

## EVALUACIÓN DEL RIESGO DE REMOCIÓN EN MASA EN CALETA CHOME Y SUS VÍAS DE EVACUACIÓN EN LA PENÍNSULA DE HUALPÉN, COMUNA DE TALCAHUANO, REGIÓN DEL BÍO BÍO

*M. Abarzúa Ramos<sup>1</sup>, J. Montenegro Cooper<sup>2</sup>, R. King St-Onge<sup>3</sup>, M. Espinoza Vargas<sup>4</sup>*

**RESUMEN:** El análisis de estabilidad de taludes en zonas peninsulares son de gran importancia para mitigar los riesgos por remoción en masa, pues podrían afectar a la población más allá de la cotidianidad. Es necesario inspeccionar minuciosamente la calidad geotécnica y geomecánica de los macizos rocosos y sus estructuras heredadas, ensayando datos estructurales sobre su superficie y con ello, lograr gestionar los recursos destinados a la contención y mitigación de la eventualidad de un movimiento de material. El sector de estudio abarca a la Caleta Chome y sus inmediaciones, donde afloran cuerpos de roca altamente meteorizados y fracturados, con bloques aislados y suelos residuales indicando el mal estado de estos. Por ello, se propone un análisis cinemático exhaustivo de los sets de discontinuidades y la aplicación de sistemas de clasificación de macizos rocosos para interpretar la estabilidad de los taludes costeros y peninsulares, y con ello generar un mapa que complemente la interpretación de posibles zonas de ruptura que puedan ser perjudiciales para la infraestructura local y conectividad urbana.

**PALABRAS CLAVES:** clasificación geomecánica, interpolación de riesgos, análisis cinemático, estructuras heredadas.

**ABSTRACT:** The study and analysis of the stability of slopes in peninsular areas are of great importance to mitigate the risks due to mass removal, since they could affect the population beyond everyday life. It is necessary to thoroughly inspect the geotechnical and geomechanical quality of the slopes and their inherited structures, testing structural data on their surface and with this, manage to manage the resources destined to the containment and mitigation of the eventuality of a movement of material. The study sector includes Caleta Chome and its surroundings, where highly weathered and fractured rock bodies emerge, with isolated blocks and residual soils indicating their poor condition. For this reason, an exhaustive kinematic analysis of the discontinuity sets and the application of rock mass classification systems are proposed to interpret the stability of coastal and peninsular slopes, and thereby generate a map that complements the interpretation of possible rupture zones. that may be detrimental to local infrastructure and urban connectivity.

**KEYWORDS:** geomechanical classification, risk interpolation, kinematic analysis, inherited structures.

Estudiante, Carrera de Ingeniería Civil Geológica, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, [mabarzua@ing.ucsc.cl](mailto:mabarzua@ing.ucsc.cl)

<sup>2</sup> Profesor guía, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, [jmontenegro@ucsc.cl](mailto:jmontenegro@ucsc.cl)

<sup>3</sup> Profesor informante, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, [rking@ucsc.cl](mailto:rking@ucsc.cl)

<sup>4</sup> Profesor informante, Departamento de Ciencias de la Tierra, Universidad de Concepción, CHILE, [mauricespinoza@udec.cl](mailto:mauricespinoza@udec.cl)

## 1. INTRODUCCIÓN

Las remociones en masa son eventos que ocurren a lo largo del mundo en diversas condiciones climáticas, causando cada año miles de muertes y lesiones, además de pérdidas monetarias de miles de millones (Lynn & Bobrowsky, 2008). Se definen como aquel movimiento de grandes volúmenes de suelo o roca, que se desplazan fuera de una ladera por acción de la gravedad (Cruden, 1991). Estos movimientos se desencadenan por causas naturales y antropogénicas en conjunto e individualmente, y es posible intervenirlas con distintos métodos de estabilidad de taludes (Cruden & Varnes, 1996). Los taludes son inclinaciones del terreno con respecto al eje horizontal, ya sea de suelo o roca, expuestos a factores erosivos como el viento, humedad, movimientos tectónicos y actividad humana, que con el tiempo desgastan su estructura y desarrollan una falla en la zona de ruptura.

La zona centro-sur de Chile es conocida por su ocurrencia de movimientos en masa, a causa del aumento de alteraciones antropogénicas en laderas sin previo conocimiento de la estabilidad de la zona, considerando factores como la geología, geomorfología, geotecnia y geomecánica. Estas alteraciones engloban conceptos como la deforestación, sobrecarga de taludes, cortes del talud y más (Hauser, 2000).

Los taludes costeros de la Península de Hualpén son caracterizados por sufrir de familias de discontinuidades, que permiten la evaluación de estabilidad del macizo rocoso con métodos de clasificación. En su extensión, afloran taludes de roca granítica meteorizada conocida como Stock Hualpén (Creixell et al, 2002) que es predominante tanto a lo largo de sus caminos como frente a la costa hacia el noroeste de la península. Por otra parte, la presencia del basamento metamórfico, emplazándose desde la intersección de las vías de evacuación entre Chome y Peroné hacia la costa sureste de la Península.

Este trabajo se enfoca en un proceso de análisis cinemático y caracterización de macizos rocosos en la Península de Hualpén, en el que es necesario utilizar criterios como clasificaciones geomecánicas, que se aplican para obtener la calidad de roca y la estabilidad del talud. Se usará la clasificación SMR (Slope Mass Rating) (Romana, 1993), que fue desarrollada como una modificación del sistema RMR (Rock Mass Rating) (Bieniawski, 1993), y la clasificación Q-Slope (Bar & Barton, 2017), que se aplicará como una profundización del Q de Barton (Barton et al, 1974) para la evaluación de pendientes. Con esta evaluación es posible realizar interpolaciones de álgebra de mapas en aplicaciones de sistema de información geográfica, y lograr una estimación de las zonas de mayor riesgo dentro en las inmediaciones de Caleta Chome.

Los taludes considerados para su evaluación se dividen entre un suelo residual de maicillo, que es roca granítica altamente meteorizada e influenciada por estructuras heredadas, y entre afloramientos rocosos con familias de discontinuidades definidas. Los macizos rocosos por ensayar dentro del estudio consideran puntos estratégicos en las caletas Lengua, Chome, Perone, y las playas Los Cuervos y Ramuncho, junto a mediciones en taludes afines a los caminos con el fin de evitar posibles pérdidas materiales y humanas, tanto en las caletas como en sus vías de evacuación.

## 2. MARCO TEÓRICO

El estudio de las remociones en masa es de gran importancia debido a la amenaza que representan para la seguridad de la población y las infraestructuras. Para poder prevenir y mitigar sus efectos, es importante entender los procesos geológicos y geotécnicos que los causan. En este sentido, es necesario conocer la descripción y características de los macizos rocosos, así como los métodos de clasificación geomecánicos que se utilizan para evaluar su estabilidad.

Los macizos rocosos se caracterizan por tener una resistencia mecánica alta, y su estudio es fundamental para determinar su estabilidad ante diferentes factores, como la presencia de agua, la inclinación del talud, la actividad sísmica y más. Estos métodos se basan en la observación de la estructura, textura y propiedades de la roca, en las que consideraremos además un análisis cinemático que estudie la geometría y la topografía del talud, en conjunto con sus sets de discontinuidades.

## 2.1 Descripción zona de estudio:

### 2.1.1 Geomorfología:

La zona de interés se encuentra en la península de Hualpén, ubicada en el macizo peninsular de Hualpén (Vásquez, 2013) que se compone por altos relieves con escarpes y pendientes compuestos por terrazas marinas, acantilados, quebradas, playas y montañas abruptas, todas en exposición a la constante erosión marina. Se reconoce como un conjunto conformado por formaciones rocosas que se vieron unidas al continente por sedimentos cuaternarios transportados por el río Biobío. La zona presenta variedad de playas y acantilados activos, con gran influencia vegetal por la humedad costera impulsada por vientos marinos.

Por lo representado en la Figura 1, la zona de interés destaca entre sus estructuras más importantes (Municipalidad de Hualpén, 2018):

- Acantilados: Pendientes o laderas de la Península, que se dividen entre activos o inactivos. Los activos poseen influencia directa del mar por erosión, y se catalogan como acantilados occidentales. Los inactivos carecen de influencia marítima, al estar frente a caletas o llanuras de la zona oriental. Sin embargo, estos últimos se ven influenciados por lluvias, derrumbes o movimientos en masa. Por la zona norte estos acantilados han evolucionado a pendientes por desprendimiento de material.
- Quebradas: Sistemas de drenaje o escurrimiento estacional, que tienen su máximo flujo en estaciones frías. Se originan en el sistema montañoso del macizo peninsular.
- Terrazas marinas: Extensas superficies de leve inclinación al oeste, escalonadas a los 50 y 10 metros sobre el nivel del mar. Se conforma por esquistos y pizarras del precámbrico.
- Sistema montañoso: conformados por rocas graníticas de grandes relieves y pendientes, que aflora desde el centro de la Península. Entra en contacto con terrazas marinas, y destacan los Cerros Teta Norte y Sur.

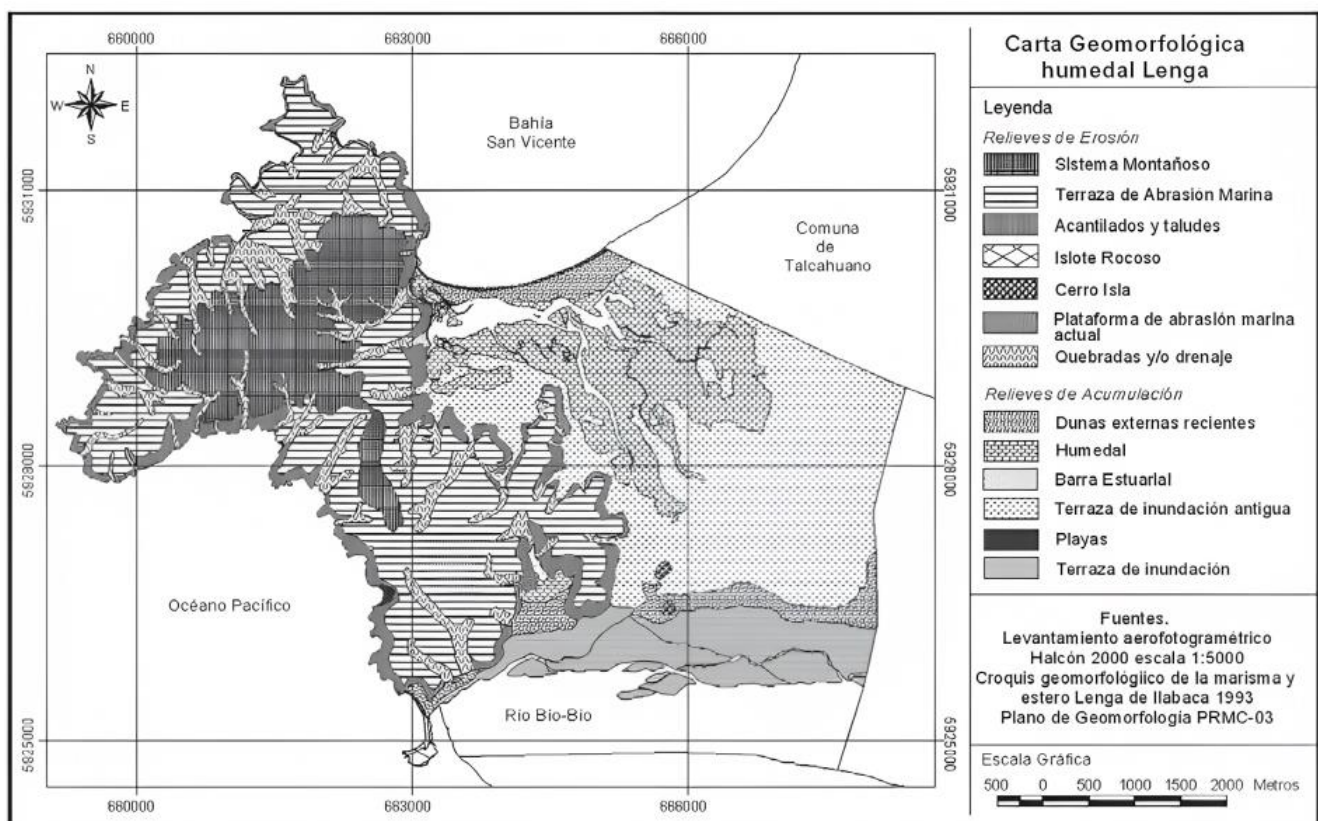


Figura 1: Carta geomorfológica de Península de Hualpén. Obtenido de Vásquez, 2013.

La Cordillera de la costa presente en la península se ha visto continuamente erosionada por el viento marítimo, en ambos de sus levantamientos graníticos. Estos levantamientos se han denominado Tetras del río Biobío con variadas terrazas escalonadas y quebradas de hasta los 100 metros sobre el nivel del mar (Torres, 2018).

En específico, la Caleta Chome se emplaza en laderas susceptibles a actividad sísmica y está rodeada de acantilados vivos. Las laderas poseen intervención antropogénica al implementar caminos y viviendas, contribuyendo negativamente a la flora de la caleta pesquera.

### 3.1.2. Geología:

La ubicación sobrepasa altitudes de 300 metros sobre el nivel del mar, con dos formaciones geológicas de vital importancia para el desarrollo del estudio. Guiándose por la Figura 2, se emplazan principalmente las rocas graníticas del Stock Hualpén en la sección noroeste de la Península, en la que se reconoce mineralógicamente un Monzogranito leucocrático del Paleozoico, definido por Creixell et al. (2001); En cambio, en la zona al sureste predomina el basamento metamórfico, compuesto por rocas cristalinas y pizarras precámbricas fácilmente deleznable por meteorización. Esta formación se ve cubierta por depósitos sedimentarios compuestos por areniscas del plioceno-pleistoceno.

