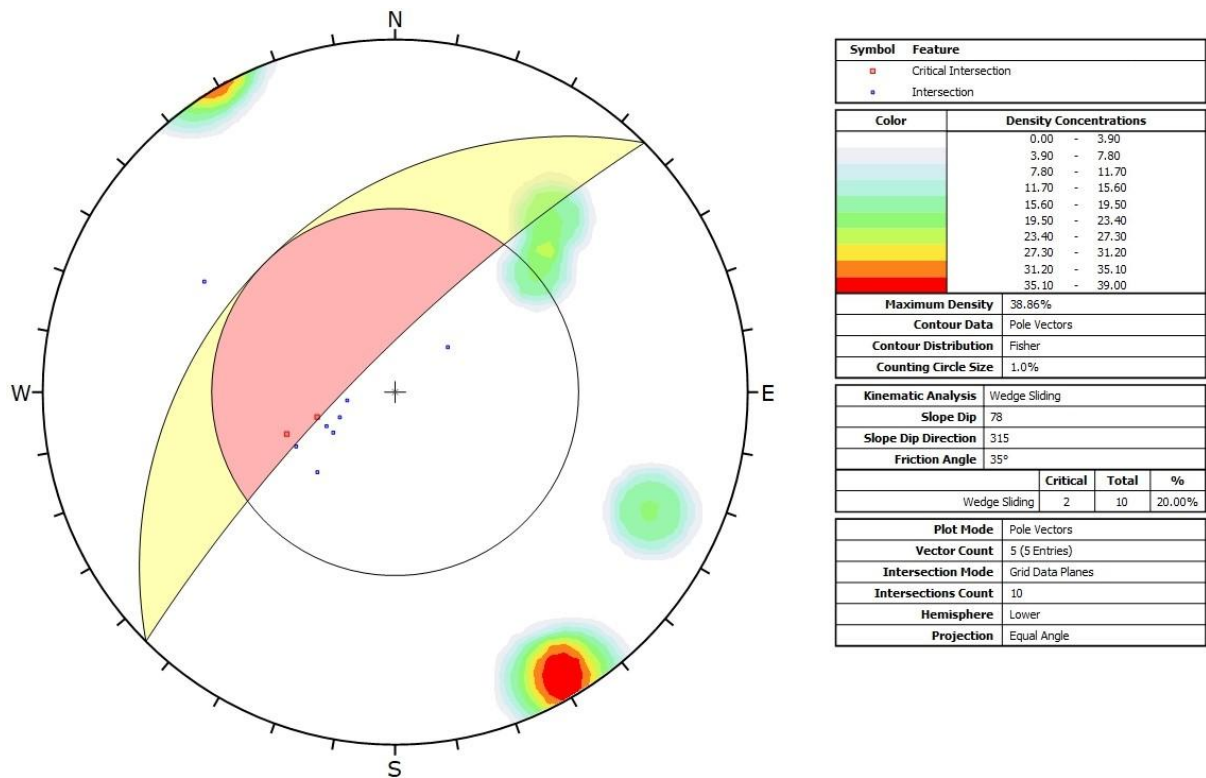


Figura 4.28: Análisis cinemático de rotura en cuña en Talud 4.

El análisis cinemático de rotura plana (*Figura 4.27*) indica la presencia de un plano crítico en la zona de control estructural (grado IV), pero se estima un aumento en la pendiente del talud hacia la corona que puede resultar desfavorable para las condiciones geométricas e incluso comprometer un segundo set en la zona crítica de la red estereográfica.

El modelo de rotura dominante es por cuñas (*Figura 4.28*), abundantemente observadas en terreno y complementadas por el análisis cinemático. Con la misma lógica anterior, si aumenta la pendiente del talud, más intersecciones quedan comprendidas en la zona crítica y mayor probabilidad de deslizamiento existe.

La zona intermedia de grado V se encuentra en una zona cercana al dique que una vez más actúa como plano de debilidad disminuyendo el espaciado entre diaclasas favoreciendo la erosión de bloques y detritos.

En general el Talud 4 se comporta como roca exceptuando la zona intermedia grado V, con un GSI general menor a 55.



## Talud 5

GPS: 326090S/712383W

Se observa talud de 15 metros de altura y 40 metros de largo aproximadamente, pendiente promedio de  $67^\circ$  y orientación oeste (DipDir=281).

