

CARACTERIZACIÓN DE MACIZOS ROCOSOS Y EVALUACIÓN DE PELIGRO DE REMOCIÓN EN MASA EN CALETA LENGUA Y SENDERO HACIA RAMUNTCHO, PENÍNSULA DE HUALPÉN, COMUNA DE HUALPÉN, REGIÓN DEL BIOBÍO, CHILE

S. Antinao Casanova¹, J. Montenegro Cooper², R. King St-Onge³, M. Espinoza Vargas⁴

RESUMEN:

El conocimiento de las propiedades geomecánicas de los taludes de roca es de suma importancia, debido a que permite conocer la estabilidad de éstos, favoreciendo la seguridad de las personas que colindan con ellos. Es por ello que existen diferentes tipos de clasificaciones geomecánicas que determinan la calidad del macizo rocoso, las cuales permiten establecer una línea de estudio para la determinación de estas características específicas de los macizos rocosos en estudio. Lo anterior fue llevado a cabo a partir del levantamiento in-situ de las características de las discontinuidades del macizo rocoso a lo largo de la Península de Hualpén, específicamente en el sector de Caleta Lengua y Ramuntcho.

El presente estudio se utilizan las clasificaciones geomecánicas por medio de sus principales metodologías como lo son RMR (Rock Mass Rating) (Bieniawski, 1989), SMR (Slope Mass Rating) (Romana, 1985), Q de Barton (Barton et al., 1974), Qslope (Bar & Barton, 2017) y su debido análisis cinemático de las discontinuidades, con el fin de estimar el tipo de rotura que puede generarse en cada macizo rocoso. Adicionalmente, se elaboraron mapas de clasificación, mediante interpolación de datos en un espacio específico para determinar así, el área de mayor susceptibilidad debido a su clasificación geomecánica en la Península de Hualpén.

PALABRAS CLAVES: clasificación geomecánica de RMR (Rock Mass Rating), SMR (Slope Mass Rating), Q de Barton, Qslope, discontinuidades, macizo rocoso, estación geomecánica.

ABSTRACT:

The knowledge of the geomechanical properties of the rock slopes is of paramount importance, because it allows to know the stability of these, favoring the security of the people who adjoin them. That is why there are different types of geomechanical classifications that determine the quality of the rock massif, which allow to establish a line of study for the determination of these specific characteristics of the rock massifs under study. The above was carried out from the in-situ survey of the characteristics of the discontinuities of the rocky massif along the Hualpén Peninsula, specifically in the sector of Caleta Lengua and Ramuntcho.

The present study uses geomechanical classifications through its main methodologies such as RMR (Rock Mass Rating) (Bieniawski, 1989), SMR (Slope Mass Rating) (Romana, 1985), Q de Barton (Barton et al. 1974), Qslope (Bar & Barton, 2017) and its due kinematic analysis of discontinuities, in order to estimate the type of break that can be generated in each rock. Additionally, classification maps were prepared by interpolating data in a specific space to determine the area of greatest susceptibility due to its geomechanical classification in the Hualpén Peninsula.

KEYWORDS: geomechanical classification of RMR (Rock Mass Rating), SMR (Slope Mass Rating), Q Barton, Qslope, discontinuities, rock mass, geomechanical station.

¹ Estudiante, Carrera de Ingeniería Civil Geológica, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE. santinao@ing.ucsc.cl

² Profesor guía, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción. CHILE. jmontenegro@ucsc.cl

³ Profesor informante, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción. CHILE. rking@ucsc.cl

⁴ Profesor informante, Departamento de Ciencias de la Tierra, Universidad de Concepción. CHILE. mauricespinoza@udec.cl

1. INTRODUCCION

Los riesgos naturales se definen como procesos y eventos naturales que amenazan la integridad de la vida humana, sus actividades, propiedades y comunidades (Hyndman & Hyndman, 2011). Los riesgos geológicos forman parte del riesgo natural del día a día, donde su origen corresponde a procesos tectónicos y geomorfológicos, como lo son los movimientos de remoción en masa.

La remoción o movimiento en masa, se define como todos aquellos movimientos a favor de la gravedad de una masa de roca, detritos o suelos (Cruden, 1991). Este riesgo geológico se origina por la combinación de diferentes factores condicionantes, los cuales pueden ser de tipo geológico, geotectónico, morfológicos, físico-químicos, meteorológicos, biológicos o de factor antrópico (Cruden & Varnes, 1996). Estos se desarrollan o mantienen en estado de latencia, hasta que al menos uno de ellos actúa como detonante del movimiento, siendo los más comunes las intensas precipitaciones, sismos y gravedad (Wieczorek, 1996).

Por otro lado, para tener conocimiento de los macizos rocosos, existen muchas clasificaciones geomecánicas, las principales corresponde a RMR (Rock Mass Rating) (Bieniawski, 1989), SMR (Slope Mass Rating) (Romana, 1985), Q de Barton (Barton et al., 1974), Qslope (Bar & Barton, 2017), que determinan la calidad y su clasificación de los macizos rocosos.

Las clasificaciones geomecánicas son métodos fundamentales en ingeniería, las cuales permiten evaluar el comportamiento geomecánico de los macizos rocosos, logrando así, estimar los parámetros necesarios para su clasificación.

El presente estudio se aborda un procedimiento de análisis cinemático y caracterización de macizos rocosos, a través de estaciones geomecánicas para el cálculo de las principales clasificaciones, como lo son RMR (Rock Mass Rating) (Bieniawski, 1989), SMR (Slope Mass Rating) (Romana, 1985), Q de Barton (Barton et al., 1974), Qslope (Bar & Barton, 2017), con el fin de elaborar mapas de interpolación de la Península de Hualpén, específicamente en el área de Caleta Lengua y Ramuntcho, determinando así las principales clasificaciones de estas.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Ubicación

El área de estudio se encuentra comprendida entre Caleta Lengua y Ramuntcho, donde la primera es un poblado de 420 habitantes, según el Censo del 2017 (INE, 2019), se encuentra ubicado al norte de la comuna de Hualpén, comprendida entre los cerros de la península de Hualpén al oeste; la bahía de San Vicente al norte, y el humedal estuario del río Lengua por el Sur. Su acceso es a través de Hualpén por la avenida Las Golondrinas, la cual atraviesa el poblado de este a oeste. En la Figura 1 es posible visualizar un mapa de ubicación de Caleta Lengua y Ramuntcho, además, del área de estudio comprendida de color rojo.

Mapa Ubicación Caleta Lengua-Ramuntcho

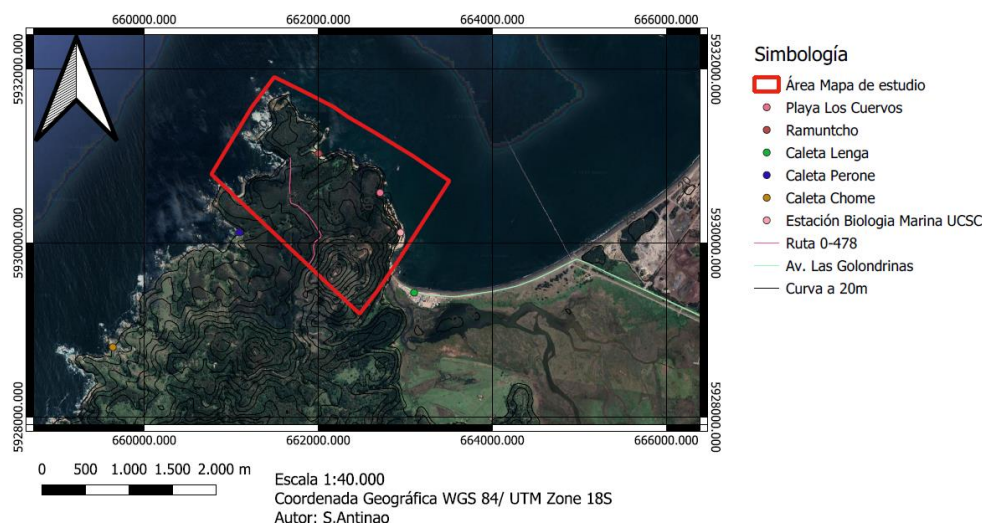


Figura 1: Mapa ubicación Caleta Lengua – Ramuntcho.

2.2 Remoción en masa

El término remoción en masa o procesos de remoción en masa (PRM) ha sido definido por Cruden & Varnes (1996). Los cuales corresponden a procesos de movimiento lento o rápidos, según el tipo de suelo y el volumen transportado, el cual es generado por diversos factores, pero principalmente por procesos gravitacionales en un determinado conjunto de terreno. Estos procesos son una gran amenaza a la población tanto geológica, como ingenierilmente, pues son frecuentes e impredecibles.

El caso más cercano de procesos de remoción en masa (PRM) en la zona de estudio, corresponde al producido el 16 de junio del 2019 en el interior del Parque Pedro del Río Zañartu, comuna de Hualpén, Región del Biobío, Chile. En el cual, ocurrió un volcamiento de un bloque de roca, originado por múltiples factores que influyen directamente en la estabilidad de las laderas, como lo son, fuerte pendiente, presencia de vegetación, roca meteorizada y planos de diaclasas cerradas, las que lentamente se abren generando rocas fracturadas. (SERNAGEOMIN, 2019).

La litología del terreno se encuentra principalmente compuesta por rocas metamórficas, en su gran mayoría esquistos y filitas con cuarzo intersticial. Sumado a lo anterior, es producto de las fracturas que cortan los planos de foliación de la roca, que estas se desprenden. (SERNAGEOMIN, 2019). En la Figura 2, corresponde a la remoción en masa por volcamiento en el interior del Parque Pedro del Río Zañartu, comuna de Hualpén, Región del Biobío, Chile.



Figura 2: Remoción en masa por volcamiento en el interior del Parque Pedro del Río Zañartu, comuna de Hualpén, Región del Biobío, Chile. (SERNAGEOMIN, 2019).

2.3 Clasificación de los procesos de remoción en masa

Los procesos de remoción en masa pueden ser clasificados mediante los elementos característicos del tipo de movimiento y el material implicado en éste (Cruden & Varnes, 1996). Existen tres materiales, los cuales pueden ser distinguidos a la hora de realizar la clasificación de estos procesos, estos corresponden a roca, detritos y tierra. A su vez, existe una clasificación al movimiento como lo son las caídas de rocas, volcamientos, deslizamientos, flujos y extensiones laterales. A eso se suma la existencia de procesos complejos o mixtos, los cuales corresponden a la unión de dos o más factores (Cruden & Varnes, 1996). En la Figura 3 se puede apreciar su clasificación.