Los movimientos en masa de la zona ocurren principalmente por las unidades litológicas ya presentadas, aunque existan distintos tipos de depósitos no consolidados emplazados en la zona de estudio.

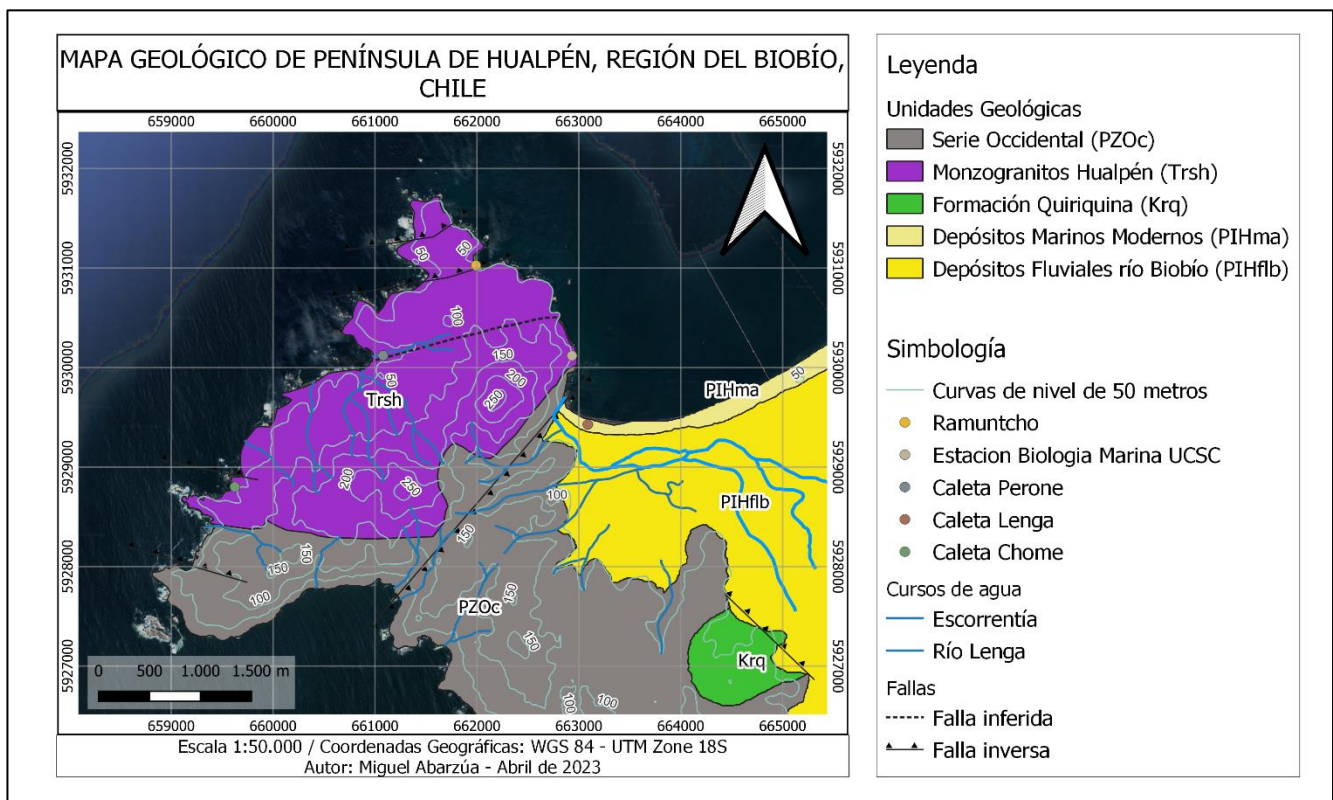


Figura 2: Mapa geológico de la Península de Hualpén. Modificado de (Campo-II, 2009).

**Stock Hualpén:** Monzogranitos leucocráticos con biotitas y turmalinas; Afloran principalmente en las Tetras del Biobío. De grano medio, gris claro al estar fresca y rosácea cuando está meteorizada (Creixell, 2001). El ángulo de fricción entregado por esta roca ígnea varía entre 35° a 45° (Hoek & Bray, 1981). Su presencia florece en acantilados frente a la costa, a causa de la erosión de la influencia marítima.

**Basamento Metamórfico:** Pizarras, micaesquistos y metacherts débiles a causa de la meteorización, en constante metamorfismo de bajo grado que presenta un ángulo de fricción menor al Stock Hualpén, al variar entre 30° a

40° (Hoek & Bray, 1981). Es posible encontrar variantes de las pizarras, muy deleznable por la exposición a procesos erosivos.

Entre los depósitos no consolidados, podemos encontrar los depósitos fluviales del río Biobío, representado por arenas limosas negras mal graduadas y subredondeadas; y depósitos marinos modernos de origen aluvial y coluvial, formados por los suelos granulares de las playas litorales junto a la Bahía San Vicente.

### **3.2. Clima**

La Península se caracteriza por ser una zona climática que varía entre un clima templado que es mediterráneo y cálido a uno húmedo y lluvioso, de precipitaciones de distinta intensidad según el régimen climático (Vásquez, 2013). Las temperaturas medias anuales rondan los 13°C, con variaciones de 5 a 6°C, y las precipitaciones medias anuales promedian en 1.134 milímetros, llegando incluso a 1.330 milímetros en años húmedos por influencia directa de la humedad relativa del Océano Pacífico. El flujo de los vientos predomina un origen desde el suroeste en la mayor parte del año, excepto por invierno en que el flujo varía desde el norte. Esto se ve reflejado en septiembre, que es el mes en que cambia el sentido del viento. Al ser una zona litoral, su clima varía acorde a la influencia marítima, que ayuda a estabilizar su temperatura.

### **3.3. Vegetación**

El bosque nativo es uno costero hidrófilo en que predominan los peumos, olivillos, boldos, litres y más. Las especies del ulmo, laurel y canelo tienen menor presencia en la zona. Podemos encontrar por otra parte las lianas y epífitas que son comunes en quebradas con mayor paso del agua. En cuanto a elementos arbustivos, se presentan rosas mosqueta, quilas, colihues, plantas trepadoras y más (Orellana, 2010).

Por otra parte, hay pastizales y arbustos de muy leve altitud, considerando tanto especies secas en zonas montañosas como pastizales húmedos en terrazas fluviales, que predominan en suelos arenosos.

### **3.4. Meteorización**

La zona posee meteorización tanto física, por fragmentación o desintegración del macizo rocoso, como química, por descomposición o alteración de las rocas por agentes externos. La meteorización predominante en la Península ocurre en las rocas intrusivas del batolito costero, que es aquel en el que se forma el maicillo; un suelo residual que nace de la meteorización por agentes climáticos en rocas no transportadas. Este suelo se caracteriza por su tamaño de limo y baja cohesión, que causa un mayor riesgo de remoción en masa. Esta meteorización va de la mano con los cambios bruscos que sufre el terreno a lo largo del año, considerando fuertes lluvias, oleaje y vientos marinos, haciendo así probable el transporte mecánico del material en zonas costeras (Quezada, Cecione, Esterio, & Pineda, 1997).

### **2.1. Remoción en masa**

Los tipos de remoción de masas han sido extensivamente estudiados hasta el punto de clasificarlos según el tipo de material removido o el movimiento efectuado al producirse la remoción (Cruden & Varnes, 1996). Las remociones en masa se distinguen en: desprendimientos y volcamientos, descritos como un movimiento rápido de masa en caída, en forma de bloques de roca o masa de material de suelo. Se diferencian entre caída libre vertical o movimiento rotacional, influenciados fuertemente por familias de discontinuidades; deslizamientos rotacionales y traslacionales, identificados como movilización de una masa de suelo de gran volumen dependiente de la superficie de rotura, que puede ser planar o cóncava, afectando su comportamiento al ejercer la remoción; flujo y extensión lateral, que dependen de factores como la saturación y tipo de material. Su velocidad puede variar desde muy lenta como en casos de reptación, o extremadamente rápida como en caídas de rocas. Se relacionan directamente con tormentas y lluvias prolongadas (Hauser, 2000).

## 2.2. Descripción de macizos rocosos según Norma ISRM

### 2.2.2.1. Resistencia a compresión simple (RCS)

Para la obtención del parámetro de la resistencia a compresión simple, se utiliza el Martillo Schmidt, que es un esclerómetro eficaz con la capacidad de medir el índice de rebote de materiales de construcción o roca mediante ensayos no destructivos (Aydin & Basu, 2005).

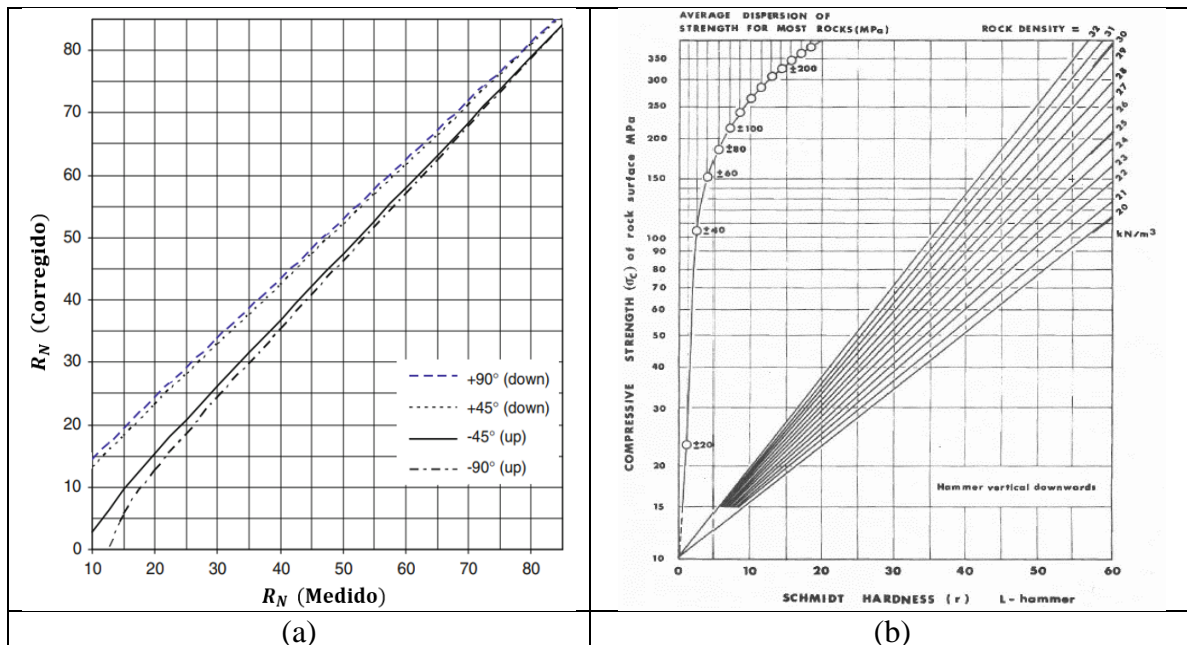


Figura 3: (a) Normalización de medidas obtenidas por Martillo Schmidt tipo N. Modificado de Aydin, 2009; (b) Obtención de compresión uniaxial simple por valores de rebote de Martillo Schmidt. Obtenido de Miller, 1965.

El esclerómetro recomendado es el de tipo N, ideal para pruebas in-situ de bloques en roca gracias a que arroja resultados óptimos en bloques de más de 100 mm. Dentro de los métodos de medición, se destaca el recomendado (Barton & Bandis, 2017), que sugiere tomar 20 medidas, y analizar los 10 valores más altos obtenidos, con tal de evitar un porcentaje de error en aplastamiento de material suave. En caso de ensayar con cierto ángulo de inclinación, es necesario corregir los resultados con la relación representada en la Figura 3 (a), que permite normalizar los datos (Aydin, 2009). Los índices de rebotes obtenidos se ingresan a la relación de la Figura 3 (b), que permite obtener la resistencia a la compresión simple con el promedio obtenido del martillo Schmidt (Miller, 1965).

### 2.2.2.2. Rock Quality Designation (RQD)

Es un parámetro que evalúa cuantitativamente la calidad de la roca en 5 categorías, y se expresa en la sumatoria de testigos de roca con una longitud mínima de diez centímetros, recuperados de sondajes. El diámetro de estos testigos tiene que ser, como mínimo 48 milímetros (Deere & Deere, 1988) con una fórmula presentada como:

$$RQD = \frac{\text{piezas del testigo} \geq 10\text{cm}}{\text{largo total del testigo}} \times 100\%$$

En la aplicación de la ecuación, se miden todos los trozos obtenidos de un testigo base, y se suman los cuerpos que midan sobre diez centímetros para dividirlo por el total del largo del sondaje, con tal de clasificar la roca. La Tabla 1 muestra la descripción de la calidad de la masa rocosa en sus categorías, dependiendo únicamente del RQD obtenido.

Tabla 1: Calidad de roca según índice RQD (Modificado de Deere, 1988)

RQD	Descripción de la calidad de la roca
0 - 25%	Muy Pobre
25 - 50%	Pobre
50 - 75%	Razonable
75 - 90%	Buena
90 - 100%	Excelente

En su tiempo, se consideró que la teoría propuesta y desarrollada por Deere es práctica y necesaria para testigos de roca (Bieniawski, 1984) pero no suficiente para la descripción de macizos rocosos. Por ello se planteó un método indirecto para obtener el RQD, sin testigos de roca (Palmström, 2005):

$$RQD = 110 - 2.5J_v$$

$$J_v = \sum_{i=1}^j \left( \frac{1}{S_i} \right)$$

En el que  $J_v$  es el parámetro que representa al índice de discontinuidades por metro cúbico de roca (Palmström, 1974), y obtenido mediante el  $S_i$ , que es el espaciamiento promedio en metros para una cantidad  $i$  de familias de discontinuidades, y un  $J$  total de familias de discontinuidades. Es posible clasificar el grado de fracturamiento de un macizo rocoso, según el valor obtenido para  $J_v$  en la Tabla 2.