Los materiales corresponden a rocas volcánicas (lavas) gris oscuro, de textura afanítica. Se estima un grado de meteorización IV para gran parte del talud.

Las discontinuidades corresponden en su mayoría a diaclasas heredadas del macizo original y a fracturas del proceso de deterioro. Están rellenas por limolita. El espaciamiento es menor a 15 cm y la continuidad de sus diaclasas se estima entre 3-15 m.

Dentro de los movimientos de material se identifican caídas de roca y detritos, además de deslizamientos traslacionales planos y en cuña.

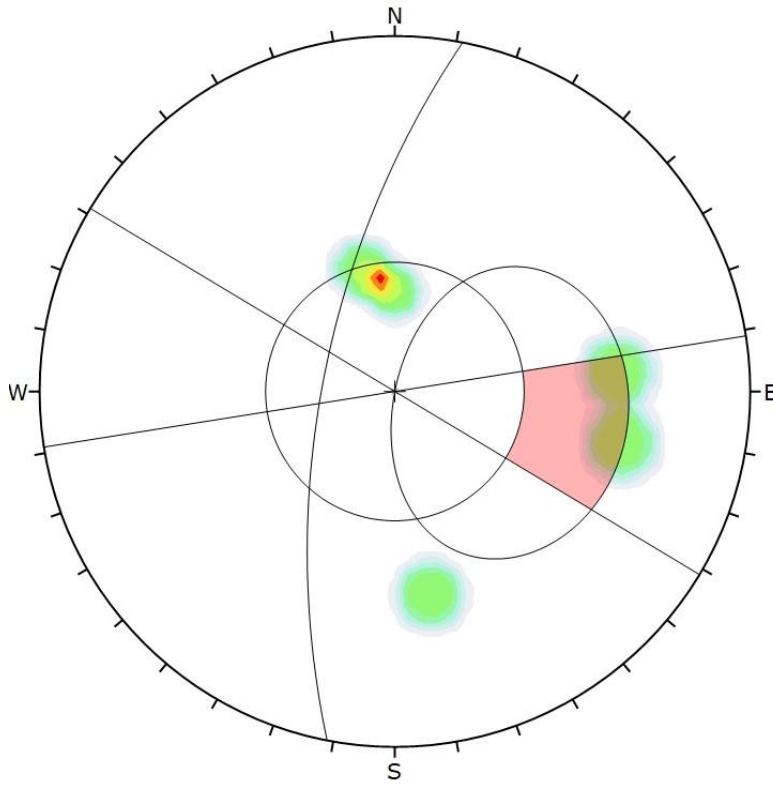
La estructura del macizo es clasificada como *Very Blocky* y las condiciones de las superficies de discontinuidades son clasificadas como *Poor*. **GSI=45-25**.



Figura 4.29: Perfil de meteorización Talud 5.