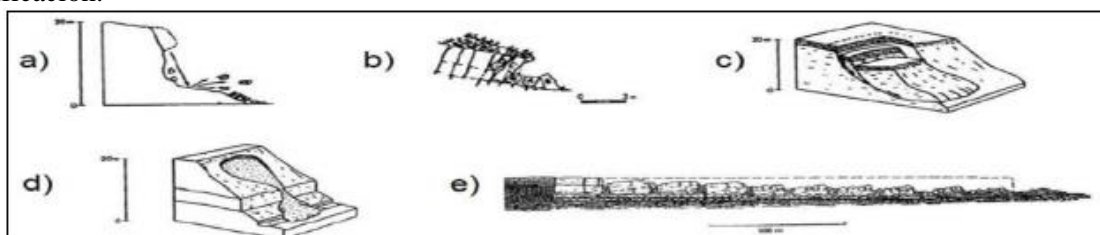


Figura 3: Tipos de remociones en masa. a) Caída de roca, b) Volcamiento, c) deslizamiento, d) flujo, e) extensión lateral (Cruden & Varnes, 1996).

2.4 Geología

El lugar de estudio se encuentra ubicado en el noreste de península de Hualpén, bahía de San Vicente, en la cual, resaltan principalmente dos unidades litológicas y dos tipos de depósitos no consolidados. Las unidades litológicas son las que históricamente han causado remoción en masa. En la Figura 4 se puede apreciar el mapa geológico de la península de Hualpén.

Mapa Geológico de la Península de Hualpén

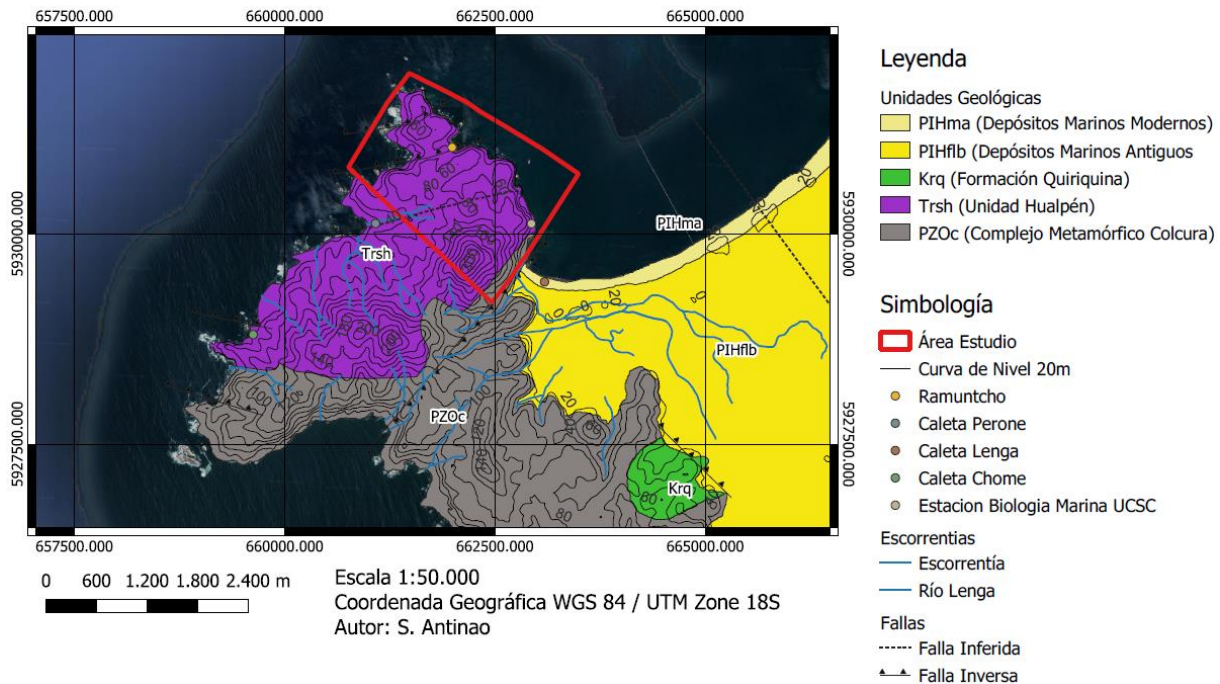


Figura 4: Mapa Geológico de la Península de Hualpén. (Modificado de Campo II, 2009).

La litología de la península consiste en un basamento de rocas cristalinas, granitos paleozoicos y pizarras precámbricas. Sobre el basamento, descansa un conjunto de rocas sedimentarias de edad cretácica y terciaria, cabe señalar que la geología de la zona es de origen marino-costero, formadas por areniscas de edad Plioceno-Pleistoceno (Ilabaca, 1978).

Para las unidades litológicas, la Serie Occidental del Basamento Metamórfico está compuesta en mayor grado de filitas, y en menor grado de micaesquistos, pizarras y metachert. Estas rocas están constantemente expuestas a un metamorfismo de tipo regional de bajo grado, y localmente por metamorfismo de contacto posterior (Vásquez, 2001). El tipo de rocas metamórficas existentes en la zona, presentan valores del ángulo de fricción en un rango que varía entre los 30° y 40°, esto según la clasificación realizada por Hoek & Bray (1981).

Los Monzogranitos Hualpén corresponden a un cuerpo plutónico. Está principalmente formado por monzogranitos de biotita, con presencia en un grado mucho menor de turmalina. Las rocas de esta unidad presentan un ángulo de fricción con un rango de 35° y 45° (Hoek & Bray, 1981). La unidad anteriormente mencionada, aflora en el sector del acceso a las instalaciones de la Universidad Católica de la Santísima Concepción.

Ahora, en cuanto a los depósitos no consolidados, es posible encontrar depósitos fluviales del río Biobío, los cuales corresponden a arenas negras de granulometría diversa, con presencia de limo, de selección pobre y subredondeadas. Para el borde del norte, junto a la bahía de San Vicente, se encuentran los Depósitos Marinos Modernos, los cuales corresponden a depósitos marinos litorales, coluviales y aluviales modernos, los cuales son formados de arenas y gravas de playas actuales.

2.5 Geomorfología

El área de estudio se emplaza desde Caleta Lengua, hasta Ramuntcho por sendero, donde principalmente se ubica en la parte noreste de la Península de Hualpén (Vásquez, 2013), la cual se compone principalmente por un sistema montañoso con escarpes y pendientes, constituido por terrazas marinas, acantilados, quebradas y playas, las cuales están expuestas a una constante erosión

marina. Además, se encuentran las formaciones montañosas de las Tetas Norte y Sur, alcanzando una altura aproximada de 238m.s.n.m y 247 m.s.n.m. (Contreras, 2017). Cabe señalar que el área de estudio presenta variedad de playas y acantilados activos con presencia abundante vegetal, debido a la humedad costera generada por los vientos marinos.

En la Figura 5 corresponde al mapa geomorfológico de la Península de Hualpén, donde en el área de estudio destaca los siguientes términos según Municipalidad de Hualpén, 2018:

- **Acantilados:** Corresponde a laderas de la Península de Hualpén, especialmente abruptos en su borde occidental que enfrentan al mar. Existe también el termino de acantilados muertos, los cuales no son erosionados por acción del mar, pero que a toda su extensión es irregular, por ende, se encuentran sujetos a procesos erosivos de lluvia, derrumbes y deslizamientos de masa.
- **Quebradas:** Corresponde a un sistema de drenajes semipermanente o de escurrimientos estacionales, los cuales son activados en temporadas invernales, escurriendo hacia los cuatro costados de la Península, conformando así, quebradas con una vegetación abundante.
- **Terraza de abrasión marina:** Son terrazas escalonadas de dos niveles a 100 y 50 m.s.n.m., principalmente conformada por esquistos y pizarras de edad Precámbricas. Además, corresponden a extensas superficies de topografía plana a ondulada con una inclinación hacia el oeste.
- **Sistema montañoso:** Aflora al centro de la Península donde, las terrazas de erosión marina entran en contacto con el sistema montañoso, conformado por las rocas graníticas que constituyen el relieve vigoroso que sobresale de erosión, los cuales destacan, el cerro Conejo, Cerro Teltrén, Cerro Teta Norte y Sur.

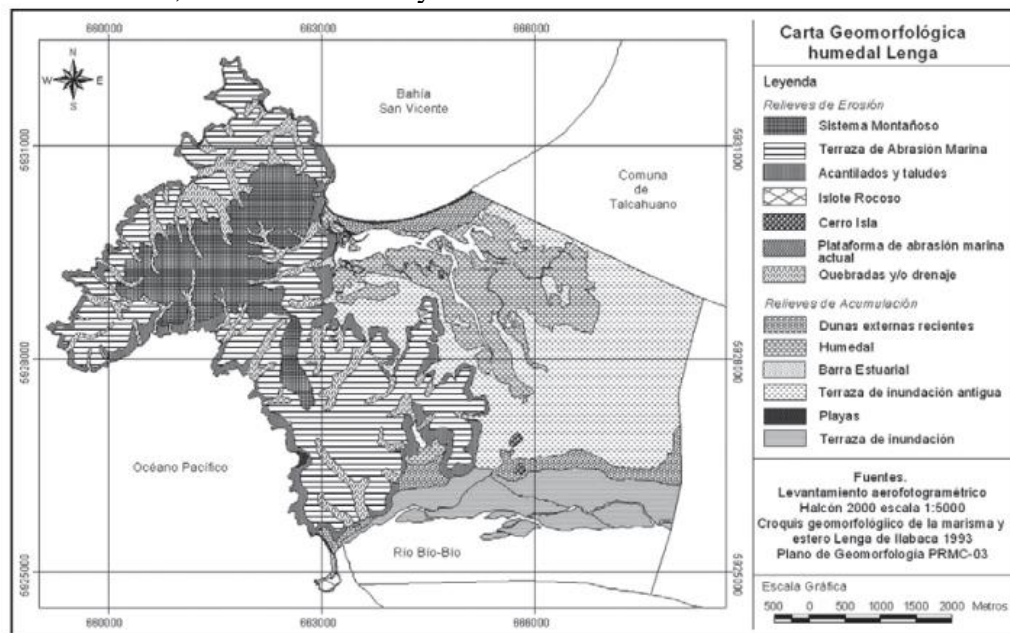


Figura 5: Mapa Geomorfológico de la Península de Hualpén. (Vásquez, 2013).

2.6 Clima

El clima se relaciona con el volumen, intensidad y distribución de precipitaciones con su respectivo régimen climático, donde la zona climática de transición varía entre un clima templado mediterráneo cálido y un clima templado húmedo o lluvioso (Vásquez, 2013). Cabe señalar que la temperatura media anual en la Península de Hualpén es de aproximadamente 12,7°C, con una amplitud térmica de 5,0 a 6,2°C. Por otro lado, es importante destacar que la precipitación media anual para la Península de Hualpén equivale a 1.328,8 mm, lo que va generando una humedad relativa por sobre el 80% debido a su ubicación. (Municipalidad de Hualpén, 2018).