 Tabla 2: Categorización de índice  $J_v$  según número de fracturas (Palmström, 2005)

	Grado de fracturamiento					
	Muy bajo	Bajo	Moderado	Alto	Muy alto	Triturado
$J_v$	< 1	1-3	3-10	10-30	30-60	> 60

#### 2.2.2.3. Espaciamiento de discontinuidades

Discontinuidades de todo tipo, considerando planos de estratificación, fallas, o diaclasas. Se considera como la distancia media entre los planos de discontinuidad de cada familia. Se mide la distancia de cada conjunto de discontinuidades con las mismas características geomecánicas, y se define su descripción en la Tabla 3.

Tabla 3: Clasificación del espaciado de las discontinuidades (Deere, Hendron, Patton, &amp; Cording, 1967).

Descripción	Espaciado de las juntas	Tipo de macizo rocoso
Muy ancho	>3 m	Sólido
Ancho	1-3 m	Masivo
Moderadamente cerrado	0,3-1 m	En bloques
Cerrado	50-300 mm	Fracturado
Muy cerrado	<50 mm	Machacado

#### 2.2.2.4. Condición de discontinuidades

Los siguientes factores se definen según la Clasificación RMR de Bieniawski en 1989. El estado del set de discontinuidades se define por los siguientes parámetros:

- Abertura de las discontinuidades
  - Para medir la abertura de una fractura, es necesario utilizar una regla milimétrica para obtener un valor exacto de esta. Es necesario repetir el proceso tanto a lo largo de la misma

discontinuidad, así como en las fracturas del mismo set. El valor de abertura y la competencia de la roca es inversamente proporcional.

- Longitud de la discontinuidad
  - Se define como un plano de discontinuidad que puede estar relacionado a procesos de rotura del macizo rocoso. Se refiere a la extensión de la junta en el macizo rocoso, y al igual que la abertura es inversamente proporcional a la calidad del macizo rocoso.
- Rugosidad en las paredes de la discontinuidad
  - También llamado Joint Roughness Coefficient, depende proporcionalmente de la rugosidad de las paredes de la junta. Su valor de clasificación varía de 1 a 20, y se obtiene a partir de perfiles de rugosidad ensayados en la roca maciza.

En la Figura 4 (a), se ven distintos tipos de perfiles para estimar el coeficiente. Para obtener el valor del parámetro JRC, es necesario el uso de una herramienta llamada rugosímetro (Figura 4, (b)) que luego de ser empujada sobre el macizo, muestra el perfil de rugosidad de la junta (Barton & Choubey, 1977).

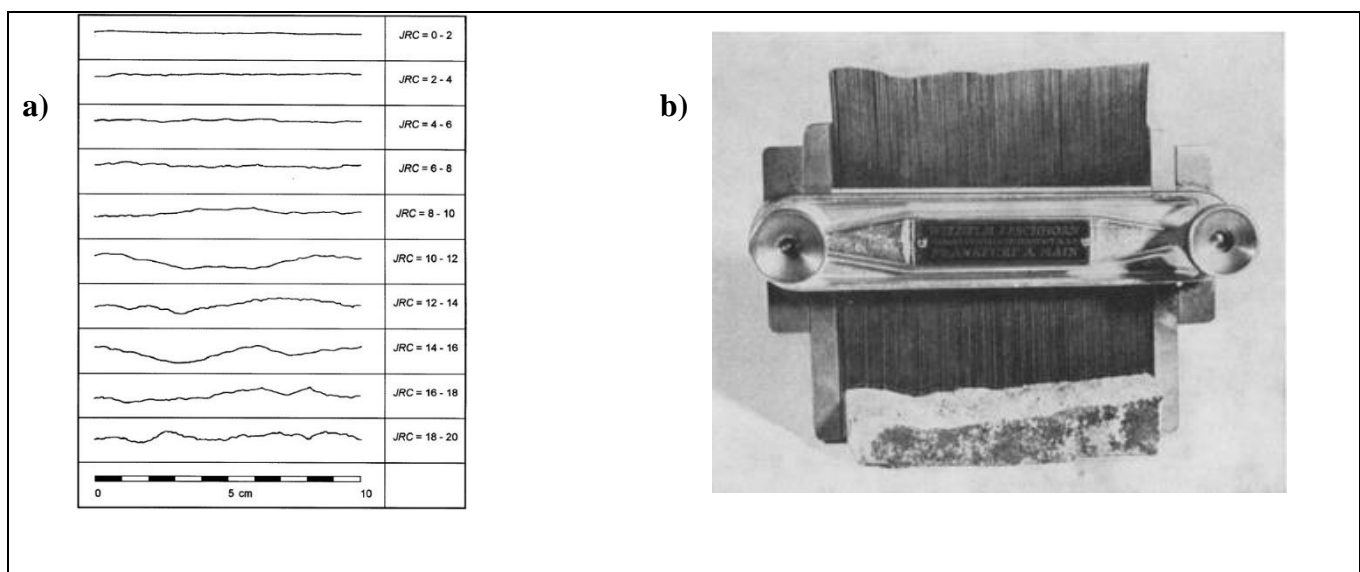


Figura 4: (a) Perfiles típicos de rugosidad según JRC. (b) Rugosímetro luego de medir valores de una masa rocosa. Obtenido de Barton & Choubey, 1977.

- La aplicación del JRC dentro del sistema de clasificación del macizo rocoso tiene su interpretación basada en lo ensayado por el supervisor y el equipo en la estación geomecánica. Por consecuencia, su clasificación variará dependiendo de las similitudes que tengan los resultados obtenidos en el macizo con los ejemplos de los perfiles.
- Relleno de la discontinuidad
  - Depende directamente del estado de meteorización de la junta y de la presencia de agua, como para permitir vetas, material arcilloso o manchas de óxido de manganeso o hierro. Un relleno blando se categoriza como uno peor que duro, por lo que se estima como el más inconveniente.
- Grado de meteorización de la discontinuidad
  - Se representa como el estado general de descomposición de la familia de discontinuidad. Un grado alto de meteorización va de la mano con un suelo residual, que se ha visto expuesto a procesos erosivos como la lluvia y brisa marítima. En la contraparte, se identifica como un macizo rocoso limpio a aquel sin presencia de partículas pequeñas ni manchas de oxidación.
- Orientación de discontinuidades
  - Los sets se presentan en familias con orientaciones y características homogéneas, y definen la forma de los bloques del macizo rocoso. Su orientación se define por la dirección del buzamiento, que es la dirección de la línea de máxima pendiente del plano de discontinuidad con respecto al norte; y el buzamiento, que es la inclinación con respecto a la horizontal. Es

necesario medir un número suficiente de orientaciones de discontinuidades para definir adecuadamente cada familia, y el número de medidas depende de la dimensión de la estación.

- Número de discontinuidades
  - Diversos procesos como la erosión, deformación tectónica, actividad sísmica y más, pueden generar series de fracturas con orientaciones paralelas que permiten entender la estructura de la roca y su comportamiento mecánico. Estas fracturas con paralelismo se comprenden como una familia de discontinuidades, y es posible encontrar más de una en un mismo macizo rocoso.

En el cálculo de estos parámetros, es necesario evaluar cada una de las familias de discontinuidades de la estación geomecánica de forma individual, para luego considerar el peor caso de las familias, y no el promedio. De esta forma, solo evaluamos el peor caso de rotura del talud (Bieniawski, 1989).

#### 2.2.2.5. Presencia de agua

El agua presente en un macizo rocoso con discontinuidades influye más que cualquier otro factor en su comportamiento. Según el tipo de presencia de flujo de agua, este puede deteriorarse a gran velocidad hasta alcanzar el punto de ruptura. Este flujo de estima cada 10 metros de flujo en litros/minutos, categorizándolo en completamente seco, ligeramente húmedo, húmedo, goteando, y agua fluyendo (Bieniawski, 1989).

### 2.6. Análisis Cinemático

Se refiere al sistema de dirección de ruptura, o forma de falla representada en un estereograma, como se ve en la Figura 5 (b) y como afecta la relación de los ejes en la estabilidad de un macizo rocoso. Es posible reconocer el envolvente de falla a través de parámetros de dip-dip direction, que es una notación eficiente para describir el ángulo y la dirección de cualquier inclinación. El dip o manteo siempre será menor a  $90^\circ$  e indica la diferencia del ángulo de inclinación del plano, con respecto al eje horizontal. Dip direction o rumbo rondará valores entre  $0^\circ$  y  $360^\circ$  y representa la dirección de la inclinación con respecto a la dirección norte.

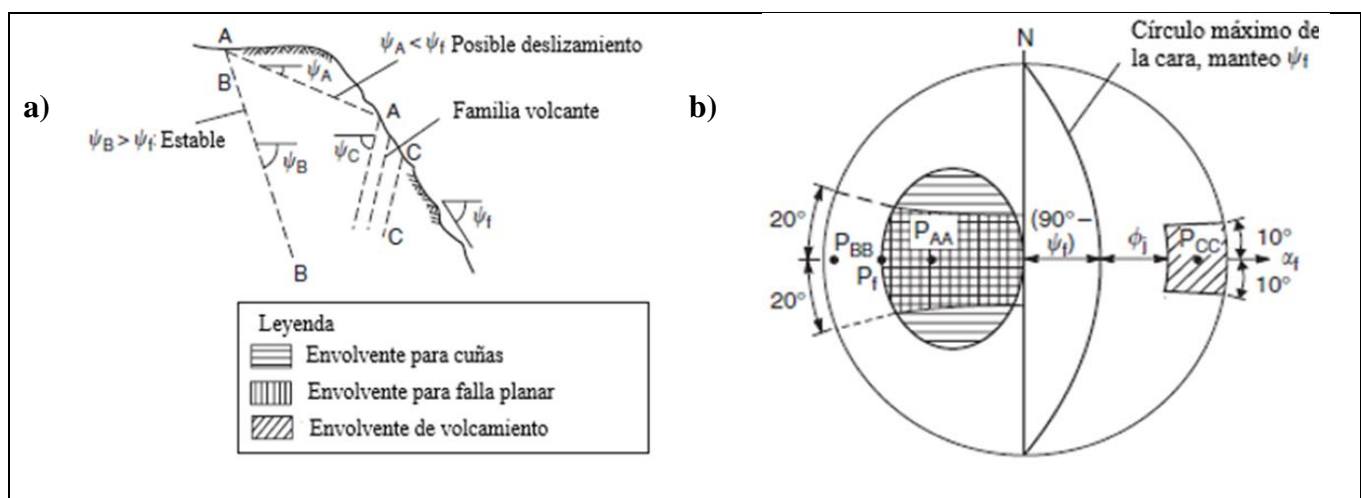


Figura 5: (a) Análisis cinemático de bloques en roca, diferenciando tipo de envolvente de falla. (b) Estereograma con polo y plano de falla. (Modificado de Wyllie, 2017).

La Figura 5 (a) identifica las fallas más frecuentes y se categorizan en planar, por cuña y por volcamiento.

La falla planar se identifica como un bloque de suelo o roca que cae sobre el eje de un set de discontinuidades que no debe variar en más de  $20^\circ$  de inclinación, con respecto al eje del talud. En cualquier otro caso en el que no se cumpla la condición, este set de discontinuidades contribuirá a la estabilidad del talud con respecto a la falla planar, y por tanto:  $|a_j - a_s| > 20^\circ$ .

Falla en cuña ocurre cuando el polo del eje de la intersección de dos sets de discontinuidades cae dentro del área de falla en el estereograma. Al ser la conjunción de dos sets, permite abarcar un área de falla mayor a la que se daría en una falla planar (Wyllie, 2017).

La falla por volcamiento depende de la dirección de manto de las discontinuidades. El factor condicionante para su proceso de falla son los sets perpendiculares, que mantean en un eje que tienda al talud con una diferencia no mayor a 20° de inclinación. Es posible construir bloques de roca de forma cúbica, o de piedras laja. Se considera dos tipos de volcamiento: directo, que depende de una separación de sets de discontinuidades en forma de escalera ascendente (Goodman & Bray, 1976); flexional, que ocurre cuando los estratos sufren de una fractura parcial, generando bloques pequeños y desordenados en forma de pizarras y filitas.

### 2.3. Clasificaciones Geomecánicas

#### 2.3.1. Método Rock Mass Rating (RMR)

El Sistema de clasificación de macizo rocoso de Bieniawski fue introducido durante el año 1973 y ha sido modificado a lo largo de los años, con su última actualización en 1989 gracias a su utilidad en el rubro minero y geotécnico; se emplea su uso en análisis de túneles, taludes y macizos rocosos. Las clasificaciones geomecánicas caracterizan el macizo a partir de afloramientos o sondeos, con tal de obtener sus parámetros de resistencia y deformabilidad y comprender su posible comportamiento y calidad, para recomendar un sistema de soporte para mitigar el riesgo de remoción (González de Vallejo et al., 2002). Para aplicar el sistema de clasificación es necesario realizar observaciones y medidas de terreno, de las que se basan todos los resultados obtenidos a nivel empírico. Cada talud en el que se realizó estudio se considera como una estación geomecánica, y por consecuencia es necesario visualizar su entorno en busca de estructuras geoestructurales como fallas normales, inversas o destrales, y aparte sus sets de discontinuidades.