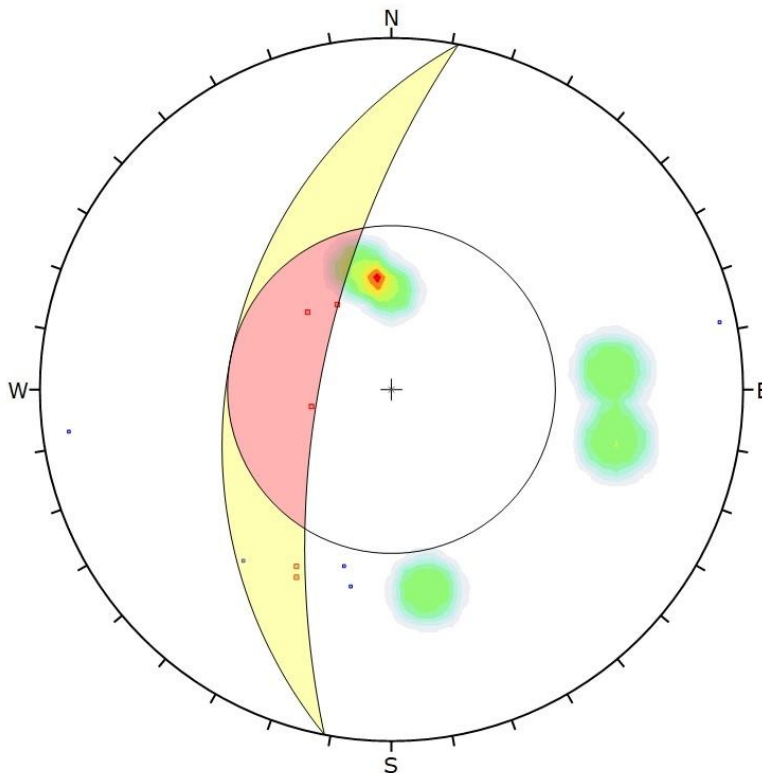


## Análisis Cinemático Talud 5



Color	Density Concentrations		
	0.00 - 3.30		
	3.30 - 6.60		
	6.60 - 9.90		
	9.90 - 13.20		
	13.20 - 16.50		
	16.50 - 19.80		
	19.80 - 23.10		
	23.10 - 26.40		
	26.40 - 29.70		
	29.70 - 33.00		
<b>Maximum Density</b>	32.52%		
<b>Contour Data</b>	Pole Vectors		
<b>Contour Distribution</b>	Fisher		
<b>Counting Circle Size</b>	1.0%		
<b>Kinematic Analysis</b>	Planar Sliding		
<b>Slope Dip</b>	67		
<b>Slope Dip Direction</b>	281		
<b>Friction Angle</b>	40°		
<b>Lateral Limits</b>	20°		
	<b>Critical</b>	<b>Total</b>	<b>%</b>
Planar Sliding (All)	2	5	40.00%
<b>Plot Mode</b>	Pole Vectors		
<b>Vector Count</b>	5 (5 Entries)		
<b>Hemisphere</b>	Lower		
<b>Projection</b>	Equal Angle		

Figura 4.30: Análisis cinemático de rotura plana en Talud 5.



Symbol	Feature		
■	Critical Intersection		
●	Intersection		
Color	Density Concentrations		
	0.00 - 3.30		
	3.30 - 6.60		
	6.60 - 9.90		
	9.90 - 13.20		
	13.20 - 16.50		
	16.50 - 19.80		
	19.80 - 23.10		
	23.10 - 26.40		
	26.40 - 29.70		
	29.70 - 33.00		
<b>Maximum Density</b>	32.52%		
<b>Contour Data</b>	Pole Vectors		
<b>Contour Distribution</b>	Fisher		
<b>Counting Circle Size</b>	1.0%		
<b>Kinematic Analysis</b>	Wedge Sliding		
<b>Slope Dip</b>	67		
<b>Slope Dip Direction</b>	281		
<b>Friction Angle</b>	40°		
	<b>Critical</b>	<b>Total</b>	<b>%</b>
Wedge Sliding	5	10	50.00%
<b>Plot Mode</b>	Pole Vectors		
<b>Vector Count</b>	5 (5 Entries)		
<b>Intersection Mode</b>	Grid Data Planes		
<b>Intersections Count</b>	10		
<b>Hemisphere</b>	Lower		
<b>Projection</b>	Equal Angle		

Figura 4.31: Análisis cinemático de rotura en cuña en Talud 5.

Se trata de un talud homogéneo y muy diaclasado con grado de meteorización IV. El GSI se estima en valores menores a 45. El talud es susceptible a caídas de roca y en menor cantidad suelo, además de potenciales deslizamientos planares y en cuña de bloques determinados en el análisis cinemático.

Dos sets de diaclasas pueden provocar un deslizamiento plano, más aún si se aumenta el ángulo del talud. La inestabilidad no depende en este caso del ángulo de fricción pues los ángulos de los buzamientos de los planos y talud son mucho mayores.

Las intersecciones de los planos medidos orientan las cuñas de manera desfavorable hacia fuera del talud siendo el modelo de rotura más probable de ocurrir. En terreno se observa 3 cuñas y las superficies de los planos involucrados se encuentran alteradas a limolita.