2.7 Vegetación

En el aspecto de la vegetación, ésta tiende a ser un factor positivo o negativo según sea el caso de la estabilidad del talud, debido a que contribuye de manera directa con aspectos importantes del terreno como tal. Ejemplos de esto, tiene que ver con la humedad del suelo, la cual puede producir facturas al macizo rocoso o bien, contribuir a la cohesión de este. En cuanto a la zona de estudio

es posible determinar dos grandes grupos de vegetación nativa: el primero de ellos tiene que ver con el bosque hidromórfico; y el segundo, corresponde al matorral costero arborescente en la zona mesomórfica (Municipalidad de Hualpén, 2018). A su vez, es posible encontrar plantaciones forestales de pino, como se puede apreciar en la Figura 6



Figura 6: Acantilado con pinos forestales.

2.8 Meteorización

La meteorización puede ser física y química, la primera corresponde a la fragmentación física o desintegración de las rocas, y la segunda es la alteración química o descomposición de las rocas de la corteza terrestre, en ambos casos es una respuesta de los materiales terrestres a un ambiente cambiante (Tarbuck & Lutgens, 1999).

El proceso natural de meteorización transforma las rocas y minerales expuestos al agua y aire, en nuevos productos químicos (minerales arcillosos). La competencia y cohesión de los suelos así formados tiende a reducirse al mínimo al saturarse de agua, lo cual los hace susceptibles al colapso o falla. Aunque la meteorización se da principalmente en suelos desarrollados a partir de rocas graníticas, también se puede dar en otras formaciones rocosas, por lo que es un factor latente en la causa de procesos de remociones en masa de la zona de estudio, ya que hay una extensa presencia de un relieve con una potente cubierta de material meteorizado de espesor considerable (Naranjo y otros, 2006).

La meteorización más característica de la zona corresponde a las rocas intrusivas de edad del Carbonífero Superior correspondientes a granito y granito alcalino, donde se forma el maicillo, el cual corresponde a un material limoso que favorece la ocurrencia de procesos de movimientos de masa debido a su baja cohesión (Quezada y otros, 1997). En general como consecuencia de la meteorización por agentes climáticos en la zona, se ha dado origen a suelos principalmente arcillosos, con desarrollo profuso de maicillo y bolones esferoidales sobre sustratos graníticos y arcilloso, con gravas subordinadas sobre rocas metamórficas y sedimentarias (Naranjo y otros, 2005). Respecto al maicillo, es un material altamente meteorizado producto de la alta exposición de las laderas a la lluvia y viento en el borde costero.

2.9 Análisis cinemático en taludes y laderas

2.9.1 Falla planar

Una falla planar consiste en el deslizamiento de una masa de roca a través de un plano de una discontinuidad. Por otro lado, no es posible si la dirección del buzamiento de la familia de discontinuidades difiere en dirección del buzamiento de la cara del talud por más de 20° , es por ello que se vuelve un bloque estable. Cumpliendo de esta manera un mayor espesor de roca entre bloques, logrando una mayor resistencia hacia la falla. (Wyllie, 2017).

En la Figura 7, en a), se puede apreciar un bloque de roca inestable fallando por el segmento A-A, en b), se puede apreciar un estereograma el cual define dos líneas de dirección de buzamiento, designando así los límites laterales de la envolvente de la falla planar.

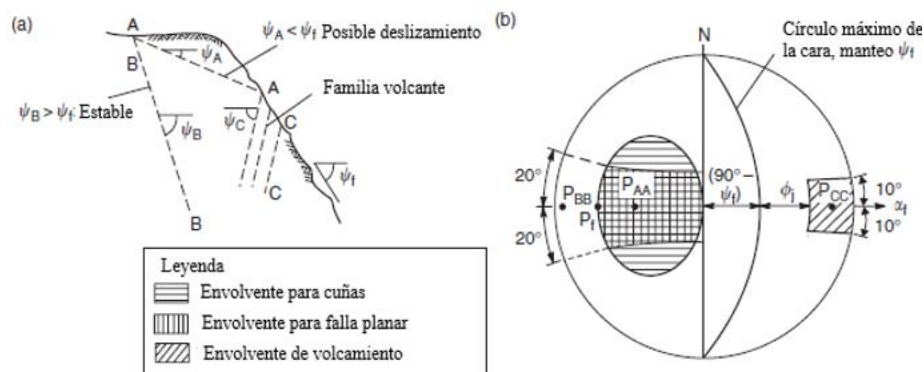


Figura 7: Análisis cinemático de bloques en roca, a) Familia de discontinuidades, b) Estereograma envolvente de fallas. (Modificado de Wyllie, 2017).

2.9.2 Falla por cuña

La falla por cuña corresponde al deslizamiento cuyo desplazamiento está controlado por dos o más discontinuidades formando una cuña o bloque de roca con riesgo de desprendimiento en caída libre. Es uno de los tipos de fallas más comunes, debido a que pueden cumplirse en un rango de condiciones geológicas y geométricas mucho mayor que las fallas planas. (Wyllie, 2017).

Para que ocurra esta falla, es necesario cumplir las siguientes dos condiciones:

- Las discontinuidades del bloque de roca con riesgo de desprendimiento deben poseer rumbo distinto a la cara del talud.
- Las intersecciones de las discontinuidades deben poseer un manteo mayor al ángulo de fricción de la roca y menor a la inclinación de la cara del talud.

En la Figura 8, es posible visualizar estas dos condiciones antes descritas para la falla por cuña.

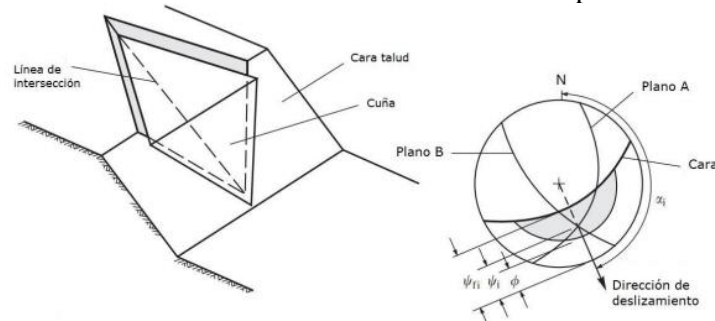


Figura 8: Condiciones para deslizamiento en falla por cuña (Modificado de Wyllie, (2017)).

2.9.3 Falla por volcamiento

La falla por volcamiento presenta diferencias con respecto a los dos anteriores descritos, la principal corresponde a que consiste en una rotación de columnas u bloques de roca desde una base fija. Pero su análisis puede ser desarrollado de forma similar a los casos anteriores (Wyllie, 2017). Se pueden observar dos tipos de fallas por volcamiento:

- **Por Flexión (Flexural):** Corresponde a una sucesión de columnas continuas de roca separada por sus discontinuidades. Debido a su alta inclinación tienden a generar este movimiento hacia adelante.
- **Por Bloques:** Corresponde a altas columnas de rocas, formadas por discontinuidades que poseen una alta inclinación y la presencia de un segundo set que definen la altura de las columnas. El colapso generado se produce por el desplazamiento hacia delante de las columnas de menor elevación, las cuales son empujadas por las columnas de mayor tamaño.

En la Figura 9, es posible ver de manera grafica ambos tipos de fallas por volcamiento.

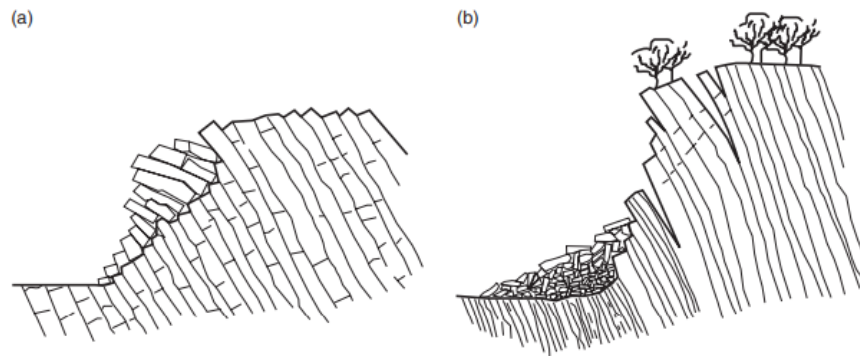


Figura 9: Clasificación de falla por volcamiento: (a) Flexural, (b) Bloques. (Wyllie, 2017).

2.10 Clasificaciones geomecánicas

Las clasificaciones geomecánicas constituyen un sistema de comunicación universal entre los usuarios que lo utilizan (ingenieros, geólogos, etc.), el cual ayuda a mejorar el conocimiento a la hora de estudio del comportamiento del macizo rocoso, permitiendo así, la obtención de valoración cuantitativa del mismo, por medio de un algoritmo simple (Romana, 1997).

Los sistemas utilizados para clasificación de macizos rocosos corresponden a los siguientes:

2.10.1 RMR (Rock Mass Rating) (Bieniawski, 1989)

Este sistema clasifica los macizos rocosos con una puntuación de 0 a 100, donde los parámetros a considerar son cinco: Resistencia a la compresión simple, RQD (índice de designación de calidad de la roca), espaciamiento de las discontinuidades, condición de las discontinuidades, presencia de agua. (Celada y otros, 2014).

- Resistencia a la compresión uniaxial

El siguiente parámetro permite caracterizar y clasificar la matriz rocosa del talud. Esta resistencia determina la competencia de la roca, donde depende principalmente de la composición mineralógica de la roca y su grado de meteorización (Rodríguez, 2007). A su vez, este parámetro es obtenible a través de los criterios de campo (ISRM, 1978) por ensayos de resistencia en laboratorio o por ensayos in-situ utilizando el Martillo Schmidt, donde se utilizó este último in-situ.

- Martillo de Schmidt

El martillo de Schmidt es un instrumento diseñado para elaborar ensayos de resistencia en concreto, donde se ha ido modificando convenientemente para dar lugar a nuevos modelos, los cuales resultan más apropiados para estimar la compresión simple de la roca, utilizándolo en la roca matriz y sobre las caras de las familias de discontinuidades, debido a que es un método no destructivo del terreno. Se mide la resistencia del rebote de la superficie de la roca, logrando así la obtención de la resistencia de la compresión uniaxial, mediante la correlación con el gráfico de Miller (1965), el cual corresponde a la Figura 10.