Tabla 4: Clasificación del macizo rocoso RMR (González de Vallejo et al., 2002)

1	Resistencia de la matriz rocosa (MPa)	Ensayo de carga puntual	> 10	10-4	4-2	2-1	Compresión simple (MPa)		
		Resistencia a Compresión simple	> 250	250-100	100-50	50-25	25-5	5-1	< 1
Puntaje			15	12	7	4	2	1	0
2	RQD	90%-100%	75%-90%	50%-75%	25%-50%	< 25 %			
	Puntaje	20	17	13	6	3			
3	Separación entre diaclasas	> 2 m	0.6-2 m	0.2-0.6 m	0.06-0.2 m	< 0.06 m			
	Puntaje	20	15	10	8	5			
4	Longitud de la discontinuidad	< 1 m	1-3 m	3-10 m	10-20 m	> 20 m			
	Puntaje	6	4	2	1	0			
	Abertura	Nada	<0,1 mm	0,1-1,0 mm	1-5 mm	> 5 mm			
	Puntaje	6	5	3	1	0			
	Rugosidad	Muy rugosa	Rugosa	Ligeramente Rugosa	Ondulada	Suave			
	Puntaje	6	5	3	1	0			
	Relleno	Ninguno	Relleno duro < 5mm	Relleno duro > 5mm	Relleno blando < 5mm	Relleno blando > 5mm			
	Puntaje	6	4	2	2	0			
	Alteración	Inalterada	Ligeramente alterada	Moderadamente alterada	Muy alterada	Descompuesta			
	Puntaje	6	5	3	1	0			
5	Agua freática	Seco	Ligeramente húmedo	Húmedo	Goteando	Agua fluyendo			
	Puntaje	15	10	7	4	0			

Para determinar la calidad del macizo rocoso, es necesario describirlo con lo visto el punto 2.2.

## 2.4. Slope Mass Rating

El sistema de clasificación de calidad rocosa de taludes o SMR, fue desarrollado para la aplicación de un RMR modificado exclusivamente para laderas o taludes (Romana, 1985). Permiten la formulación de factores dependientes de la geometría y orientación de las discontinuidades, con tal de relacionarlas con las propiedades del talud. De esta forma, los parámetros obtenidos en cada factor se incorporan directamente con el RMR básico obtenido, para resolver el SMR en la siguiente ecuación:

$$SMR = RMR_b + (F_1 * F_2 * F_3) + F_4$$

Los factores mencionados en la Ecuación de SMR se calculan de la siguiente forma:

1.  $RMR_b$  Se obtiene por el método de clasificación de macizo rocoso definido en el apartado 2.3 (Bieniawski, 1989).
2.  $F_1$  Se obtiene de la diferencia de dirección de cada familia de discontinuidades individuales, y la dirección general del talud. El paralelismo entre las caras es proporcional a la probabilidad de falla.
3.  $F_2$  Un factor que varía únicamente del grado de inclinación de cada set de discontinuidades individuales. Se aplicación es nula en falla por volcamiento. Es determinante en falla por rotura planar o cuña.
4.  $F_3$  Su obtención varía de la diferencia de grado de inclinación o buzamiento de cada familia de discontinuidad individual, y el grado de inclinación o buzamiento general del talud.
5.  $F_4$  Depende del método de excavación del talud. Varía según el nivel de intervención antropogénica.

Tabla 5: Factores de ajuste de discontinuidades para el método SMR, considerando falla planar, falla por cuña y falla por volcamiento (Modificado de Romana, 1985).

Tipo de Falla		Ángulos auxiliares	Muy favorable	Favorable	Normal	Desfavorable	Muy desfavorable
P	A	$ \alpha_j - \alpha_s $	> 30	30 – 20°	20 – 10°	10 – 5°	< 5°
C		$ \alpha_j - \alpha_s $					
V		$ \alpha_j - \alpha_s - 180 $					
P/C/V	$F_1$		0.15	0.40	0.70	0.85	1.00
P/C	B	$ \beta_j $ o $ \beta_j $	< 20°	20 – 30°	30 – 35°	35 – 45°	> 45°
P/C			0.15	0.40	0.70	0.85	1.00
V			1.00				
P	C	$\beta_j - \beta_s$	> 10°	10 – 0°	0°	0 – (-10°)	< (-10°)
C		$\beta_j - \beta_s$					
V		$\beta_j + \beta_s$	< 110°	110 – 120°	> 120°	–	–
P/C/V	$F_3$		0	-6	-25	-50	-60
<b>Método de excavación <math>F_4</math></b>							
Talud natural		15	Voladura o mecanizada		0		
Precorte		10	Voladura deficiente		-8		
Voladura suave		8					

\* P: Planar, C: Cuña, V: Volcamiento.

Como se ve en la Tabla 5, es necesario medir cada uno de los sets de discontinuidades presentes en el talud, y aplicar la ecuación SMR de forma individual por set con los datos medidos del talud general. Con ello, para poder estimar el caso más desfavorable es necesario utilizar el SMR que arroje el resultado más bajo (Romana et al, 2001).

## 2.4. Q de Barton

Es un sistema de clasificación de macizos rocosos propuesto por Barton en 1974, para el cálculo de tensiones y calidad de túneles. Se mide en seis variables que se relacionan para interpretar la calidad rocosa de la zona de estudio, en un rango de valores que oscilan entre 0.001 a 1000 en escala logarítmica. Se da solución al método de clasificación con la siguiente ecuación:

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF}$$

Donde, *RQD*: Rock Quality Designation [%]; *J<sub>n</sub>*: Número de sets de discontinuidades e indica grado de fracturación del macizo rocoso; *J<sub>r</sub>*: índice de rugosidad de las fracturas; *J<sub>a</sub>*: índice de alteración de discontinuidades; *J<sub>w</sub>*: coeficiente reductor por presencia de agua; *SRF*: coeficiente que depende del estado tensional del macizo rocoso.

- $\frac{RQD}{J_n}$  : Representa el tamaño de los bloques, o bien estructura de la masa de la roca.
- $\frac{J_r}{J_a}$  : Estima las características de rugosidad y fricción de las paredes de la junta.
- $\frac{J_w}{SRF}$  : Estima el estado tensional en el macizo rocoso.

La ecuación se puede diseccionar en tres elementos esenciales, que se pueden representar de esta forma:

Barton estudió más de 200 macizos rocosos pertenecientes a túneles en los que logró interpretar la relación entre la calidad de la roca presente, con la efectividad del método de soporte aplicado en el proyecto. Con ello, fue posible clasificar los macizos rocosos con el sistema Q en distintas categorías presentadas en la Tabla 6:

Tabla 6: Clasificación de macizo rocoso según sistema Q de Barton, Modificado de Barton, 1974.

Valor de Q	Descripción del macizo rocoso
0.001 - 0.01	Excepcionalmente malo
0.01 - 0.1	Extremadamente malo
0.1 - 1	Muy malo
1 - 4	Malo
4 - 10	Medio
10 - 40	Bueno
40 - 100	Muy bueno
100 - 400	Extremadamente bueno
400 - 1000	Excepcionalmente bueno

## 2.5 Q-Slope

Es una clasificación geomecánica de Bar y Barton que utiliza los parámetros del Q de Barton original, junto a otras variables de ajuste para designar la calidad de macizos rocosos a la estabilidad de taludes. Considera las condiciones de erosión y meteorización como lluvias, cuñas por congelación, entre otros, y además la competencia de la roca su estabilidad con respecto al talud y sus sets de discontinuidades (Barton & Bar, 2015).

$$Q - Slope = \frac{RQD}{J_n} \times \left(\frac{J_r}{J_a}\right)_0 \times \frac{J_{wice}}{SRF_{Slope}}$$

Los parámetros que se mantienen desde Q de Barton a Q-Slope son el RQD,  $J_n$ ,  $J_r$  y  $J_a$ , y las demás variables fueron adaptadas, como ocurre en el caso del indicador de la condición de agua  $J_w$  que fue reemplazado por el nuevo parámetro  $J_{w_{ice}}$ , el cual incorpora el efecto de la exposición a agentes climáticos y ambientales (termoclastia, crioclastia, lluvias intensas, entre otros). El componente SRF (Strength Reduction Factor) pasa a llamarse  $SRF_{slope}$ , que considera tres tipos de formas de obtener el valor, y se debe elegir el más perjudicial. Además, se anexa el O-factor, que depende de la disposición desfavorable de las familias de discontinuidades que generan riesgos de falla por cuña o planar. Este factor descrito en la Tabla 7 considera para el set A, el valor más desfavorable y el Set B el segundo más desfavorable. Es necesario aplicar este factor para interpretar cuáles son los sets de discontinuidades más perjudiciales para la estación geomecánica (Bar & Barton, 2017).

Tabla 7: Factor de orientación de discontinuidades (Bar & Barton, 2017).

Orientación O-Factor	Set A	Set B
Muy favorable	2.0	1.5
Favorable	1.0	1.0
Desfavorable	0.75	0.9
Muy desfavorable	0.5	0.8
Rotura	0.25	0.5

Una vez obtenido el valor del sistema de clasificación Q-Slope, es posible obtener el máximo ángulo de estabilidad del talud sin necesidad de un soporte o intervención antropogénica. Sin importar la altura, el ángulo varía por:

$$\beta = 20 \log(Q_{slope}) + 65^\circ$$

Luego de obtener el máximo ángulo de estabilidad  $\beta$ , Este se compara con el resultado obtenido mediante el Q-Slope, y se introduce en el gráfico de la Figura 6. Esto permite evaluar la estabilidad del talud de estudio, discriminándolo en la zona estable, que no necesita medidas de estabilización, en la zona de estabilidad incierta, que requiere más estudio para evaluar su estabilidad, y en la zona inestable que requiere estabilización para prevenir posibles remociones en masa.

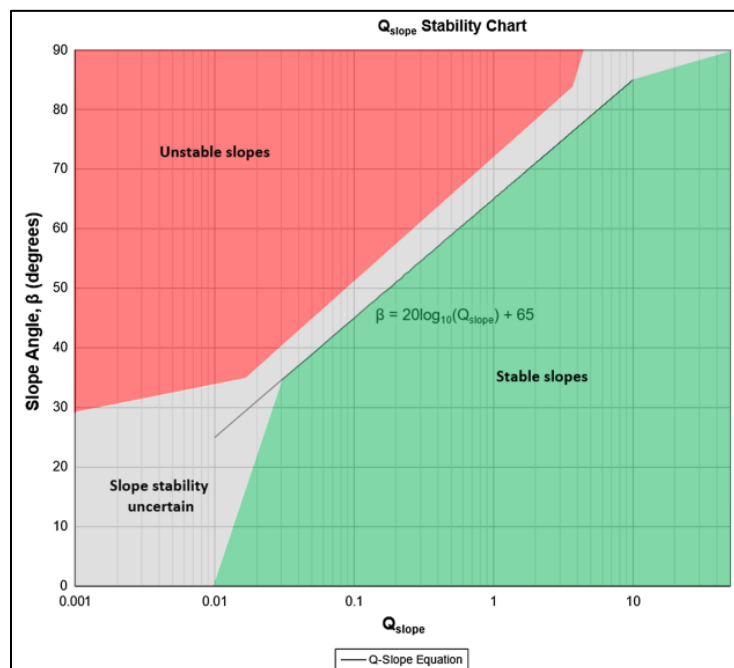


Figura 6: Gráfico de estabilidad de Q-Slope, que se compara con la altura estable máxima (Barton & Bar, 2017).

## 2.6. Mapas de referencia

Se recopilieron dos mapas de procesos de remoción en masa que cubren la Península de Hualpén. El primero de ellos es el elaborado por el SERNAGEOMIN, que se basa en una matriz de álgebra de mapas que utiliza factores como la geología, las pendientes y antiguas remociones de la zona, para generar un mapa que trasluzca las zonas de inestabilidad. El mapa A de la Figura 7 considera tres niveles de amenaza, siendo amarillo, bajo; naranja, medio; rojo, alto.

El segundo considera un mapa de remociones en masa elaborado por la Universidad del Bío-Bío, que utiliza una evaluación de múltiples criterios como la geología, los sismos, el clima, las pendientes, cobertura vegetal y exposición de las laderas, que considera dos niveles de susceptibilidad: baja y alta, como se ve en el mapa B de la Figura 7.

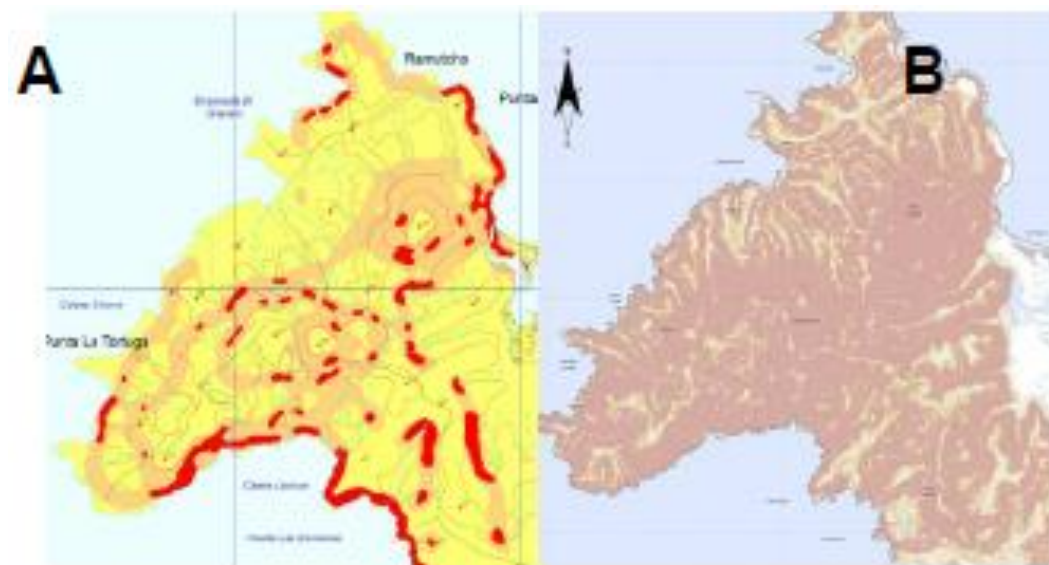


Figura 7: Mapas de procesos de remoción en masa en Península de Hualpén. (A) Elaborado por SERNAGEOMIN. (B) Elaborado por Universidad del Bío-Bío. (Municipalidad de Hualpén, 2018).