## Talud 6

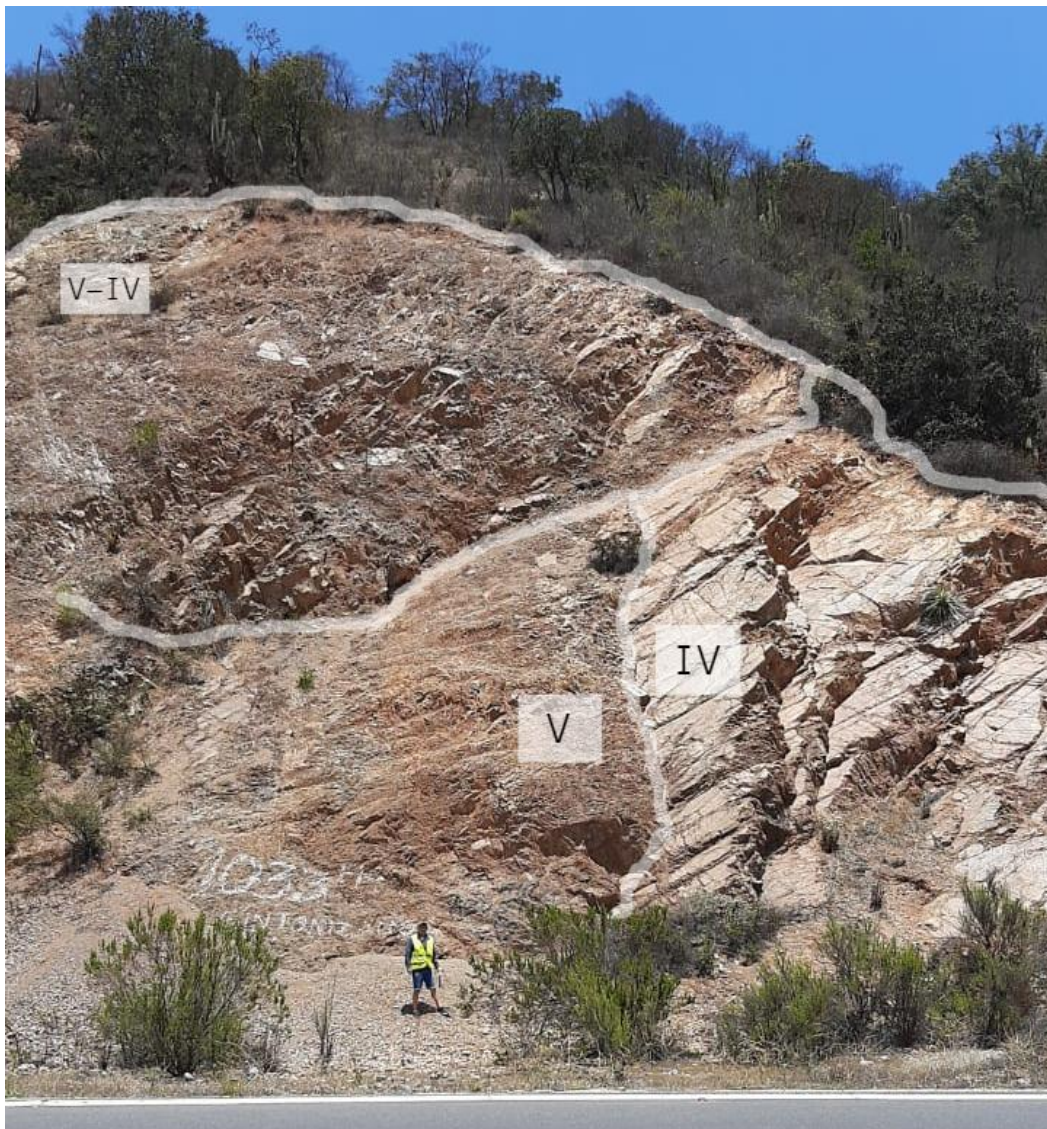


Figura 4.32: Perfil de meteorización Talud 6.

GPS: 326144S/712336W

Su altura es aproximadamente 30 metros y su longitud 40 metros. Su color es anaranjado pálido con tonalidades rojizas. Su litología corresponde a una toba cristalina silicificada de color gris claro. Las discontinuidades están rellenas por arcillas y óxidos de hierro.

Se observan tres dominios estructurales claros con distinto grado de meteorización. En la primera zona (grado de meteorización IV) se identifica 1 set principal de discontinuidades, presentando deslizamientos traslacionales a favor de dichos planos. **GSI= 55-35**. En las zonas de grado V-VI la litología es similar, pero su grado de fracturación es mucho mayor. Se observan caída de detritos y bloques de pequeño tamaño.