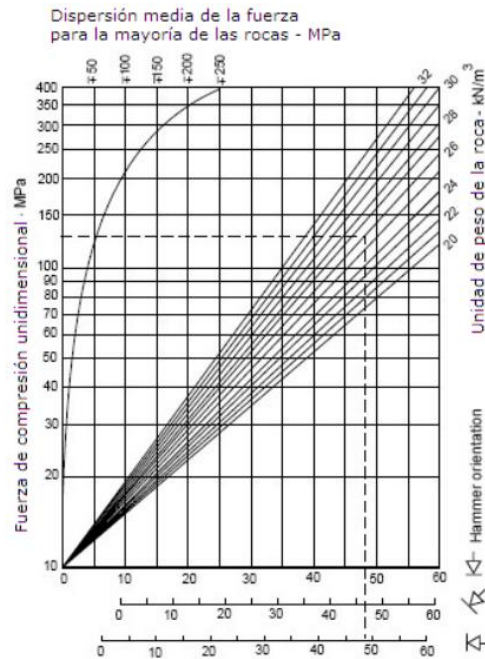


Figura 10: Ábaco para determinar resistencia de la compresión simple uniaxial. (Miller, 1965).

- RQD

El RQD se define como el índice de designación de calidad de la roca, este método fue desarrollado por Deere entre 1963 y 1967 para cuantificar la calidad de la roca mediante núcleos de perforación. Pero, Palmström (1982) optó por demostrar que el RQD se podía obtener a partir del número de diaclasas por unidad de volumen, que se exponen en los afloramientos, taludes y áreas de exploración (Bieniawski, 1989). Dando la siguiente ecuación, donde J_v es el total de diaclasas por metro cúbico.

$$RQD = 115 - 3,3J_v \quad (1)$$

- Espaciamiento de las discontinuidades

Corresponde a la distancia perpendicular entre los planos consecutivos de la misma familia de discontinuidad, definiendo así el tamaño del bloque de roca matriz (Rodríguez, 2007).

- Agua Subterránea

Corresponde a la presencia de agua que puede poseer el talud, donde las filtraciones influyen en la resistencia al corte, en que principalmente procede del flujo de discontinuidades. Mientras que en rocas sedimentarias puede haber de igual forma filtración de la roca matriz. (Rodríguez, 2007).

- Condición de las discontinuidades:

- Persistencia: Longitud o extensión superficial del plano de la discontinuidad, el cual debe medir la longitud de dos planos. (Rodríguez, 2007).
- Apertura: Distancia perpendicular que separa las paredes rocosas de las discontinuidades en el talud. (Rodríguez, 2007).
- Rugosidad: Ondulación de la superficie a pequeña escala, la cual tiene una gran influencia en el comportamiento geomecánico del talud, mayoritariamente en la resistencia al corte. (Rodríguez, 2007).
- Relleno: Material distinto de la roca que aparece entre las paredes de las familias de discontinuidades, se describen sus características, propiedades y materiales. (Rodríguez, 2007).
- Alteración: Estimación de grado de meteorización del macizo rocoso en conjunto y de cada familia de discontinuidad en particular. (Rodríguez, 2007).

En la Figura 11 se puede apreciar los criterios utilizados para la valoración y clasificación de los macizos rocosos, con el fin de hallar el valor de RMR (rock mass rating) y su respectiva clasificación de taludes.

CLASIFICACION GEOMECANICA RMR (BIENIAWSKI, 1989)								
1	RESISTENCIA A LA MATRIZ ROCOSA (MPa)	ENSAYO DE CARGA PUNTUAL	> 10	10 - 4	4 - 2	2 - 1	COMPRESION SIMPLE (MPa)	
		COMPRESION SIMPLE	>250	250 - 100	100 - 50	50 - 25	25 - 5 5 - 1 <1	
		PUNTUACION	15	12	7	4	2 1 0	
2	RQD		90 % - 100 %	75 % - 90 %	50 % - 75 %	25 % - 50 %	< 25 %	
		PUNTUACION	20	17	13	6	3	
3	SEPARACION DE DIACLASA		> 2 m	0.6 - 2 m	0.2 - 0.6 m	0.06 - 0.2 m	< 0.06 m	
		PUNTUACION	20	15	10	8	5	
4	ESTADO DE LAS DISCONTINUIDADES	LONG DE LA DISCONTINUIDAD	< 1 m	1 - 3 m	3 - 10 m	10 - 20 m	> 20 m	
			PUNTUACION	6	4	2	1	0
		ABERTURA	Nada	< 0.1 mm	0.1 - 1.0 mm	1 - 5 mm	> 5 mm	
			PUNTUACION	6	5	3	1	0
		RUGOSIDAD	Muy Rugosa	Rugosa	Ligeramente Rugosa	Ondulada	Suave	
			PUNTUACION	6	5	3	1	0
		RELLENO	Ninguno	Relleno duro < 5 mm	Relleno duro > 5 mm	Relleno blando < 5 mm	Relleno blando > 5 mm	
			PUNTUACION	6	4	2	2	0
	ALTERACION	Inalterada	Ligeramente Alterada	Moderadamente alterada	Muy alterada	Descompuesta		
	PUNTUACION	6	5	3	1	0		
5	AGUA FREATICA	CAUDAL POR 10m DE TUNEL	Nulo	< 10 litros/min	10 - 25 litros/min	25 - 125 litros/min	> 125 litros/min	
		RELACION: PRESION DE AGUA/TENSION PRINCIPAL MAYOR	0	0 - 0.1	0.1 - 0.2	0.2 - 0.5	> 0.5	
		ESTADO GENERAL	Seco	Ligeramente húmedo	Húmedo	Goteando	Agua fluyendo	
			PUNTUACION	15	10	7	4	0

CLASIFICACION	CLASE	I	II	III	IV	V
	CALIDAD	Muy Buena	Buena	Media	Mala	Muy Mala
	PUNTUACION	100 - 81	80 - 61	60 - 41	40 - 21	< 20

Figura 11: Cálculo de RMR y ponderación. (Bieniaswki, 1985).

2.10.2 SMR (Slope Mass Rating) (Romana, 1985)

La clasificación geomecánica de Slope Mass Rating (SMR), presentada por Romana (1985) para taludes en roca, se obtiene mediante la por la adición del RMR básico, calculado a partir de una serie de factores dependientes de la relación geométrica lograda por la existencia entre la discontinuidad y el talud, como también la suma de un factor dado por método de excavación, logrando así la siguiente expresión:

$$SMR = RMR_{básico} + (F1 \cdot F2 \cdot F3) + F4 \quad (2)$$

De la formula anterior, se consideran los siguientes parámetros:

1. $RMR_{básico}$ obtenido por la clasificación de Bieniawski (1989).
2. $F1$ obtenido a través del paralelismo entre las direcciones de las discontinuidades y del talud. (Tabla 1).
3. $F2$ depende del buzamiento de la discontinuidad y como esta varía según cada rotura que pueda generar en cada familia de discontinuidades. (Tabla 1).
4. $F3$ obtenido a partir de la relación entre el buzamiento del talud y el buzamiento de la discontinuidad. (Tabla 1).
5. $F4$ corresponde al factor de ajuste por método de excavación empleado. (Tabla 1).

Tabla 1: Parámetros de corrección F1, F2, F3 y F4 de la clasificación SMR. (Modificado de Romana (1985)).

Tipo Falla	Ángulos auxiliares	Muy Favorable	Favorable	Normal	Desfavorable	Muy desfavorable	
P	A	$ \alpha_j - \alpha_s $	$>30^\circ$	30-20°	20-10°	10-5°	$<5^\circ$
T		$ \alpha_j - \alpha_s - 180 $					
W		$ \alpha_j - \alpha_s $					
P/T/W	F1	0,15	0,40	0,70	0,85	1,00	
P/W	B	$ \beta_j $ o $ \beta_j $	$<20^\circ$	20-30°	30-35°	35-45°	$>45^\circ$
P/W	F2		0,15	0,40	0,70	0,85	1,00
T			1,00				
P	C	$\beta_j - \beta_s$	$>10^\circ$	10-0°	0°	0-(-10°)	$<(-10^\circ)$
W		$\beta_j - \beta_s$					
T		$\beta_j + \beta_s$	$<110^\circ$	110-120°	$>120^\circ$	-	-
P/T/W	F3		0	-6	-25	-50	-60
Método de excavación F4							
Talud natural	+15	Voladura o mecánico		0	T: Rotura por vuelco P: Rotura Planar W: Rotura en cuña		
Precorte	+10	Voladura deficiente		-8			
Voladura suave	+8						

Dado los resultados obtenidos es posible la siguiente clasificación correspondiente Tabla 2, según el SMR (Romana, 1985).

Tabla 2: Clasificación de SMR. (Romana, 1985).

Clase	SMR	Descripción	Estabilidad	Rotura	Tratamiento
I	0-20	Muy mala	Totalmente inestable	Grandes roturas por planos continuo o por la masa	Reexcavación
II	21-40	Mala	Inestable	Juntas o grandes cuñas	Corrección
III	41-60	Normal	Parcialmente estable	Algunas juntas o muchas cuñas	Sistemático
IV	61-80	Buena	Estable	Algunos bloques	Ocasional
V	81-100	Muy buena	Totalmente estable	Ninguna	Ninguno

2.10.3 Q de Barton (Barton et al., 1974)

Corresponde a un sistema de clasificación cuantitativa, el cual permite a la ingeniería un diseño de los soportes de túneles, logrando así ser uno de los más aceptados (Bieniawski, 1989).

Esta clasificación tiene en cuenta los siguientes seis parámetros:

- RQD: (Rock Quality Designation)
- J_n : Número de familia de discontinuidades
- J_r : Rugosidad de las familias de discontinuidades
- J_a : Meteorización de las familias de discontinuidades
- J_w : Coeficiente reductor que tiene en cuenta la presencia de agua.
- SRF: (Stress Reduction Factor)

De acuerdo con estos parámetros se define la siguiente ecuación, con el fin de determinar el índice de calidad Q.

$$Q = \frac{RDQ}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF} \quad (3)$$

De la fórmula anterior, se considera que los cocientes representan lo siguiente:

- Tamaño de bloque: $\frac{RDQ}{J_n}$
- Resistencia al corte: $\frac{J_r}{J_a}$

- Estado tensional del macizo rocoso: $\frac{Jw}{SRF}$

2.10.4 Qslope (Bar & Barton, 2017)

Corresponde a un sistema elaborado en función del parámetro Q de Barton para túneles, con la principal misión de permitir la estabilidad de taludes en roca, sin la necesidad de sostenimientos o la construcción de taludes en minería abierta, logrando así hacer ajustes a los ángulos de los taludes en roca, permitiendo considerar así las condiciones aparentes de la roca durante la construcción (Bar & Barton, 2017).