## 4. METODOLOGÍA:

El estudio se realizó en conjunto con la evaluación de Caleta Peroné, Caleta Lengua, Caleta Ramuncho y la Playa los Cuervos. Sin embargo, este artículo solo considera los resultados obtenidos para Caleta Chome y sus vías de evacuación.

La estación 1 y 2 fueron ensayadas en el 16 de junio de 2022; la estación 3 en el 14 de septiembre de 2022; la estación 4 y 5 en el 2 de diciembre de 2022.

Se evaluó un mapa de interpolación para cada uno de los sistemas de clasificación estudiados en el artículo, con tal de obtener una representación visual de cómo se distribuyen los valores de cada clasificación a lo largo del área de interés.

### 4.1 Estaciones Geomecánicas en terreno:

La zona de estudio se emplaza sobre la Península de Hualpén, y en específico en las inmediaciones de Caleta Chome y sus vías de evacuación. El trabajo se basó en dos etapas de terreno: La primera consistió en reconocimiento de taludes o laderas que posean un riesgo de remoción visible y que además en caso de falla implique un peligro a la población o vía pública. Al seleccionar un sitio de estudio para aplicar sistemas de clasificación geomecánicos, se obtuvieron sus coordenadas UTM con un sistema de navegación GPS portátil, y se fotografió para monitorizar la estación en caso de algún siniestro futuro. Las estaciones geomecánicas

consideradas en este estudio se caracterizan como aquellas ligadas a Caleta Chome, sus inmediaciones y vías de evacuación. Por tanto, en la Figura 8 se identifican como EGM-X, siendo X el dígito que caracteriza la estación.

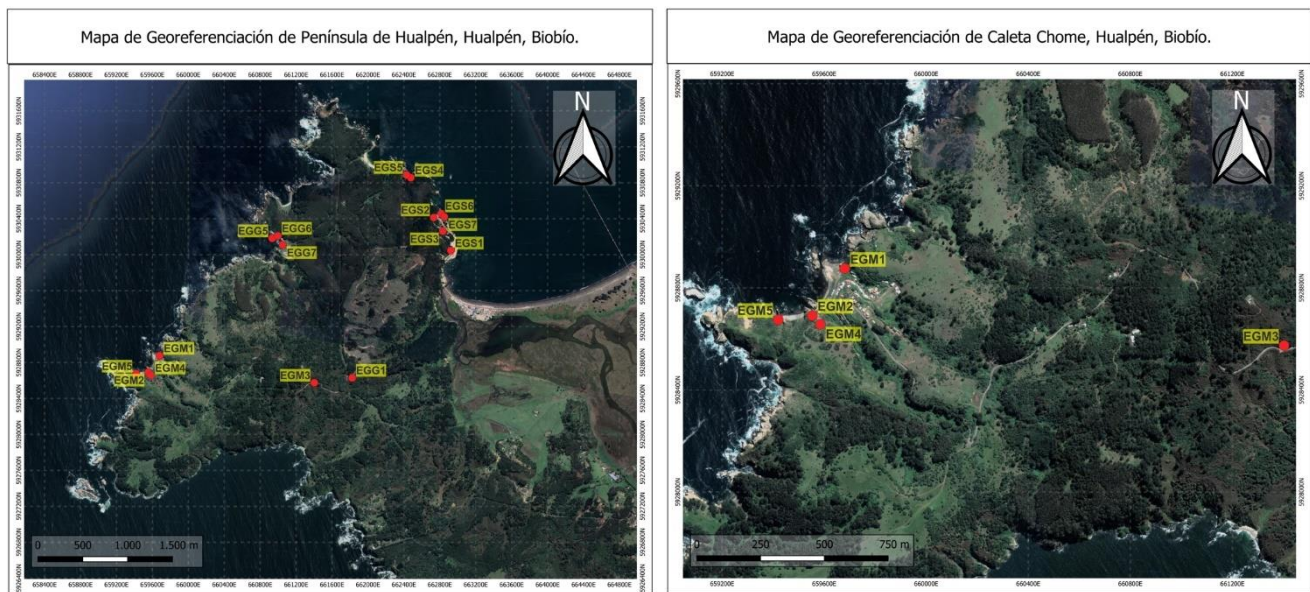


Figura 8: Mapas de georeferenciación, con ubicación de estaciones geomecánicas. (a) Península de Hualpén. (b) Caleta Chome.

La segunda etapa de terreno consistió en la toma de parámetros geotécnicos, geológicos y geomecánicos de cada estación geomecánica independiente, identificadas en la Figura 9. Esta recolección de datos consideró la aplicación de ensayos de resistencia a compresión simple, calidad de macizo rocoso, orientación y manto de cada talud o ladera y sus familias de discontinuidades, todas las variables relacionadas a la resolución del sistema de clasificación RMR, SMR, Q de Barton y Q-Slope. El equipo utilizado para la clasificación de los macizos rocosos fue proporcionado tanto por el Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad Católica de la Santísima Concepción, como por el Profesor Guía José Montenegro, y consistió en:

Esclerómetro o Martillo Schmidt tipo N, aplicado contra macizos rocosos, roca intacta y suelos residuales, con tal de obtener el índice de rebote y con ello, la resistencia a la compresión simple (MPa) con gráfico representado en la Figura 3 (a), luego de realizarse la corrección con el gráfico de la Figura 3 (b). Es necesario considerar el grado de inclinación al utilizar la herramienta contra el talud o ladera, para tener mayor control sobre el índice de error. Para el muestreo de datos se midieron veinte datos a lo largo de la cara del talud, con tal de promediar los 10 valores mayores, y aquellos considerarlos en el análisis del talud.

Brújula geomecánica, se utilizó para aplicar el método dip – dip direction sobre las estaciones a evaluar. Este método se caracteriza por recolectar datos de forma fácil y precisa. Dentro de su uso en terreno, se aplicó para obtener las mediciones promedio de la cara del talud y de las familias de discontinuidades. Se calculó un promedio de diez medidas de grado de inclinación y grado de orientación con respecto al norte, de cada familia de discontinuidad y cara del talud, y de todas las estaciones evaluadas.

Rugosímetro, utilizado para obtener rugosidad (mm) presente en las aberturas de los sets de discontinuidades. Este nivel de rugosidad compara la máxima diferencia de irregularidad entre la cota mayor y menor del rugosímetro, luego de aplicarse sobre el talud. Esta distancia debe medirse tanto horizontal como verticalmente, como un ejemplo para su evaluación está la Figura 4 (b). Para este parámetro se tomaron 6 datos por set.

Cinta métrica, que ayudó en la medición de persistencia (m), espaciamiento (m), altura del talud (m) y RQD (%). Para el cálculo de persistencia se midieron 4 datos por set, y para espaciamiento 10 datos por set.

Regla milimétrica, aplicada para obtención de abertura entre los sets de discontinuidades. 10 mediciones por set.

Martillo geológico, para el apoyo de evaluación de estado de meteorización del talud de forma empírica.

Tabla 8: Ubicación de estaciones geomecánicas en coordenadas UTM y fechas de las respectivas visitas. Zona 18H.

Talud	Latitud Este	Longitud Sur	Fecha
EGM1	659697	5928884	16-06-2022
EGM2	659544	5928710	16-06-2022
EGM3	661390	5928532	14-09-2022
EGM4	659596	5928653	02-12-2022
EGM5	659415	5928681	02-12-2022

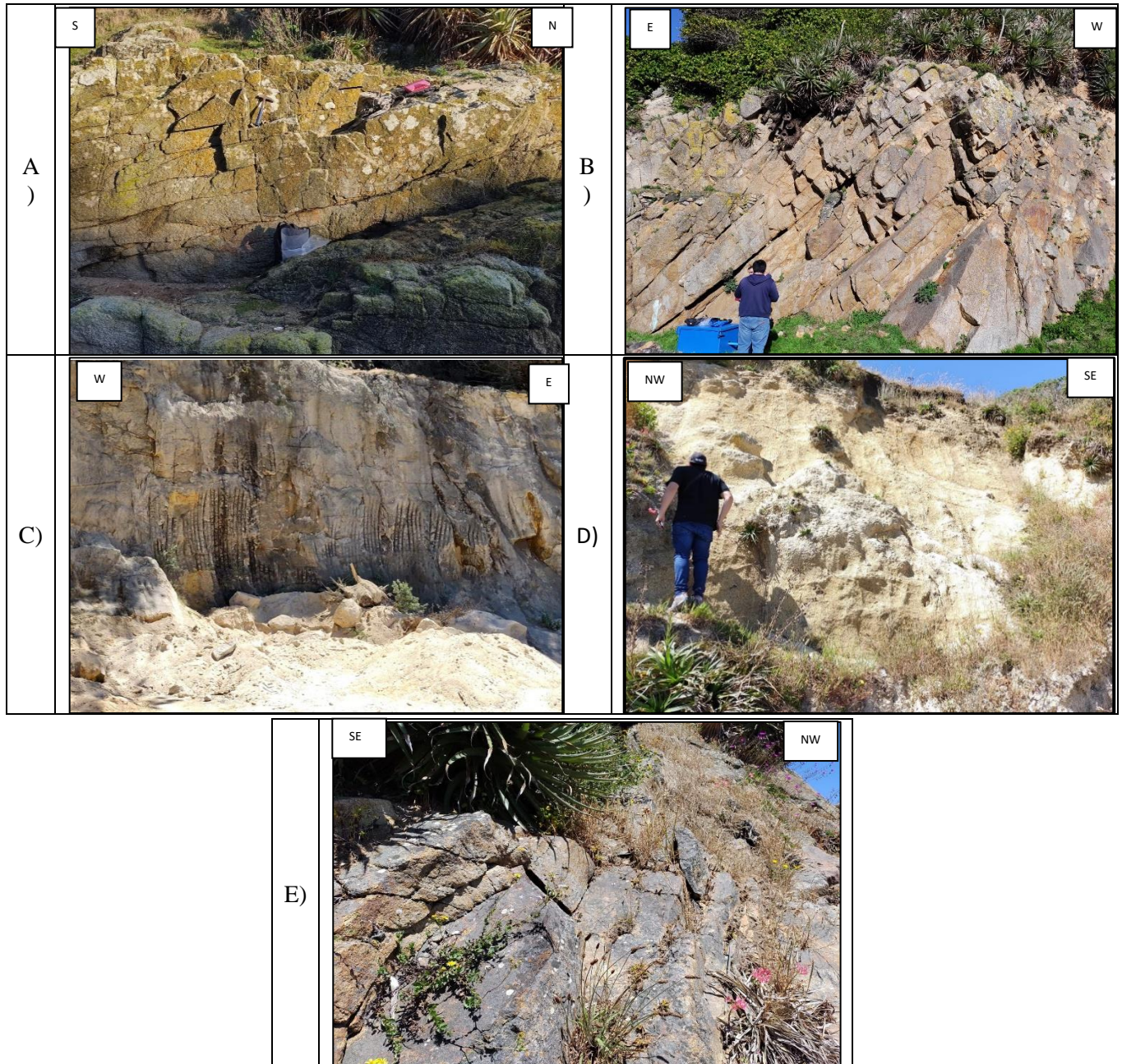


Figura 9: Estaciones geomecánicas evaluadas en terreno, con sistemas de clasificación. A) EGM-1. B) EGM-2. C) EGM-3. D) EGM-4. E) EGM-5.

## 4.2. Análisis de datos

Una vez obtenidos todos los datos respectivos a las estaciones geomecánicas, estos fueron ordenados numéricamente para obtener sus promedios y así, estimar cuales familias de discontinuidades poseían los peores parámetros según talud, y con ello aplicar el peor caso de área de rotura en cuestión. Los datos estructurales obtenidos con la brújula geomecánica fueron trasladados a una proyección Stereonet, para obtener el polo de los planos de falla. Con aquel polo obtenemos el promedio de dip y dip direction de cada set de discontinuidad, y tener la posibilidad de aplicarlo en el cálculo del sistema de clasificación de macizos rocosos en taludes, o SMR. De esta forma, calculamos el SMR en comparación con el talud y todos los casos posibles según la cantidad de familias de discontinuidades presentes por estación geomecánica.

Aparte del uso de datos estructurales en sistemas de clasificación, se implementaron en el software DIPS; programa que ayudó a interpretar el porcentaje de rotura en familias de discontinuidades con respecto al talud o ladera. Como consideraciones, se usó un peso específico de roca de  $27 \frac{kN}{m^3}$  y un ángulo de fricción de  $30^\circ$ , que son parámetros determinados por el libro introductorio de Mecánica de Rocas (Goodman R. , 1989).

Con los datos obtenidos en cada uno de los cuatro sistemas de clasificación calculados en el artículo, es posible generar interpolaciones en un mapa georreferenciado con la ubicación GPS de cada estación geomecánica y sus respectivos valores de clasificación. Con ello, podemos establecer qué áreas de las cercanías de Caleta Chome en la Península de Hualpén son más susceptibles a sufrir de una remoción en masa.