### Análisis Cinemático Talud 6

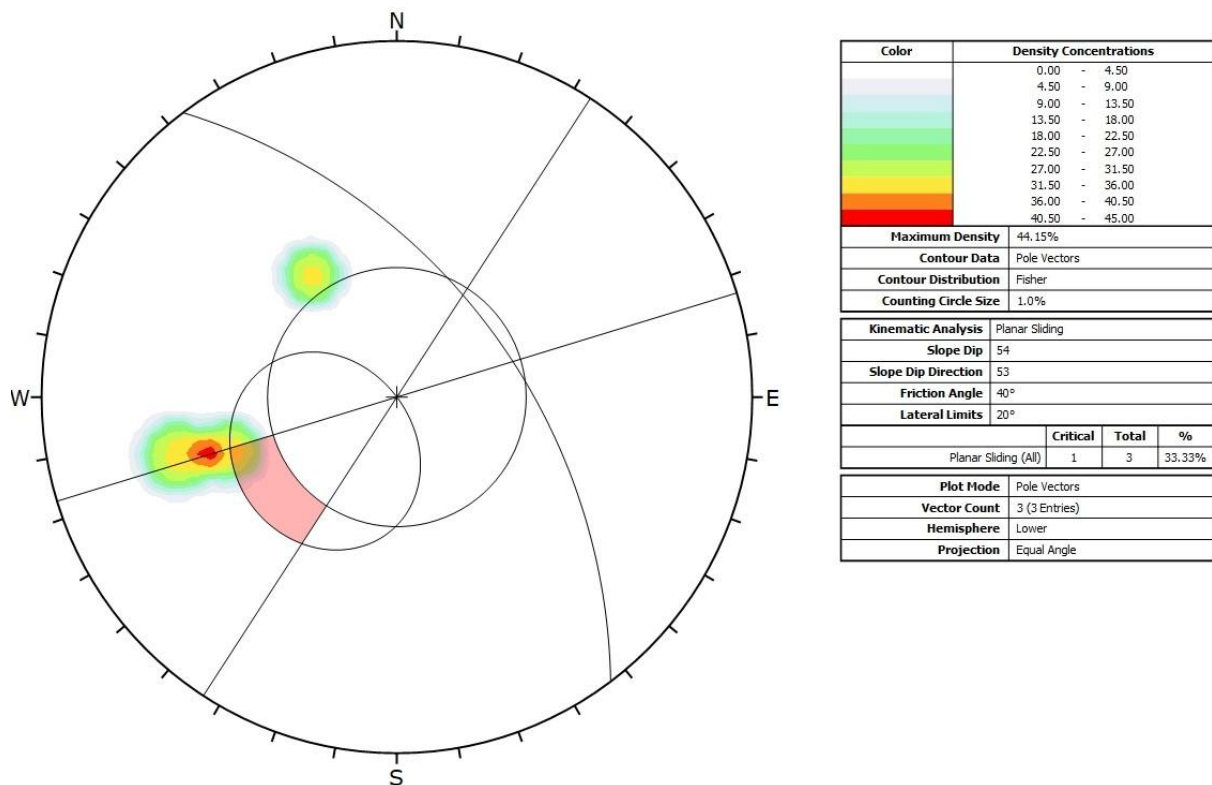


Figura 4.33: Análisis cinemático de rotura plana en Talud 6.

El talud se divide en tres zonas estructurales. La zona de grado V y VI se diferencian levemente en su color rojizo que a su vez indica una mayor fracturación del macizo. No fue posible medir dicho cambio estructural en terreno. Aún así, no se reconocen deslizamientos rotacionales a pesar de su avanzado grado de meteorización y los movimientos asociados son caídas de pequeños bloques y detritos angulares. Las rocas se encuentran silicificadas y los bloques caen o deslizan antes del deterioro total de la matriz rocosa producto de la resistencia a la meteorización del cuarzo. En la zona de grado IV se observan planos de estratificación con material de relleno compacto pero de superficies muy lisas y representan los principales planos de

debilidad del talud. El plano es analizado cinemáticamente resultando en 1 set crítico (*Figura 4.33*). Las condiciones de rotura no siempre se cumplen en todos los sectores del talud, pues cambios de orientación o pendiente desplazan la zona crítica en la red de Schmidt y eventualmente dicho plano podría o no representar un potencial deslizamiento.