Esta clasificación tiene en cuenta los siguientes seis parámetros:

- RQD: (Rock Quality Designation)
- Jn: Número de familia de discontinuidades
- Jr: Rugosidad de las familias de discontinuidades
- Ja: Meteorización de las familias de discontinuidades
- J_{wice} : Coeficiente reductor que tiene en cuenta la presencia de agua.
- SRF_{slope} : (Stress Reduction Factor)

De acuerdo con estos parámetros se define la siguiente ecuación, con el fin de determinar el índice de calidad Q_{slope} .

$$Q_{slope} = \frac{RDQ}{Jn} \cdot \left(\frac{Jr}{Ja}\right)_0 \cdot \frac{J_{wice}}{SRF_{slope}} \quad (4)$$

De la fórmula anterior, se consideran que los cocientes representan lo siguiente:

- Tamaño de bloque: $\frac{RDQ}{Jn}$
- Resistencia al corte: $\frac{Jr}{Ja}$ o un promedio al corte en caso de cuñas $\left(\frac{Jr}{Ja}\right)_1 \times \left(\frac{Jr}{Ja}\right)_2$
- Estado tensional del macizo rocoso: $\frac{J_{wice}}{SRF_{slope}}$

El resultado del ángulo estable del talud en roca fue estimado según Barton & Bar (2017). Es por ello que en la Figura 12 se puede observar el gráfico de ángulos de estabilidad de taludes, donde, además, se puede apreciar la siguiente ecuación, mediante el cual, es posible estimar el ángulo de estabilidad del talud.

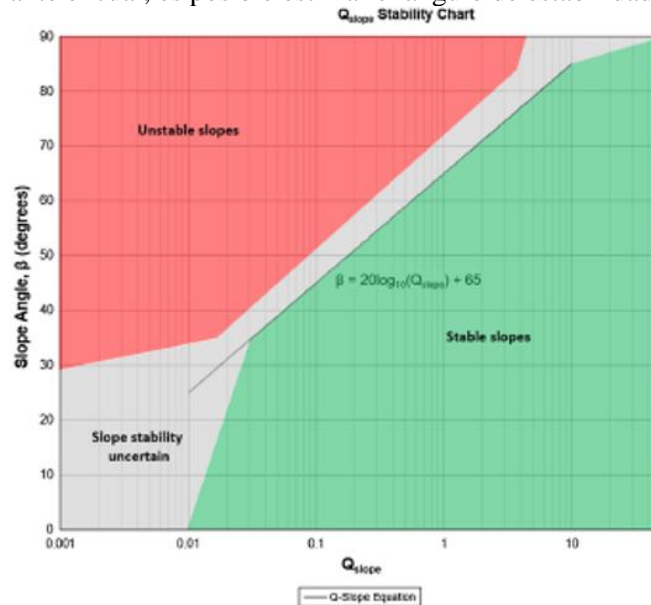


Figura 12: Gráfico de ángulos de estabilidad de taludes para Qslope. (Barton & Bar. 2017).

$$\beta = 20 \times \text{Log}_{10}(Q_{slope}) + 65 \quad (5)$$

2.11 Recopilación de mapas

El siguiente apartado trata de los mapas recopilados que abarcan la Península de Hualpén, donde existen dos: el primero de ellos corresponde al Mapa de remoción en masa elaborado por la SERNAGEOMIN, el cual se basa en los factores que intervienen en la inestabilidad de las laderas, como lo son: geología, pendiente y remociones en masa observadas en terreno, considerando así, factores condicionantes y detonantes para los procesos de remoción en masa (Municipalidad de Hualpén, 2018). En la figura 13, es posible observar en el Mapa A, que existen dos niveles de amenazas, los cuales corresponde a alta y baja.

El segundo, corresponde al mapa de remoción en masa elaborado por la Universidad del Bío-Bío, el cual se basa en una evaluación de multicriterio, donde las variables a considerar corresponden a la geología, clima, sismos, pendientes, exposición de las laderas y cobertura vegetal (Municipalidad de Hualpén, 2018). En la Figura 13, es posible observar el Mapa B, donde se aprecian tres niveles de susceptibilidad, correspondiente a baja, media y alta.

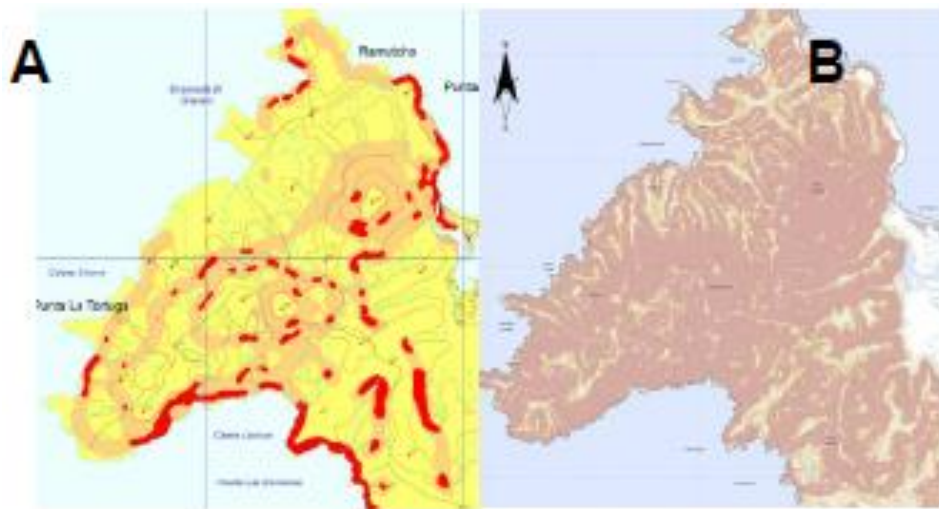


Figura 13: Comparación de mapas para procesos de remoción en masa para Península de Hualpén. (A) Mapa SERNAGEOMIN. (B) Mapa Universidad del Bío-Bío (Municipalidad de Hualpén, 2018).

3. METODOLOGÍA

Para el desarrollo requerido con el fin de completar este estudio se divide en tres etapas complementarias: investigación bibliográfica, investigación en terreno y trabajo con software.

3.1 Investigación bibliográfica

Esta parte del estudio consistió en realizar un trabajo gabinete a través de búsqueda bibliográfica de procesos de remoción en masa que hayan afectado al área de estudio. De lo anterior, el caso más reciente corresponde al del año 2019 en el Parque del Río Zañartu (SERNAGEOMIN, 2019). De igual forma se logró encontrar la carta geológica, geomorfológica y mapas de remoción en masa del área de estudio.

Por otro lado, los documentos de la metodología de clasificación de rocas vista en este estudio contribuyeron de buena manera a la hora de establecer la línea de trabajo a seguir. Gracias a ello fue posible la elaboración de planilla de datos, con el fin de obtener in-situ los parámetros necesarios para lograr así las clasificaciones de macizos rocosos correspondientes al área de estudio mediante una estación geomecánica. En la Figura 14, es posible visualizar esta planilla.

Para el análisis de las pendientes del terreno se utilizó un modelo digital de elevación (MDE) con una resolución de dos metros, el cual permitió la obtención de Dip y Dip dirección de toda el área de estudio, obtenido a través de proyecto núcleo.

Estaciones Geomecánicas para Tesis											
Estacion	Proyecto	Supervisor				Fecha					
		Alumno 1:				Alumno 2:					
Ubicación		UTM:									
Coordenadas		Carrera:									
E: N:											
Nota (m.s.n.m)											
DESCRIPCIÓN DEL MACIZO ROCOSO											
DESCRIPCIÓN GENERAL											
Descripción roca matriz (suelo/roca, tipo de roca,											
Resistencia de la roca matriz (Rebote NP1)											
Resistencia de la roca matriz (Rebote NP2)											
Grado de meteorización (Martillo Smith)											
Grado de meteorización (Observación)											
Número de familias											
Flujo de agua											
TALUD											
Orientación											
Altura											
Observaciones (vegetación, etc.)											
FAMILIA 1											
Resistencia de las paredes (Rebote NP1)											
Orientación											
Espaciamiento											
Persistencia											
Rugosidad (MICRO)											
Rugosidad (MACRO)											
Abertura											
Relleno											
FAMILIA 2											
Resistencia de las paredes (Rebote NP1)											
Orientación											
Espaciamiento											
Persistencia											
Rugosidad (MICRO)											
Rugosidad (MACRO)											
Abertura											
Relleno											
FAMILIA 3											
Resistencia de las paredes (Rebote NP1)											
Orientación											
Espaciamiento											
Persistencia											
Rugosidad (MICRO)											
Rugosidad (MACRO)											
Abertura											
Relleno											
FAMILIA 4											
Resistencia de las paredes (Rebote NP1)											
Orientación											
Espaciamiento											
Persistencia											
Rugosidad											
Abertura											
Relleno											
Croquis macizo rocoso					Fotografía macizo rocoso						

Figura 14: Plantilla de toma de datos.

3.2 Investigación en terreno

La finalidad de la investigación de terreno es poder obtener los parámetros para el relleno de la plantilla de datos de los macizos rocosos, como también corroborar la información geológica, geomorfológica y de los mapas de remoción en masa para el área de estudio. En la Figura 15 se puede apreciar un mapa de ubicación de los taludes seleccionados para realizar una estación geomecánica.

Mapa ubicación de taludes en Península de Hualpén

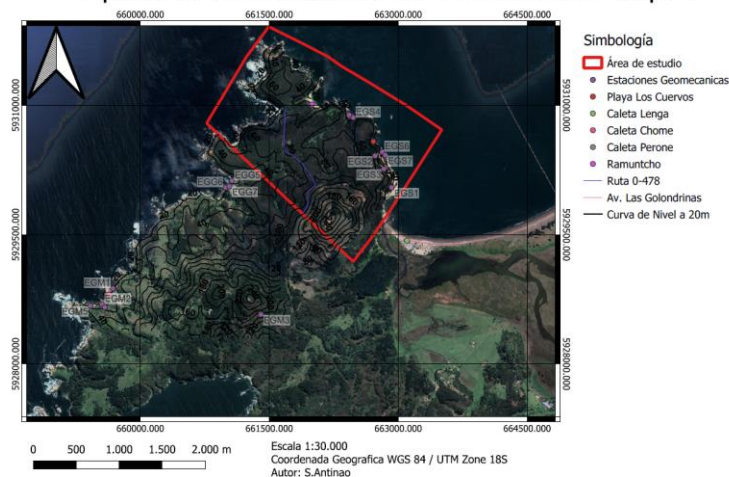


Figura 15: Mapa de ubicación taludes Caleta Lengua-Ramuntcho.