## 5. RESULTADOS

### 5.1. Análisis Cinemático

Se utilizó el software DIPS 6.008 para analizar las formas posibles de falla para los taludes ensayados. La aplicación permite el reconocimiento de la envolvente de falla, con solo introducir los parámetros del dip y dip direction del talud y de cada familia de discontinuidad.

Gracias a su mecanismo de evaluación, se consideró falla planar, por cuña, y por volcamiento directo. Debido a que la geología permanece constante en cada estación, la litología no permitió trabajar con volcamiento flexional, debido a su gran resistencia. La Tabla 9 resume los resultados obtenidos por el software DIPS.

Tabla 9: Análisis de falla más frecuente, según estación geomecánica.

Estación geomecánica	Porcentaje crítico en que ocurre falla (%)		
	Planar	Cuña	Volcamiento
EGM-1	17	24	21
EGM-2	2,5	20	2,5
EGM-3	18	55	12,5
EGM-4	12,5	9,5	6,5
EGM-5	32,5	44,5	14,5

Las estaciones geomecánicas 1, 2 y 4 poseen menor riesgo de falla en un análisis que contempla únicamente familias de discontinuidades, a causa de que las orientaciones y manteo presentes en estos taludes muestran una inclinación favorable para el talud, de forma general. Por ello, el riesgo de falla planar, por cuña y volcamiento es bajo. En cambio, las estaciones 3 y 5 poseen familias de discontinuidades que forman cuñas frente a los taludes, permitiendo así que exista un riesgo latente de remoción en masa.

En la Figura 10, se destacan los estereogramas de las familias de discontinuidades pertenecientes a las estaciones geomecánicas evaluadas en Caleta Chome. Se denota una semejanza en orientación e inclinación en los taludes de macizo rocoso, que son EGM1, EGM2 y EGM5, y a la par se comparan ambas estaciones realizadas en maicillo, que son EGM3 y EGM4. Se interpreta que el estado de meteorización de las estaciones evaluadas varía según sus orientaciones.

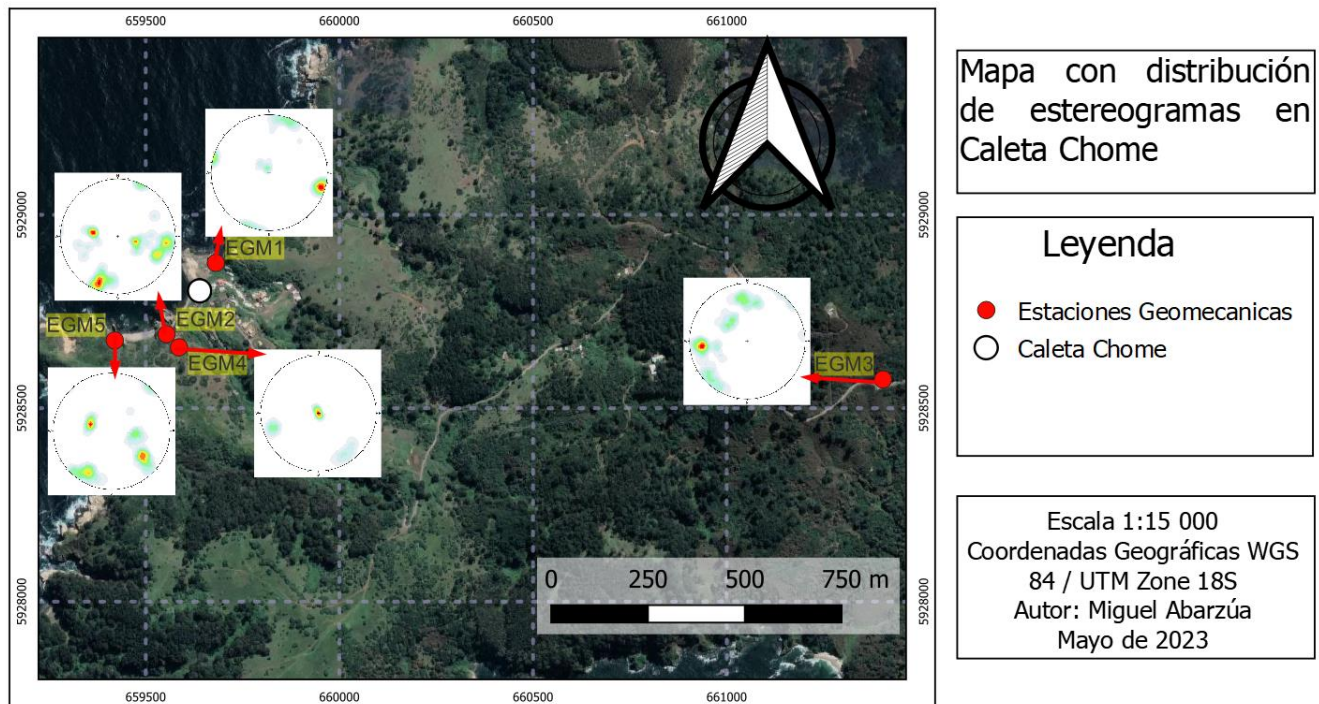


Figura 10: Mapa de Georreferenciación de Caleta Chome con sus respectivos estereogramas.

Al analizar todos los datos de orientación y mapeo de Caleta Chome en un solo estereograma, es posible comparar los polos estudiados con la media global de toda la Península presente de la Figura 11 (a), considerando el estudio de las demás caletas circundantes. De esta forma, se puede interpretar que los valores obtenidos en las estaciones geomecánicas en las inmediaciones de Caleta Chome de la Figura 11 (b) son representativas de toda la zona de la Península de Hualpén.

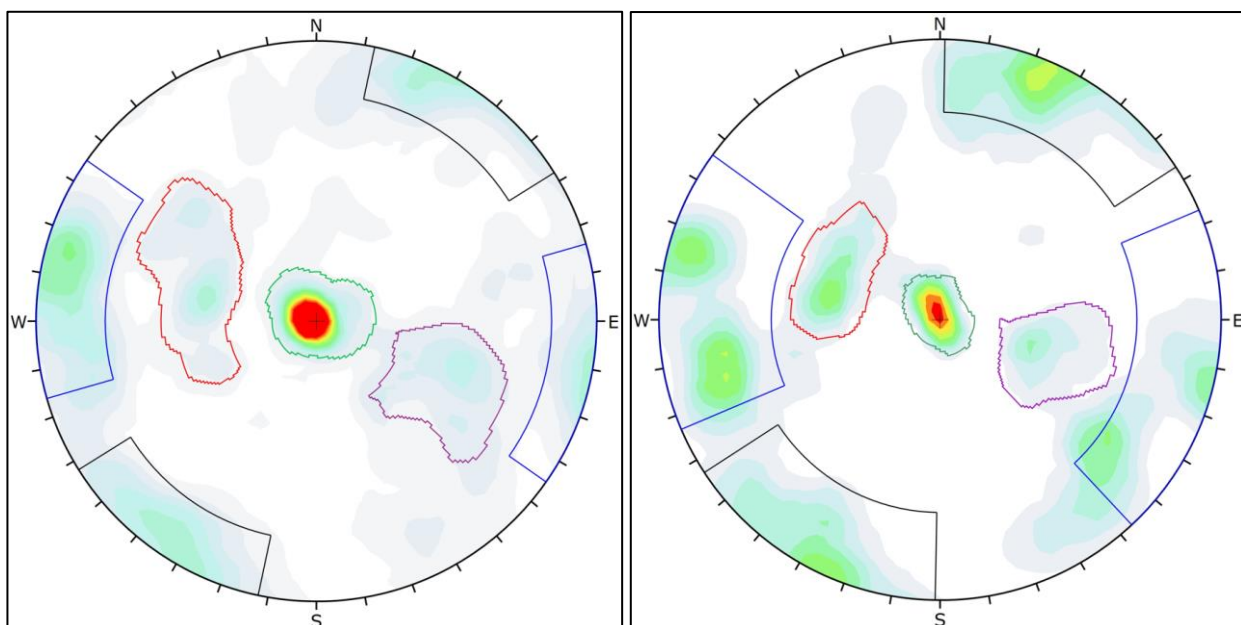


Figura 11: (a) Familias de discontinuidades del Macizo Peninsular de Hualpén. (b) Familias de discontinuidades de Caleta Chome y sus inmediaciones.

Mediante el análisis cinemático se interpretó la tendencia de las familias de discontinuidades a lo largo de la Península de Hualpén. Esta se divide en 5 familias que se mantienen constante a lo largo de la zona de estudio. Se presenta una semejanza clara en los polos de ambos estereogramas, demostrando así que las familias de discontinuidades mantienen su estructura por toda la zona.

## 5.2. Rock Mass Rating:

La estación 1, 2 y 5 son características de poseer un macizo rocoso competente, con un flujo de agua moderado y sin alto nivel de meteorización. A diferencia de las estaciones 3 y 4, poseen un RMR Regular. Esta diferencia se relaciona directamente con la cohesión del material rocoso y grado de meteorización, ya que la estación 3 y 4 se componen principalmente de un suelo residual de maicillo, con poco flujo de agua y alta alteración. Por ello, aquellas estaciones predominan en un RMR de Mala calidad.

Tabla 10: Resultados de estaciones usando método RMR, evaluando el peor caso del talud.

		RCS	RQD	Separación	Persistencia	Abertura	Rugosidad	Relleno	Alteración	Flujo de agua	RMR
ESTACIÓN 1	M.	240	72,2	0,197	2,9	8,4	12,3	Blando > 5mm	Moderada	Agua fluye	Regular
	P.	12	13	8	4	0	5	0	3	0	45
ESTACIÓN 2	M.	148	65,3	0,212	4	8,7	7	Sin relleno	Moderada	Goteando	Regular
	P.	12	13	10	2	0	1	6	3	4	51
ESTACIÓN 3	M.	22	61,8	0,212	5,67	3,53	4,5	Blando < 5mm	Alta	Húmedo	Mala
	P.	2	13	10	2	1	1	2	1	7	39
ESTACIÓN 4	M.	15	42,0	0,14	5,25	0,61	11	Duro < 5mm	Descompuesto	Húmedo	Mala
	P.	2	6	8	2	3	3	4	0	7	35
ESTACIÓN 5	M.	170	63,6	0,212	6	8,67	10	Sin relleno	Moderada	Goteando	Regular
	P.	12	13	10	2	0	3	6	3	4	53

\*. M: Medición en terreno. P: Puntaje obtenido dentro de Sistema de Clasificación RMR.

Todas las mediciones entregadas en la Tabla 10 poseen factores de corrección implementados, según requerimiento. Zonas cercanas a la costa y sin contacto directo con el oleaje marítimo, fueron consideradas con un flujo de agua húmedo. Zonas que estén a menos de 5 metros, fueron consideradas con un flujo de agua goteando. El nivel de alteración fue considerado inversamente proporcional a la cohesión del material evaluado.

Considerando lo planteado en la Figura 12, aquellas estaciones más cercanas a la costa poseen una clasificación mayor, a causa de que el lavado por la brisa y costa marina produce que se remueva constantemente el material suelto de la roca. Por ello, predominan a lo largo de la península estaciones con un RMR de calidad Mala, mientras que en la costa un RMR de calidad Media.

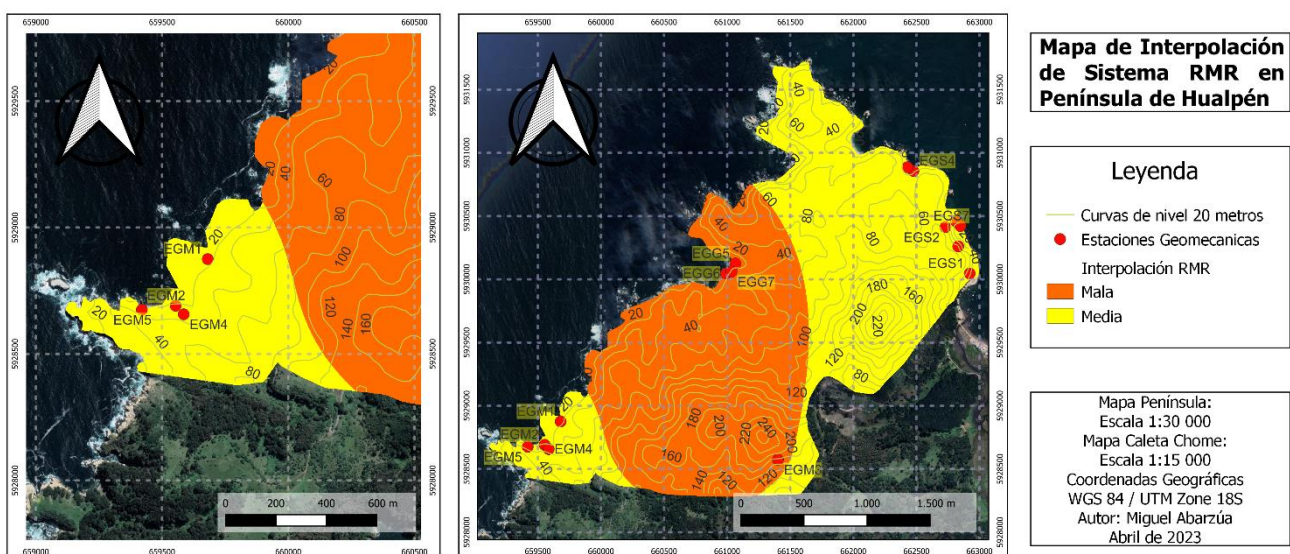


Figura 12: Mapa de interpolación de Sistema de Clasificación RMR.