## Capítulo 5: Discusiones

En general, todos los taludes analizados se encuentran en la transición roca-suelo, presentando grados de meteorización medios y altos (grado III a VI). La susceptibilidad de los materiales geológicos a la meteorización depende primeramente de la estabilidad de cada uno de los minerales que lo componen en condiciones atmosféricas, siendo el cuarzo el mineral de mayor resistencia a la meteorización.

En las rocas intrusivas de la Unidad Cavilolén, el suelo residual resultante del proceso de meteorización es de textura areno-arcillosa. Por un lado, la porción gruesa del suelo se compone de los cristales granulares de cuarzo y biotita, los cuales preservan parcialmente su forma y tamaño. La porción fina del suelo corresponde a sesquióxidos de hierro y aluminio, además de minerales de arcilla derivados de la alteración de plagioclasas y feldespatos (probablemente caolinita).

Las rocas estratificadas de la Formación Ajial presentan en general texturas afaníticas y porfídicas de grano fino (al igual que los diques). Por consiguiente, el suelo residual resultante del proceso de meteorización es de textura arcillosa de composición variable dependiendo de la litología de la roca original. Precisamente los taludes con menor desarrollo de suelo son aquellos cuya matriz rocosa se encuentra silicificada (Taludes 4 y 6, corneana y toba respectivamente).

La intensidad de la meteorización puede verse reflejada en la potencia de los perfiles de meteorización y en el desarrollo de suelo residual (grado VI). El clima limita el desarrollo de suelo al ser una zona relativamente seca. Durante el mes más lluvioso del año se promedian tan solo 4 días de lluvia y con un promedio de precipitaciones de 78 mm (*Tabla 2.1*). La geomorfología montañosa (*Figura 2.5*) también restringe el desarrollo de suelo, pues favorece el drenaje de aguas y disminuye la efectividad del ataque químico. El resultado son macizos rocosos con grados de meteorización en donde la estructura heredada aún es reconocible (grados IV y V) a pesar del deterioro de la matriz rocosa.

Las estructuras heredadas de los macizos originales representan planos de debilidad y controlan en gran medida el comportamiento geomecánico de los taludes (control estructural). Se identifican tres modelos de roturas dominantes, los cuales condicionan la ocurrencia de remociones en masa.

Para el caso de los suelos residuales (grado VI), las superficies de falla son de tipo circular evidenciadas principalmente en los taludes derivados de rocas volcánicas de composición andesítica (Taludes 2 y 3) y cuyo suelo es de tipo cohesivo. Según la *Figura 3.2*, las roturas observadas en terreno corresponden en su mayoría al esquema (b) roturas circulares de pie.

En rocas completamente meteorizadas (grado V), los deslizamientos son preferentemente rotacionales. En macizos rocosos meteorizados dominan las roturas curvas, es decir, de forma circular pero respetando los planos preferenciales



heredados y nuevos (*Figura 3.3 esquema (d)*) y representan geoméricamente la transición roca-suelo.

Las roturas planares y en cuña están presentes en rocas con grado de meteorización III y IV principalmente, en donde la resistencia de las discontinuidades es menor que la resistencia de la matriz rocosa. Esto da lugar a deslizamientos traslacionales de bloques de tamaño variable.

Los macizos rocosos se clasifican según el GSI, que incluye la evaluación de la estructura y del estado de las superficies de discontinuidades. Si bien la clasificación no depende de la litología, las corneanas y tobas exhiben ligeramente una mayor valoración GSI que las granodioritas, mientras que las andesitas manifiestan las menores valoraciones para el mismo grado de meteorización.

Con el aumento del grado de meteorización, los taludes estudiados presentan cambios estructurales (disminución del espaciamiento y deformación) y al mismo tiempo composicionales (mayor grado de alteración). Esto es traducido en el esquema GSI (*Tabla 3.4*) con desplazamientos diagonales que reducen el valor del índice.

En suelos el GSI no puede ser aplicado, pues la estructura ha sido completamente eliminada y se opta por aplicar la clasificación de suelos residuales propuesta por Wesley (*Tabla 3.5*).

Para emplear la clasificación composicional es necesario conocer la actividad de las arcillas que componen los diferentes suelos residuales estudiados. Se sugiere un análisis químico de los suelos para descartar la presencia de arcillas de alta actividad como las del grupo de la haloisita, alofana o esmectita. En cuanto a la clasificación estructural, no existen dudas de que el comportamiento mecánico de estos suelos está fuertemente influenciado por la macroestructura de los macizos rocosos de los cuales derivan.