A continuación, se presentarán los taludes en los cuales se realizaron las estaciones geomecánica, con el fin de obtener los parámetros para su clasificación. Estas figuras van desde la Figura 16 hasta la Figura 19, donde cabe señalar que se puede observar el mismo tipo de roca a lo largo de las estaciones geomecánicas, la cual corresponde a monzogranito de biotita y turmalina.



Figura 16: Corresponde a las ubicaciones de las estaciones geomecánicas. (a) EGS1 con coordenada UTM 18H//662923/ 5930046. (b) EGS2 con coordenada 18H//662731/5930413.

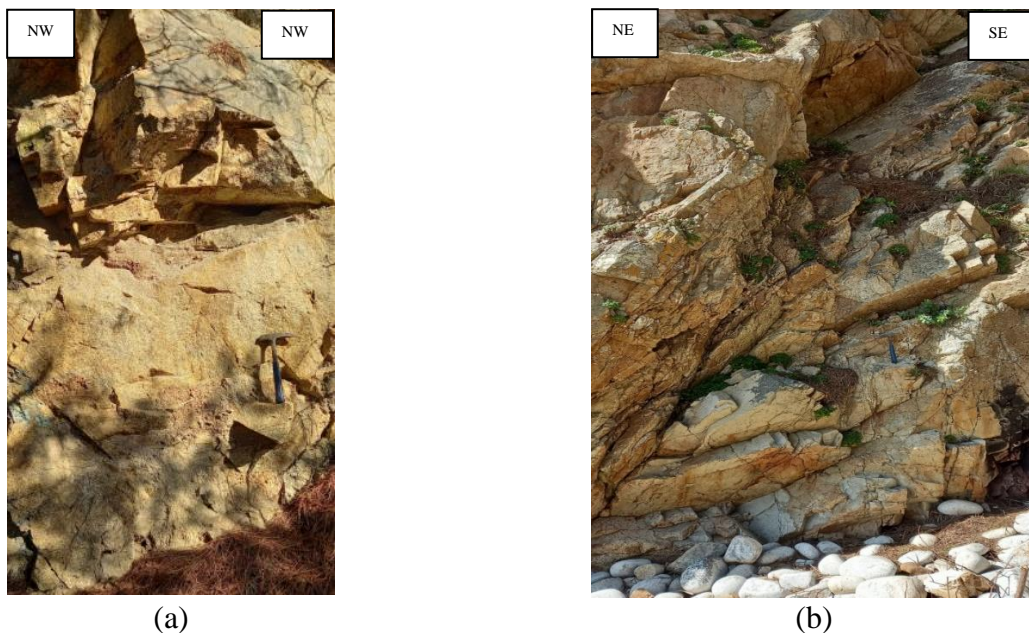


Figura 17: Corresponde a las ubicaciones de las estaciones geomecánicas. (a) EGS3 con coordenada UTM 18H//662832/ 5930413. (b) EGS4 con coordenada 18H//662477/5930857.



Figura 18: Corresponde a las ubicaciones de las estaciones geomecánicas. (a) EGS5 con coordenada UTM 18H/662429/ 5930886. (b) EGS6 con coordenada UTM 18H//662814/5930458.



Figura 19: Corresponde a las ubicaciones de las estaciones geomecánicas. (a) EGS7 con coordenada UTM 18H//662850/ 5930421.

Por otro lado, en la tabla 3 es posible visualizar las visitas, fecha y hora que fueron necesarias para la toma de datos que posteriormente se utilizaron para los resultados finales de este estudio.

Tabla 3: Resumen de visitas.

Talud	Visitas	Fecha	Hora
EGS1	3	12-10-2022	9:18 a. m.
EGS2	1	30-05-2022	12:03 p. m.
EGS3	2	12-10-2022	10:46 a. m.
EGS4	1	25-08-2022	1:16 p. m.
EGS5	1	25-08-2022	2:04 p. m.
EGS6	1	12-10-2022	10:53 a. m.
EGS7	2	30-10-2022	12:46 p. m.

3.3 Análisis mediante software

Finalizando con este apartado, el análisis mediante software se refiere al trabajo llevado a cabo en terreno y post-terreno, específicamente a la obtención de los parámetros de los macizos rocosos y la comparación de ellos respectivamente.

Una vez terminado la estación geomecánica en terreno, se ingresaron los datos al software Microsoft Excel, donde mediante las metodologías de clasificación de macizos rocosos se realizaron los cálculos pertinentes para saber si los datos eran coherentes con lo visto en terreno, en caso de no ser así se acudió nuevamente a terreno para realizar la medición de estación geomecánica.

A su vez, se utilizaron el software QGis 3.26 y Stereonet para realizar mapas de la zona de estudio, además de ver la distribución de las familias de discontinuidades dentro del macizo rocoso.

Luego de realizar los terrenos y obteniendo todas las clasificaciones geomecánicas en estudio, se comenzó a trabajar en la elaboración de mapas de interpolación de clasificación de la Península de Hualpén y el área de estudio como tal, esto se elaboró mediante el software QGis 3.26 con el complemento Ordinary Kriging.

4. RESULTADOS

4.1 Clasificación RMR, SMR, Q de Barton, Qslope

4.1.1 RMR (Rock Mass Rating)

En el siguiente apartado, las Tabla 4 corresponde a la puntuación obtenida para el cálculo de RMR (Rock Mass Rating), en función de las estaciones geomecánicas antes descritas. A su vez, en la Tabla 5, se dan los resultados de RMR (Rock Mass Rating) y su clasificación para cada talud.

Tabla 4: Resumen de puntuación para RMR de estaciones geomecánicas.

Calculo RMR							
Estacion Geomecánica	EGS1	EGS2	EGS3	EGS4	EGS5	EGS6	EGS7
Parametros Clasificación	Puntuación	Puntuación	Puntuación	Puntuación	Puntuación	Puntuación	Puntuación
Resistencia Matriz Roca	15	12	15	15	15	12	15
RQD	6	13	13	17	13	6	6
Seperacion entre diaclasas	8	8	8	10	8	8	8
Longitud Discontinuidad	4	2	2	2	4	4	4
Abertura	0	1	1	1	1	1	3
Rugosidad	1	5	6	0	1	3	3
Relleno	2	2	2	2	2	6	2
Alteración	5	5	3	3	3	5	3
Estado General	7	7	7	7	7	7	7

Tabla 5: Resumen de resultados obtenidos para RMR.

Resumen de resultados RMR (Rock Mass Rating)							
Estación Geomecánica	EGS1	EGS2	EGS3	EGS4	EGS5	EGS6	EGS7
Total	48	55	57	57	54	52	51
Clase	III	III	III	III	III	III	III
Media	60-41	60-41	60-41	60-41	60-41	60-41	60-41

4.1.2 Resultados SMR (Slope Mass Rating)

En función de lo antes expuesto, se dará a conocer los resultados para el cálculo del SMR (Slope Mass Rating), donde para su obtención fue necesario el cálculo del promedio de dip y dip-direction de cada talud con sus respectivas familias de discontinuidad, para posteriormente realizar el cálculo y elegir el valor mínimo de todos SMR obtenidos en función del talud y sus respectivas familias de discontinuidades. En la en la Tabla 6, se dan a conocer los parámetros relacionados con F1, F2 y F3. Finalizando con la Tabla 7, la cual presenta los datos obtenidos y su respectiva clasificación.

Tabla 6: Parámetros obtenidos para calculo SMR.

Parámetros obtenidos para calcular SMR							
Estación Geomecánica	EGS1	EGS2	EGS3	EGS4	EGS5	EGS6	EGS7
RMR	48	55	57	57	54	52	51
F1	0,15	0,15	0,7	0,7	1	0,15	0,85
F2	0,85	1	0,85	0,85	0,15	1	0,15
F3	-60	-50	-60	-50	-60	-25	-60

Tabla 7: Resultado de SMR y su clasificación.

Resumen de resultados SMR (Romana, 1985)							
Estación Geomecánica	EGS1	EGS2	EGS3	EGS4	EGS5	EGS6	EGS7
Total	40	48	21	27	45	48	43
Calidad	Pobre	Aceptable	Pobre	Pobre	Aceptable	Aceptable	Aceptable

4.1.3 Resultados Q de Barton (Barton et al., 1974)

En la Tabla 8 corresponde al cálculo del Q de Barton para cada estación geomecánica, donde se expresa cada ponderación realizada para la obtención de su resultado y clasificación. A su vez, la Tabla 9 presenta los valores obtenidos y la clasificación de cada uno taludes estudiados.

Tabla 8: Parámetros utilizados para calculo del Q de Barton.

Parámetros para cálculo Q de Barton (Barton et al., 1974)							
Estación Geomecánica	EGS1	EGS2	EGS3	EGS4	EGS5	EGS6	EGS7
RQD	48,62	53,43	56,39	81,45	13	39,38	21,75
Jn	15	9	9	15	9	9	12
Jr	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
Ja	4	4	4	4	4	4	4
Jw	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66
SRF	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5

Tabla 9: Resultados y clasificación para Q de Barton.

Resultados de Q de Barton (Barton et al., 1974)							
Estación Geomecánica	EGS1	EGS2	EGS3	EGS4	EGS5	EGS6	EGS7
Total	0,321	0,588	0,620	0,538	0,143	0,433	0,179
Clasificación	Muy Malo	Muy Malo	Muy Malo	Muy Malo	Muy Malo	Muy Malo	Muy Malo

4.1.4 Resultados Q slope (Bar & Barton, 2017)

Para el cálculo de Q slope, es necesario la utilización de los porcentajes de falla por talud y familia de discontinuidad. Gracias al Software Dips es posible realizarlo en función de los sistemas de fallas como lo son: Planar, Cuña, Flexural Toppling y de Bloque, donde se buscan los dos porcentajes mayores con el fin de darle un valor a este parámetro. En la Tabla 10 se puede apreciar esta clasificación otorgada. Posterior a eso, en la Tabla 11 se pueden apreciar los parámetros utilizados para el cálculo del Q slope. Finalizando con la Tabla 12, la cual demuestra el resultado obtenido, su clasificación y la beta de estabilidad para los taludes de las estaciones geomecánicas seleccionados.

Tabla 10: Clasificación O-factor para taludes.

Clasificación O-Factor Taludes							
Estación Geomecánica	EGS1	EGS2	EGS3	EGS4	EGS5	EGS6	EGS7

Set A	0,5	0,25	0,25	0,25	0,25	0,75	0,25
Set B	0,9	0,8	1	0,9	0,9	1,5	0,9

Tabla 11: Parámetros para cálculo de Q slope.