## 5.2. Slope Mass Rating

Las estaciones geomecánicas evaluadas en la Caleta Chome y sus inmediaciones mantienen una regla de cuatro familias de discontinuidades, a excepción de una estación en la costa que contaba con tres. Por ello, se logró interpretar y relacionar el porcentaje de falla del talud, con cada una de las familias de discontinuidades que posea la estación. De esta forma, Es posible discriminar el resultado de sistema de clasificación SMR más bajo según la familia de discontinuidad.

Con los datos propuestos, se denota una tendencia a un valor de la clasificación SMR más bajo según el paralelismo del set de discontinuidad al talud. Por ello, un set con un grado de inclinación y grado de orientación parecido al talud reflejará un valor menor en el sistema SMR. Por ello, la relación del valor obtenido en RMR con respectivos sets de discontinuidades tienen capacidad de arrojar un resultado muy bajo de hasta 0 en la estación 3, siendo de calidad Muy baja, o en otros casos como la estación 2 variar de tal forma que no baja del sistema de clasificación original del RMR.

Tabla 11: Resultados de estaciones geomecánicas aplicadas en taludes usando método SMR.

SMR	Set 1	Set 2	Set 3	Set 4
ESTACIÓN 1	Mala	Regular	Mala	-
	20	44	38	-
ESTACIÓN 2	Regular	Regular	Regular	Regular
	46	42	43	50
ESTACIÓN 3	Mala	Mala	Mala	Muy mala
	38	30	35	0
ESTACIÓN 4	Mala	Mala	Muy mala	Mala
	27	27	10	34
ESTACIÓN 5	Regular	Regular	Mala	Mala
	44	52	35	29

Dentro de la interpolación propuesta en la Figura 13 se consideró el promedio de SMR de cada estación. De esta forma, arrojó un resultado que acota aún más los valores de las estaciones geomecánicas regulares que en el RMR. Con este análisis, solamente la Estación 2 posee una calidad Regular, 5 un SMR de calidad Mala, y las demás estaciones poseen una calidad Muy mala.

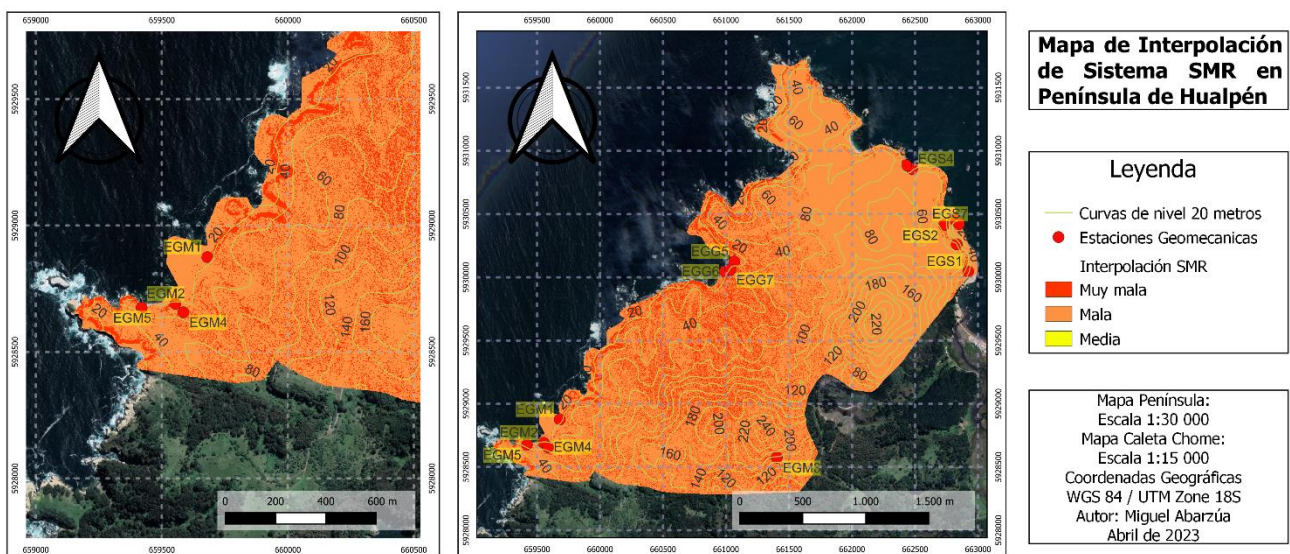


Figura 13: Mapa de interpolación de Sistema de Clasificación SMR.

#### 4.3. Q- Barton:

El Sistema de Clasificación Q de Barton posee variables que determinan los taludes con mayor riesgo de sufrir una remoción, en proporción al nivel de meteorización que posea la estación. El índice de alteración de las juntas denota en la estación 3 y 4 un mayor valor que en las demás estaciones, ya que en su mayoría los taludes poseían propiedades físicas y estructurales similares. La calidad general de los macizos rocosos varía de Malo a Muy malo.

Tabla 12: Resultados de estaciones usando método Q de Barton, evaluando el peor caso del talud.

		RQD	Jn	Jr	Ja	SRF	Jw	Q
ESTACIÓN 1	M.	0,7227	3 familias	Rugosas planas	manchas	Tensiones bajas	Lavado ocasional	3,168
	P.	72	9	1,5	1	2,5	0,66	Malo
ESTACIÓN 2	M.	0,65	4 familias	Rugosas planas	Ligero alterado	Tensiones bajas	Despreciable	1,3
	P.	65	15	1,5	2	2,5	1	Malo
ESTACIÓN 3	M.	0,61	4 familias	Rugosas planas	Arcilla blanda	Tensiones bajas	Despreciable	0,2033
	P.	61	15	1,5	12	2,5	1	Muy malo
ESTACIÓN 4	M.	0,42	4 familias	Rugosas planas	Arena limosa	Tensiones bajas	Despreciable	0,42
	P.	42	15	1,5	4	2,5	1	Muy malo
ESTACIÓN 5	M.	0,63	4 familias	Rugosas planas	Ligero alterado	Tensiones bajas	Lavado ocasional	0,8316
	P.	63	15	1,5	2	2,5	0,66	Muy malo

\*. M: Medición en terreno. P: Puntaje obtenido dentro de Sistema de Clasificación Q de Barton.

La interpolación del Sistema de Clasificación de Q de Barton de la Figura 14 muestra un área de calidad Mala que se representa en la costa oeste de la Península de Hualpén, de cara a Caleta Chome. La estación 5, que está más al sur con respecto a las demás cercanas a Caleta Chome muestra una calidad muy mala, aun siendo una roca competente. Muestra una similitud de calidad con las estaciones más meteorizadas, que se mantienen a lo largo de la Península con una calidad muy mala.

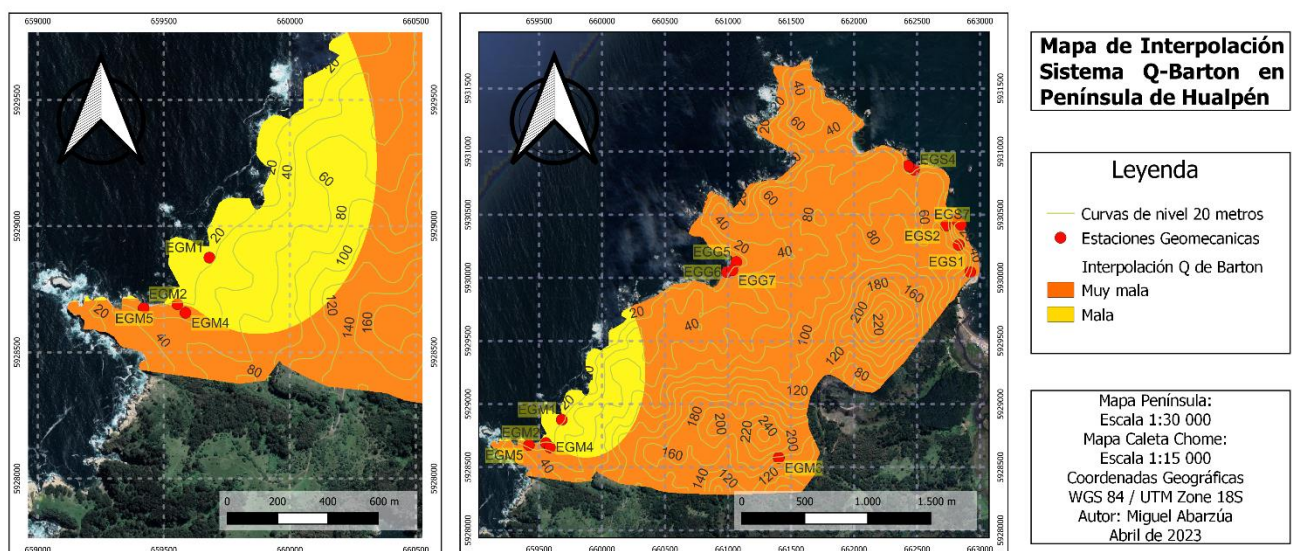


Figura 14: Mapa de interpolación de Sistema de Clasificación Q de Barton.

#### 4.4. Q- Slope

El Sistema de clasificación Q-Slope usó parámetros establecidos por observaciones en terreno y bibliografía correspondiente a la zona, con la que se logró identificar el par de familias de discontinuidades con mayor porcentaje de falla y por tal, más desfavorables para la estabilidad. Se comparó cada tipo de falla en el software Dips 6.008 del paquete de programas de Rocscience para obtener un O-factor más cercano a la realidad. Los resultados son más pesimistas que los obtenidos mediante el Q de Barton, llegando a clasificaciones excepcionalmente malas.

Tabla 13: Resultados de estaciones usando método Q-Slope, evaluando el peor caso del talud.

		RQD	Jv	Jn	Jr	Ja	SRFa	Jwice	Q-Slope
ESTACIÓN 1	M.	0,7227	12,95	3 familias	Rugosas planas	manchas	Afloramiento	Estable competente	1,512
	P.	72	13	9	1,5	1	2,5	0,7	Malo
ESTACIÓN 2	M.	0,65	15	4 familias	Rugosas planas	Ligero alterado	Afloramiento	Inestable competente	0,585
	P.	65	15	15	1,5	2	2,5	0,6	Muy malo
ESTACIÓN 3	M.	0,61	16	4 familias	Rugosas planas	Arcilla blanda	Voladura	Inestable competente	0,004575
	P.	61	16	15	1,5	12	10	0,6	Excepcionalmente malo
ESTACIÓN 4	M.	0,42	22	4 familias	Rugosas planas	Areno limoso	Suelo residual	Inestable incompetente	0,00315
	P.	42	22	15	1,5	4	20	0,3	Excepcionalmente malo
ESTACIÓN 5	M.	0,63	15,57	4 familias	Rugosas planas	Ligero alterado	Afloramiento	Estable competente	0,11025
	P.	63	15,6	15	1,5	2	2,5	0,7	Muy malo

\*. M: Medición en terreno. P: Puntaje obtenido dentro de Sistema de Clasificación Q-Slope.

Tabla 14: Obtención del O-factor mediante correlaciones entre los sets de discontinuidades.

Estación 1		Estación 2		Estación 3		Estación 4		Estación 5	
Set A	Set B	Set A	Set B	Set A	Set B	Set A	Set B	Set A	Set B
0,5	0,9	0,75	1	0,25	0,8	0,25	0,8	0,25	0,5

El mapa de interpolación dirigido al sistema de clasificación Q-Slope, interpretado en la Figura 15 fue el único mapa con el área menos acotada. Sin embargo, los valores promedio disminuyeron considerablemente en comparación a los demás sistemas RMR, SMR y Q de Barton. Se interpreta que las estaciones cercanas a la costa poseen una clasificación Muy mala, y en cuanto más cerca estén las estaciones del sistema montañoso de la Península, peor es la clasificación Q-Slope.

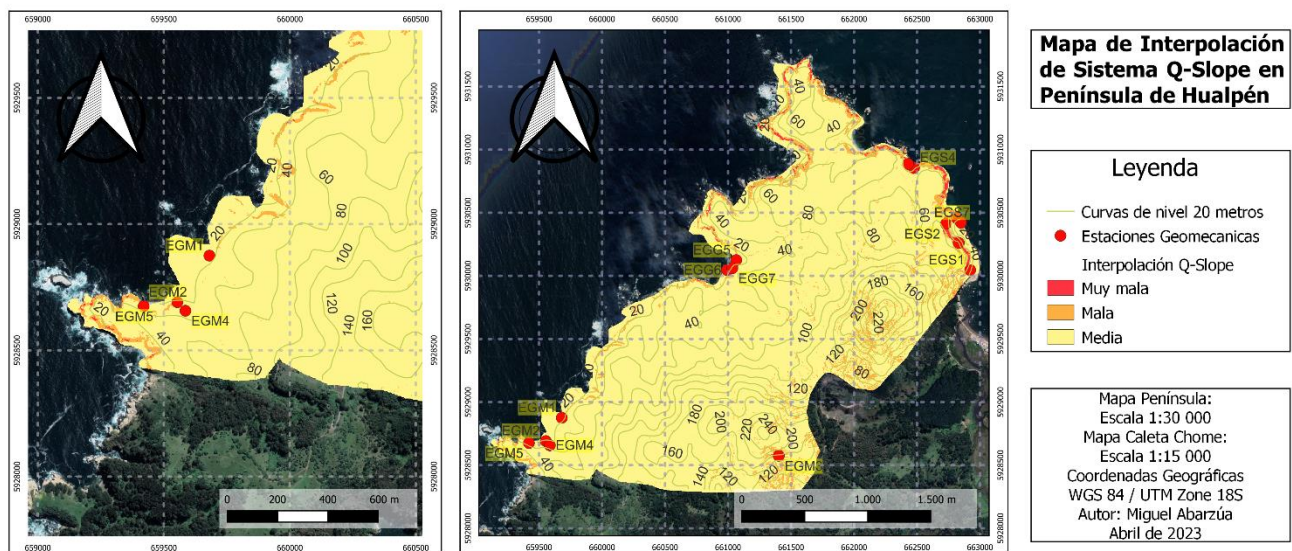


Figura 15: Mapa de interpolación de Sistema de Clasificación Q-Slope.