## Capítulo 6: Conclusiones

La Cuesta El Melón (Ruta E-47) está ubicada en la V región de Valparaíso y une las comunas de Nogales con Zapallar. Los taludes asociados a la ruta fueron excavados en rocas intrusivas y estratificadas meteorizadas *in-situ*. Las rocas intrusivas de la Unidad Cavilolén corresponden a granodioritas de hornblenda a biotita dependiendo el grado de alteración. Son parte de la Superunidad Mincha y a su vez del denominado Batolito Costero. En cambio, las rocas estratificadas son parte de la Formación Ajial de edad jurásica, y corresponden a andesitas, tobas y corneanas.

Los taludes presentan inestabilidades derivadas tanto del proceso de deterioro como de las condiciones geométricas-estructurales. Los movimientos en masa son condicionados por factores propios de la naturaleza del material, como lo son la composición y estructura de los macizos rocosos. Por otro lado, la sismicidad y las precipitaciones constituyen los factores desencadenantes más importantes.

El comportamiento geomecánico está relacionado con el grado de meteorización de los materiales. En grados de meteorización III y IV existe control estructural, es decir, dominado por los movimientos a través de los planos de debilidad existentes. Se observan principalmente deslizamientos traslacionales de bloques con modelos de rotura plana y en cuña. Caso contrario es en materiales con grado de meteorización V y VI, en donde gran parte de la matriz rocosa se encuentra completamente transformada a suelo dando lugar a superficies de falla curvas típicas de los suelos.

Este trabajo se limita a la descripción y caracterización de aspectos geológicos observables. Para un completo análisis de estabilidad de estos taludes se sugiere complementar este trabajo con ensayos de laboratorio y con el estudio de los esfuerzos que actúan sobre ellos.

## Capítulo 7: Bibliografía

- Agudelo, D. (2012). *Influencia de los procesos de meteorización en la estructura del suelo y la estabilidad de taludes*. Departamento de Ingeniería Civil, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia.
- Brand, E.W. (1985). *Predicting the performance of residual soil slopes*. Geotechnical Control Office, Engineering Development Department, Hong Kong.
- Cabrera, T. (2007). *Características Geotécnicas de los suelos residuales del batolito de la costa de la cordillera de la Costa*. Memoria de título para optar al título de Ingeniero Civil. Universidad de Chile.
- Cancino, A.; Vergara, M.; Levi, B.; López-Escobar, L. (1991). *Formaciones Ajjal y Horqueta: Características Geoquímicas y Geotectónicas del Volcanismo Jurásico en Chile Central*. Servicio Nacional de Geología y Minería, Chile. Congreso Geológico Chileno p. 611-614, 1991.
- Deckart, K.; Hervé, F.; Fanning, C.M.; Ramírez, V.; Calderón, M.; Godoy, E. (2014). *U-Pb Geochronology and Hf-O Isotopes of zircons from the Pennsylvanian Coastal Batholith, South-Central Chile*. *Andean Geology*, *Revista Geológica de Chile*.
- Rivano, S.; Sepúlveda, P.; Hervé, M; Puig, A. (1985). *Geocronología K-Ar de las rocas intrusivas entre los 31°-32°S, Chile*. Servicio Nacional de Geología y Minería (Chile). *Revista Geológica de Chile* No. 24, p. 63-74.
- Rivano, S. (1996). *Geología de las Hojas de Quillota y Portillo*. Servicio Nacional de Geología y Minería (Chile), Mapas Geológicos, Escala 1:250.000.
- González de Vallejo, L.I.; Ferrer, M.; Ortuño, L.; Oteo, C. (2002). *Ingeniería geológica*. Pearson Educación.
- Goodman, R.E. (1989). *Introduction to rock mechanics, Second Edition*. New York: Wiley.
- Hervé, F.; Faúndez, V.; Calderón, M.; Massonne, H.-J.; Willner, A.P. (2007). *Metamorphic and plutonic basement complexes*. *The Geology of Chile*. The Geological Society, London.
- Hoek E.; Brown E.T. (2018). *The Hoek-Brown failure criterion and GSI-2018 edition*. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* (2018).