Parámetros para cálculo Q slope									
Talud	EGS1	EGS2	EGS3	EGS4	EGS5	EGS6	EGS7	EG7	EG8
RDQ	48,62	53,43	56,39	81,45	13	39,38	21,75	39,38	21,75
Jn	15	9	9	15	9	9	9	9	9
Jr	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
Ja	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Jwice	0,6	0,6	0,7	0,7	0,7	0,7	0,6	0,7	0,6
SRFslope	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	15	15	15	15

Tabla 12: Resultados obtenidos para Qslope y Beta.

Resultados Q slope y Beta					
Taludes	Qslope	Clasificación Q slope	Dip Talud	Beta	Clasificación
EGS1	0,1313	Muy malo	72	47	Inestable
EGS2	0,0134	Extremadamente malo	70	28	Inestable
EGS3	0,0206	Extremadamente malo	72	31	Inestable
EGS4	0,1283	Muy malo	53	47	Inestable
EGS5	0,0341	Extremadamente malo	44	36	Inestable
EGS6	0,0172	Extremadamente malo	70	30	Inestable
EGS7	0,0072	Excepcionalmente malo	56	22	Inestable

4.1.5 Estereograma de familias de discontinuidades

El siguiente apartado, corresponde a la representación gráfica realiza con el Software Dips de las familias de discontinuidades de los taludes presentes en la Península de Hualpén: La Figura 21, corresponde a todas las familias de discontinuidades de los taludes dentro de la Península de Hualpén, donde destacan cinco familias de discontinuidades; por otro lado, la Figura 22 (a), corresponde a las familias de discontinuidades de los taludes, nuevamente con cinco familias de discontinuidades, pero que se encuentran cerca de alguna falla observada dentro de la Península; finalizando con la Figura 22 (b), que corresponde a las familias de discontinuidades de los taludes utilizados en el presente estudio, donde se excluyeron los taludes cercanos a fallas dada la influencia de sus resultados en los resultados finales.

En función de las familias de discontinuidades fue posible la obtención de un mapa de las estaciones geomecánicas junto con los estereogramas correspondiente a cada estación, como se puede apreciar en la Figura 20. Por otro lado, para definir el tipo de rotura de falla predominante para los taludes dentro del área de estudio y gracias al software antes mencionado, donde en la Tabla 13, se puede apreciar el tipo de rotura predominante según la estación geomecánica estudiada, este tipo de falla puede ser Planar, Cuña, Toppling Flexural, Toppling de Bloque.

Mapa ubicación de taludes y grafico Dips en
Caleta Lengua y Ramuntcho

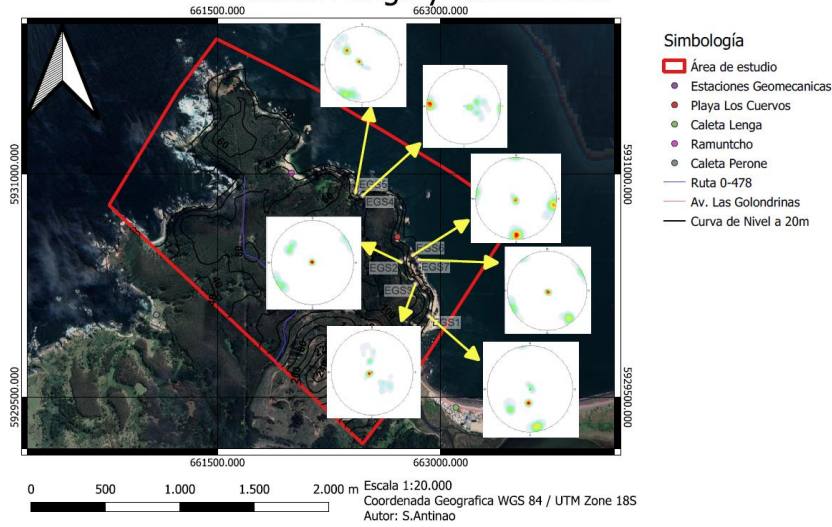


Figura 20: Mapa de ubicación de taludes y gráficos Dips.

Tabla 13: Resumen de rotura predominante por estación geomecánica.

Estación	Tipo de falla predominante
EGS1	F. Cuña
EGS2	F. Cuña
EGS3	F. Toppling Bloque
EGS4	F. Toppling Flexural
EGS5	F. Toppling Bloque
EGS6	F. Toppling Flexural
EGS7	F. Toppling Bloque

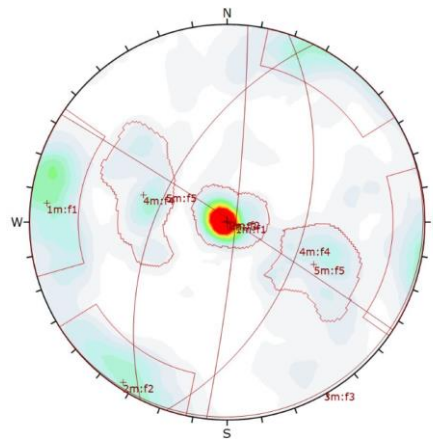


Figura 21: Estereograma familias de discontinuidades Península de Hualpén.

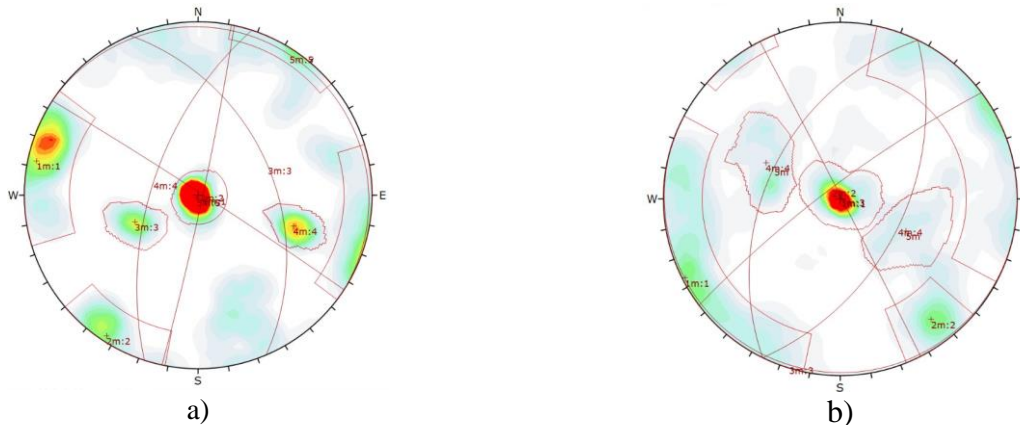


Figura 22: Estereograma familia de discontinuidades para la península de Hualpen. A) Discontinuidades en falla, B) Discontinuidades sin falla.

4.2 Mapas de clasificación

En este apartado, se mostrarán los resultados obtenidos mediante el uso del software Qgis 3.26 con el complemento Ordinary Kriging, el cual ayuda a la interpolación de datos en un espacio determinado. Cabe señalar que para los presentes mapas de clasificación de resultados RMR, SMR, Q de Barton y Beta-Alfa, se tomó en consideración las 15 estaciones geomecánicas elaboradas dentro de la Península de Hualpén en la unidad geológica Hualpén, así como también la elaboración de los mapas del área de estudio correspondiente, logrando así, los siguientes mapas de clasificación.

4.2.1 Resultados Mapas de RMR (Rock Mass Rating)

En función a la interpolación de datos realizada y la metodología de Bieniawski en 1989, como también lo visto in-situ es posible decir lo siguiente. En el área de estudio de color rojo destaca de color amarillo una clasificación III – Media de los macizos rocosos con fuertes pendientes, lo que conlleva un rango de entre 41 a 60. A su vez, se puede observar un color naranja. correspondiente a la clasificación de IV- Mala entre un rango de 20 a 4, para macizos rocosos en la zona de Caleta Peroné. Lo antes mencionado se puede apreciar en la Figura 23 relacionado con el mapa de interpolación de Caleta Lengua y Ramuntcho.

Mapa de interpolación en Caleta Lengua y Ramuntcho
RMR (Rocks Mass Rating)

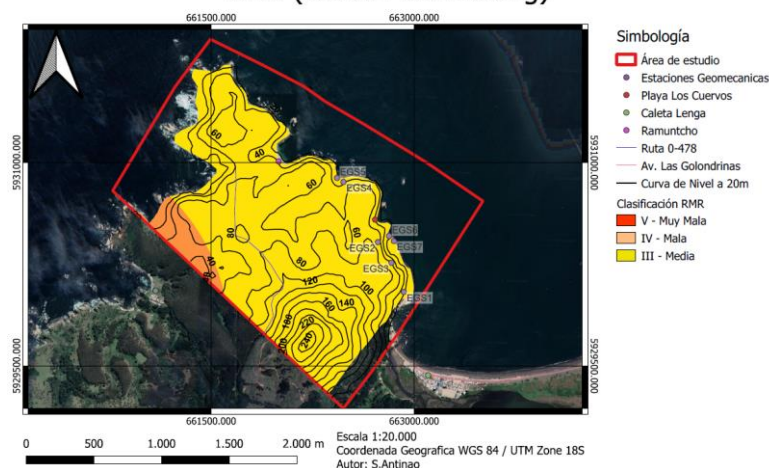


Figura 23: Mapa de interpolación de Caleta Lengua y Ramuntcho RMR (Rock Mass Rating).

4.2.2 Resultado de Mapas de SMR (Slope Mass Rating)

Siguiendo con los resultados de interpolación y mediante la metodología de Romana en 1985, en el área de estudio marcada en color rojo, destaca mayoritariamente de color naranja con una clasificación Media, correspondiente a un rango de entre 33 a 66 para los macizos rocosos. A su vez, se puede observar de color rojo el borde costero tanto al este como al oeste del área de estudio, la cual posee una clasificación Alta con

un rango que va desde 0 hasta 33 para los macizos rocosos, los cuales presentan una mayor inestabilidad debido a constante exposición a la meteorización. Lo anterior es posible visualizarlo en la Figura 24, relacionado con el mapa de interpolación de Caleta Lengua y Ramuntcho.