## 5. CONCLUSIONES

El estudio de investigación y aplicación se realizó utilizando sistemas de clasificación de macizos rocosos sobre las estaciones geomecánicas y análisis cinemático de las familias de discontinuidades acordes al batolito costero de la Península. Los mapas se ejecutaron con el software QGIS 3.28. Con ayuda del software DIPS, se realizó la comparación entre los sets de discontinuidades del macizo peninsular y aquellos focalizados en Caleta Chome, y el estudio interpretó una clara semejanza en los polos de cada una. A grandes rasgos, existen 5 familias de discontinuidades predominantes en la Península de Hualpén, en base al estudio de dieciséis estaciones geomecánicas. Por lo visto en el desarrollo de la etapa de terreno, se confirma en la Figura 16 lo mencionado al comparar las orientaciones e inclinaciones de las familias de discontinuidades y estructuras heredadas de la zona de Caleta Lengua y Caleta Perone, con aquellas pertenecientes a Caleta Chome.

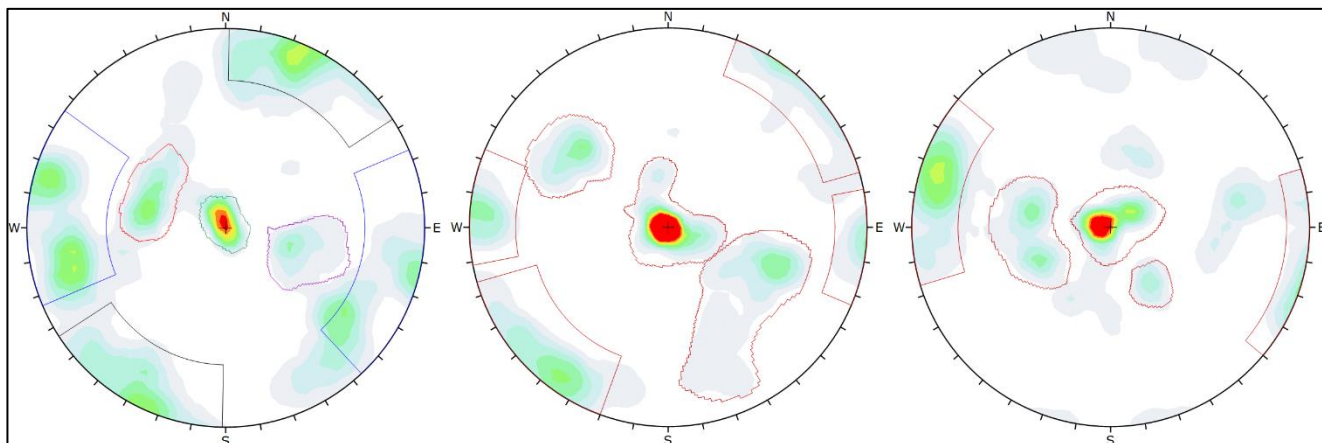


Figura 16: Densidad de polos de sets de discontinuidades. (a) Caleta Chome; (b) Caleta Lengua; (c) Caleta Perone.

El análisis respectivo presenta relevancia a las familias de discontinuidades de ángulo cercano al eje horizontal, y así también aquellos que poseen paralelismo con el eje vertical. Por ello, el análisis potencial de ruptura es alarmante en taludes que posean una orientación e inclinación paralela a las familias de discontinuidades verticales. A causa de ello, los taludes evaluados en las estaciones EGM-3 y EGM-5 poseen mayor riesgo de ruptura, al ser taludes con características similares a los sets de discontinuidades. Es posible interpretar que, en efecto, estos taludes han sido deteriorados en dirección a aquellas familias.

Los sistemas de clasificación de calidad geomecánica utilizados en diferentes estaciones mostraron distintos comportamientos según estación. Se identifica que las estaciones con macizos rocosos competentes y flujo de agua moderado tienen un RMR regular, mientras que las estaciones con suelos residuales de maicillo y alta alteración tienen un RMR de mala calidad. Se encuentra que la relación del valor obtenido en RMR con los sets de discontinuidades puede arrojar resultados muy bajos y la calidad general de los macizos rocosos varía de malo a muy malo en SMR. Los sistemas de clasificación Q de Barton y Q-Slope expusieron los resultados más pesimistas, variando desde clasificaciones Malas a Excepcionalmente malas, a causa del número de familias de discontinuidades y nivel de alteración de roca.

Tabla 15: Análisis de falla según estación, por sistemas de clasificación geomecánicos.

	ESTACIÓN 1		ESTACIÓN 2		ESTACIÓN 3		ESTACIÓN 4		ESTACIÓN 5	
RMR	Regular	45	Regular	51	Mala	39	Mala	35	Regular	53
SMR										
F1	Mala	20	Regular	46	Mala	38	Mala	28	Regular	44
F2	Regular	44	Regular	42	Mala	30	Mala	27	Regular	52
F3	Mala	38	Regular	43	Mala	35	Muy mala	10	Mala	35
F4	-	-	Regular	50	Muy mala	0	Mala	34	Mala	29
Q	Mala	3,168	Mala	1,3	Muy mala	0,2034	Muy mala	0,42	Muy mala	0,8316
Q-slope	Inestable	1,512	Inestable	0,585	Inestable	0,0046	Inestable	0,0032	Inestable	0,110

Por lo visto en el mapa de interpolación de Q-Barton, que solo consideré los puntos de cada estación geomecánica dentro del análisis, sobresalió su calidad Muy Mala a lo largo de la Península, con excepción de una estación geomecánica en Caleta Chome. La interpolación de RMR arrojó resultados Medios para Caleta Chome, Lengua y playas circundantes, a diferencia de calidad Mala para vías de evacuación y Caleta Perone.

Los mapas RMR y Q-Barton no consideraron orientación ni inclinación de taludes ni sets de discontinuidades, a diferencia de los mapas de Q-Slope y SMR, que se utilizan los anteriores sistemas de clasificación para analizar las estaciones con sus respectivas familias incluidas en el análisis. Estos últimos denotan concordancia al establecer jerárquicamente que las zonas de mayor riesgo son aquellas con mayores inclinaciones, mostrando una discriminación de datos Muy mala. Los taludes ubicados en Chome muestran una calidad Media en Q-Slope y mala en SMR, mostrando semejanzas en las áreas de discriminación que pertenecen a acantilados costeros y terrazas marinas. A diferencia de la Caleta Chome, la estación geomecánica EGM-3 se ubica sobre parte del cordón montañoso de la Península y denota un talud de ángulo paralelo a 90° de inclinación, siendo una zona discriminada en los mapas como de mayor riesgo. Comparándolos con los mapas de riesgo por remoción en masa de SERNAGEOMIN y la Universidad del Bío-Bío, es posible relacionar que los mapas obtenidos por el trabajo en terreno muestran similitudes con estos, denotando su utilidad para facilitar el trabajo en campañas de monitoreo de zonas de riesgo en la Península de Hualpén.

Por lo expuesto, se desprende que tanto la Península de Hualpén, con énfasis en Caleta Chome, expresan un alto nivel de riesgo por remoción en masa con todos los sistemas de clasificación de estaciones geomecánicas y sus respectivos mapas, siendo así una amenaza latente para quienes transiten por las zonas. Los factores principales que detonan estos movimientos son las fuertes lluvias y la erosión marítima, por lo que es necesario hacer de conocimiento público y orientar a la población a resguardarse de las zonas de peligro. Es requerido trazar nuevas vías de conectividad urbana que se mantengan alejadas de zonas con riesgo al colapso a lluvias o erosión marina, y reforzar los taludes con métodos de sostenimiento como geosintéticos o pernos de anclaje.

## 6. BIBLIOGRAFÍA:

- Aydin, A. (2009). ISRM Suggested method for determination of the Schmidt hammer rebound hardness: Revised version. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 627-634.
- Aydin, A., & Basu, A. (2005). The Schmidt hammer in rock material characterization. *Engineering Geology*, 1-14.
- Bar, N., & Barton, N. (2017). The Q-Slope Method for Rock Slope Engineering. *Rock Mechanics and Rock Engineering*.
- Barton et al, N. (1974). Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. *Rock Mechanics* 6, 189-236.
- Barton, N., & Bandis, S. (2017). Characterization and modelling of the shear strength, stiffness and hydraulic. *Rock Mechanics and Engineering, Feng, X-T*, 3-40.
- Barton, N., & Bar, N. (2015). *Introducing the Q-slope method and its intended use within civil and mining engineering projects*. Salzburgo: ISRM Regional Symposium Eurock 2015 & 64th Geomechanics Colloquium International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering.
- Barton, N., & Bar, N. (2019). The Q Slope Method for Rock Slope Engineering in Faulted Rocks and Fault Zones. *ISRM 14th International Congress of Rock Mechanics*, (págs. 3424-). Iguassu Falls, Brazil.
- Barton, N., & Choubey, V. (1977). The Shear Strength of Rock Joints in Theory and Practice. *Rock Mechanics*, 1-54.
- Bieniawski, Z. (1984). *Rock mechanics design in mining and tunneling*. Róterdam, Países Bajos: Balkema.
- Bieniawski, Z. (1989). *Engineering Rock Mass Classifications*. Nueva York, Estados Unidos: John Willey and.
- Bieniawski, Z. (1993). En P. Press, *Comprehensive Rock Engineering* (págs. 553-574). Londres, Inglaterra: Hudson, J.
- Campo-II. (2009). *Mapa geológico del sector costero de provincia de Concepción*. Concepción: Universidad de Concepción.
- Creixell et al. (2002). *Petrology of the Hualpen Stock: evidence of Late Triassic epizonal plutonism and crustal melting at the western margin of Gondwana (36°45'S - 73°10' W)*. Toulouse, France: V ISAG.
- Creixell, C. (2001). *Petrología y geotermobarometría de las rocas intrusivas de la cordillera de la Costa entre los 36°30' y 38°30'S*. Concepción.: Universidad de Concepción, Departamento Ciencias de la Tierra.
- Cruden. (1991). A SIMPLE DEFINITION OF LANDSLIDE. *Bulletin of the International Association of ENGINEERING GEOLOGY*, 1-3.
- Cruden, & Varnes. (1996). Landslide Types and Processes. *Transportation Research Board, National Academy of Sciences*, 36-75.
- Deere, D. U., & Deere, D. W. (1988). The Rock Quality Designation (RQD) Index in Practice. *Rock Classification Systems for Engineering Purposes, ASTM STP 984*.
- Deere, D., Hendron, A., Patton, F., & Cording, E. (1967). *Design of surface and near surface construction inrock*. Nueva York.: Proceedings of the 8th U.S. Symposium on Rock Mechanics-Failure and Breakage of Rock, American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers.

- González de Vallejo et al. (2002). *Ingeniería geológica*. Madrid: PEARSON Prentice Hall.
- Goodman, R., & Bray, J. (1976). Toppling of Rock Slopes. *Proceedings of the Specialty Conference on Rock Engineering for Foundations and Slopes, 2*, 201-234.
- Hauser. (2000). *Remociones en masa en Chile*. Servicio Nacional de Geología y Minería.
- Hauser. (2000). *Remociones en masa en Chile (Versión Actualizada)*. Santiago: Servicio Nacional de Geología y Minería.
- Hoek, E., & Bray, J. (1981). *Rock slope engineering*. Prensa CRC.
- Lynn, M., & Bobrowsky, P. (2008). *The Landslide Handbook - A guide to understanding landslides*. U.S. Geological Survey, Reston, Virginia: USGS Science for changing the world.
- Miller, R. (1965). *Engineering Classification and Index Properties for Intact Rock*. Champaign, Illinois.: University of Illinois.
- Municipalidad de Hualpén. (2018). *Plan Regulador Comunal de Hualpén, Estudio de Riesgos y de Protección Ambiental. Memoria Explicativa*. Hualpén: Municipalidad de Hualpén.
- Orellana, A. (2010). *Recuperación de cerros isla para implementación de "stepping stones" de avifauna, Concepción, VIII Región*. Santiago: Universidad Central de Chile, Escuela de Ecología y Paisaje.
- Palmström, A. (1974). *Characterization of jointing density and the quality of rock masses*. Noruega: Internal report.
- Palmström, A. (2005). Measurements of and between block size and rock quality designation (RQD). *Tunnelling and Underground Space Technology*, 362-377.
- Quezada, J., Cecione, A., Esterio, H., & Pineda, V. (1997). *Geología Urbana de Talcahuano*. Antofagasta: Departamento de Ciencias Geológicas, Universidad Católica del Norte.
- Romana, M. (1985). *New adjustment ratings for application of Bieniawski classification to slopes*. Salzburg.: International Symposium on the Role of Rock Mechanics, International Society for Rock Mechanics.
- Romana, M. (1993). A geomechanical classification for slopes: Slope Mass Rating. En P. Press, *Comprehensive Rock Engineering* (págs. 3-45). Londres, Inglaterra: Hudson, J.
- Torres, C. (2018). *Elementos para el diseño de un plan de Gestión Ambiental en el Santuario de la Naturaleza Península de Hualpén*. Concepción, Chile: Universidad de Concepción.
- Vásquez, D. (2013). *Metodología para la Delimitación y Zonificación de Humedales Costeros de Tipo Mediterráneo*. Concepción: Universidad de Concepción.
- Wyllie, D. (2017). *Rock Slope Engineering: civil applications*. Boca Ratón, Estados Unidos: Taylor & Francis,.