- Marinos, V.; Marinos, P.; Hoek, E. (2005). *The geological strength index: applications and limitations*. Bull Eng Geol Environ (2005) 64: 55–65.
- Mitchell, J.K.; Soga K. (2012). *Fundamentals of Soil Behavior, Third Edition*. John Wiley & Sons, Inc.
- Parada, M.A.; López-Escobar, L.; Oliveros, V.; Fuentes, F.; Morata, D.; Calderón, M.; Aguirre, L.; Féraud, G.; Espinoza, F.; Moreno, H.; Figueroa, O.; Muñoz Ravo, J.; Troncoso Vásquez, R.; Stern, C.R. (2007). *Andean Magmatism. The Geology of Chile*. The Geological Society, London.
- Piteau, D.R.; Peckover, F.L. (1978). *Engineering of rock slopes*. Landslides: Analysis and Control. National Research Council, Washington D.C., N° 176. p. 192-234.
- Piracés, R. (1976). *Estratigrafía de la Cordillera de la Costa entre la Cuesta El Melón y Limache, Provincia de Valparaíso, Chile*. Primer Congreso Geológico Chileno, Santiago.
- Rodríguez, P. (2015). *Caracterización geomecánica y mineralógica del maicillo en la cordillera de Nahuelbuta*. Memoria para optar al título de ingeniero civil. Universidad Católica de la Santísima Concepción.
- Sabaj, R. (2008). *Identificación y caracterización de estructuras potencialmente activas en la cordillera de la costa entre los 33° y 33°45'S*. Memoria de título para optar al título de geólogo. Universidad de Chile.
- Suárez, J. (2009). *Deslizamientos Volumen I: Análisis Geotécnico (Capítulo 10)*. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.
- Toro, K. (2007). *Influencia de las características geológicas en las propiedades geotécnicas de granitoides jurásicos y suelos asociados en la ruta 68*. Memoria de título para optar al título de geólogo. Universidad de Chile.
- Varnes, D.J. (1978). *Slope movement types and processes*. In Landslides, Analysis and Control, Special Report N°176. Schuster, R.L., Krizek, R.J., edits. Transportation Research Board, National Academy of Sciences, Washington D.C., p.11-33.
- Wesley, L. (2009). *Behaviour and geotechnical properties of residual soils and allophane clays*. Department of Civil and Environmental Engineering, University of Auckland.

- Wesley, L. (2011). *Stability Of Slopes In Residual Soils*. Department of Civil and Environmental Engineering, University of Auckland.

## Anexos

Tabla 8.1: Orientaciones Talud 1.1.

	Dip	Dip Direction
<b>Talud 1.1</b>	66	350
D1	50	340
D2	45	315
D3	62	165
D4	70	255

Tabla 8.2: Orientaciones Talud 1.2.

	Dip	Dip Direction
<b>Talud 1.2</b>	70	345
D1	42	347
D2	77	20

Tabla 8.3: Orientaciones Talud 1.4.

	Dip	Dip Direction
<b>Talud 1.4</b>	70	315
D1	80	265
D2	87	0
Dique	63	250
D3	83	340

Tabla 8.4: Orientaciones Talud 1.5.

	Dip	Dip Direction
<b>Talud 1.5</b>	45	345
D1	35	335
D2	72	295
D3	80	45
D4	51	30

Tabla 8.5: Orientaciones Talud 1.6.

	Dip	Dip Direction
<b>Talud 1.6</b>	65	357
D1	41	341
D2	70	260
D3	85	5
D4	75	300
D5	70	320
D6	60	260
D7	65	40
D8	73	210

Tabla 8.6: Orientaciones Talud 1.7.

	Dip	Dip Direction
<b>Talud 1.7</b>	63	295
D1	75	230
D2	60	225
D3	72	240
D4	57	335

Tabla 8.7: Orientaciones Talud 4.

	Dip	Dip Direction
<b>Talud 4</b>	78	315
D1	55	230
D2	85	332
D3	77	295
D4	67	222
D5	87	327

Tabla 8.8: Orientaciones Talud 5.

	Dip	Dip Direction
<b>Talud 5</b>	67	281
D1	60	350
D2	64	265
D3	39	165
D4	66	283
D5	31	180

Tabla 8.9: Orientaciones Talud 6.

	Dip	Dip Direction
<b>Talud 6</b>	54	53
D1	52	72
D2	65	75
D3	45	145