Mapa de interpolación en Caleta Lengua y Ramuntcho SMR (Slope Mass Rating)

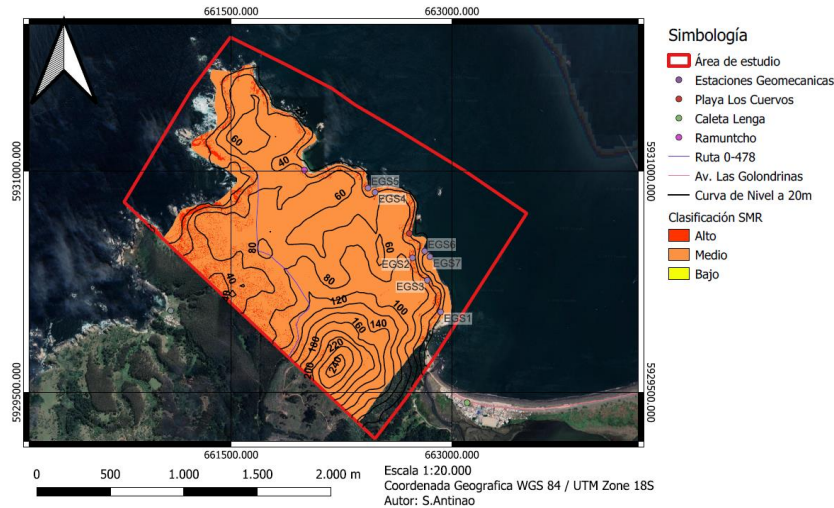


Figura 24: Mapa de interpolación de Caleta Lengua y Ramuntcho SMR (Slope Mass Rating).

4.2.3 Resultados Q de Barton (Barton et al., 1974)

Continuando con los resultados obtenidos mediante la interpolación de datos y la metodología de Barton et al., en 1974, en la figura 28, en el área de estudio marcada en rojo, destaca la clasificación de color naranja, correspondiente a Muy Mala, con un rango de entre a 0,1 a 1, en macizos rocosos, interpretándose así un peligro latente a la comunidad que transita diariamente en el sector debido a meteorización continua que existe en el lugar.

Mapa de interpolación en Caleta Lengua y Ramuntcho Q de Barton

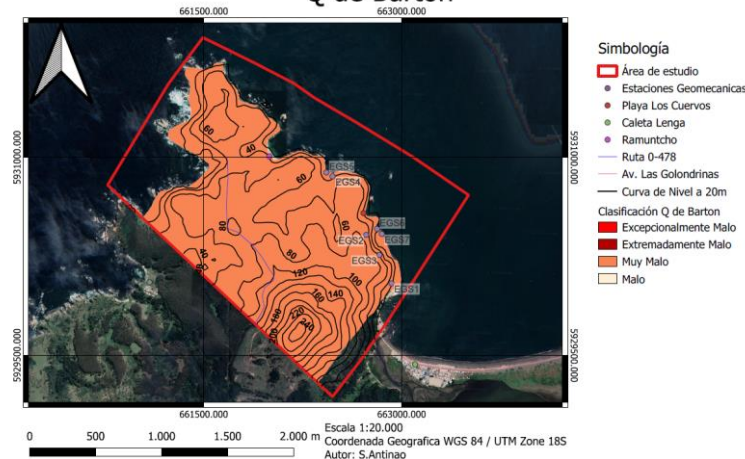


Figura 25: Mapa interpolación Caleta Lengua y Ramuntcho Q de Barton.

4.2.4 Resultados Q slope (Bar & Barton, 2017)

Finalizando con los datos de interpolación obtenidos para la metodología de Bar & Barton en el 2017, donde se obtuvieron los mapas en función a la beta de los taludes y al Dip del terreno extraído del modelo digital de elevación. En la figura 30, en el área de estudio marcada en color rojo se presenta mayoritariamente el color amarillo, correspondiente a una clasificación Baja con un rango que va a los valores mayor a 10° para su la estabilidad de los macizos rocosos, de color naranja con una clasificación Media en un rango de -10° a 10° , y de color rojo con una clasificación Alta, con un rango menor a -10° para los macizos rocosos. Es por ello que

los dos últimos presentan una mayor inestabilidad de sus macizos rocosos, tanto en todo el borde costero, como al interior de la Península de Hualpén.

Mapa de interpolación en Caleta Lengua y Ramuntcho
 Beta-Alfa

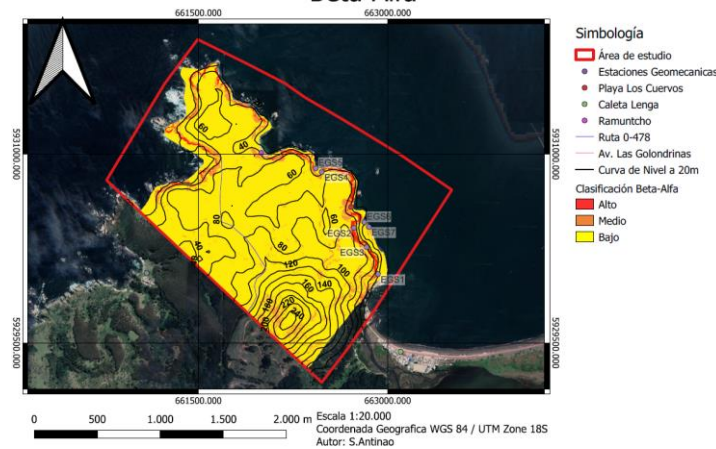


Figura 26: Mapa de interpolación beta – alfa en Caleta Lengua y Ramuntcho

4.3 Análisis de resultados

Finalizando con el análisis de resultados, el cual consiste en la comparación de los mapas recopilados tanto de SERNAGEOMIN y UBB sobre la amenaza de procesos de remoción en masa, como también los mapas de interpolación entre SMR y Beta - alfa obtenidos a través de las estaciones geomecánicas in-situ.

Los puntos por comparar entre los mapas recopilados de la SERNAGEOMIN y la UBB, es que el primero de ellos no estima una inestabilidad de los taludes cercanos a Ramuntcho, pero la UBB si lo presenta. Esto es por el análisis de modelación Multi-Criterio (EMC) con variables como lo son geología, clima, sismos, pendientes, exposición de las laderas y cobertura vegetal, la cual es similar a la interpolación realizada para los mapas de SMR y Beta – alfa.

La diferencia entre los mapas de remoción en masa y los obtenidos en este estudio se refiere a los datos tomados in-situ del lugar, donde a lo largo de la Península de Hualpén, se realizaron 20 estaciones geomecánicas, de las cuales se descartaron taludes con datos atípicos. La principal razón de ello es la presencia de fallas dentro de la Península de Hualpén, es por lo anterior, que se utilizaron un total de 15 estaciones geomecánicas para el estudio pertinente, con la finalidad de obtener un resultado más certero a la hora de realizar las interpolaciones dentro de la Península de Hualpén.

Por otro lado, la clara diferencia que presentan los mapas de interpolación de SMR y Beta – alfa, corresponde a los resultados en el área de estudio, donde este último señala un mayor riesgo de inestabilidad de taludes del borde costero, como también un bajo nivel de riesgo para toda el área, mientras que el primero señala un mayor riesgo de inestabilidad de taludes en el borde costero, pero señala un peligro medio en toda la demás área estudiada.

5. CONCLUSIONES

El presente estudio se realizó mediante las metodologías de clasificación de RMR (Rock Mass Rating) (Bieniawski, 1989), SMR (Slope Mass Rating) (Romana, 1985), Q de Barton (Barton et al. 1974), Qslope (Bar & Barton, 2017) y análisis cinemático. Sumado a que se utilizó un ángulo de rozamiento interno de 30° debido a la composición de la roca que corresponde a un monzogranito de biotita y un peso específico de 27 kN/m³ según Goodman (1976), es posible concluir que:

En función al análisis cinemático, se descubrió que existe cinco familias de discontinuidades que se repite a lo largo del área de estudio, como se puede apreciar en la figura 31, que corresponde al estereograma de los siete taludes de roca seleccionados en el área de estudio.

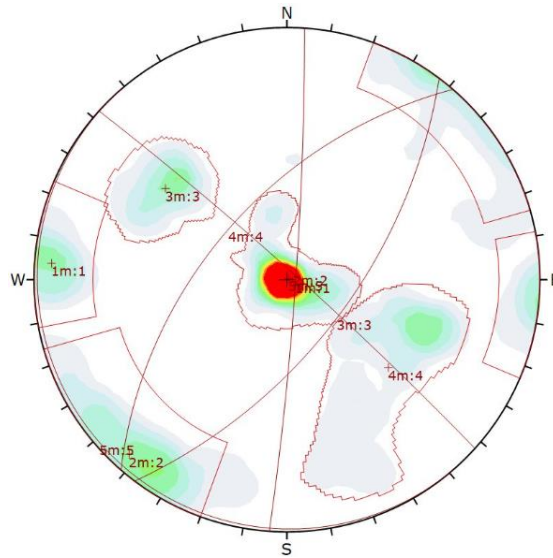


Figura 27: Estereograma área de estudio.

Con los valores obtenidos a través de la interpolación de datos, tanto para el área de estudio como para la Península de Hualpén, en función a las metodologías de clasificación de macizos rocosos estudiadas como lo son RMR (Rock Mass Rating) (Bieniawski, 1989), Q de Barton (Barton et al. 1974), SMR (Slope Mass Rating) (Romana, 1985) y Q slope (Bar & Barton, 2017), comparado con la recopilación de mapas de remoción en masa y lo visto in-situ, se desprende que la zona de estudio posee una alta inestabilidad de sus taludes, representando una amenaza clara para quienes transitan diariamente por ella. Además, si a eso le sumamos los factores detonantes continuos que se presentan en la Península de Hualpén, como lo son las lluvias y la erosión constante producida por el mar, es muy probable que exista algún desprendimiento de roca en los macizos rocosos, generando un peligro latente diario para la comunidad. Es por ello que un punto importante es dar a conocer realmente los problemas que afectan a la comunidad de la Península de Hualpén y como abordar estos mismos para ser una ayuda hacia la comunidad.

Por lo anterior y la clasificación de los parámetros geotécnicos expuestos, es posible recomendar los pasos a seguir con la finalidad de que haya una mejora sustancial a la hora de enfrentar esta problemática:

- La elaboración de redes de drenaje, permitiendo así que la estabilidad de los taludes de la península de Hualpén no se vea perjudicada por la acción del agua.
- La implementación de mejoras geomecánicas para la ayuda de la estabilidad de los taludes dentro de la península de Hualpén, como lo son las mallas dinámicas, mallas vegetales, entre otros.
- Presentar un mayor énfasis en la calidad de la ruta dentro de la Península de Hualpén sin dejar al margen las que se encuentran más a la costa, debido a que, si se presenta una caída de algún talud, dejaría incomunicada a los habitantes del lugar.
- Elaboración de señaléticas de peligro dentro de la Península de Hualpén, con el fin de dar información a quienes transitan diariamente, como también a los visitantes que transitan con fines recreativos.
- Charlas educativas para la comunidad, tanto para personas que habitan en la Península de Hualpén, como también visitantes que transitan con fines recreativos, con el fin de orientar a la comunidad a la hora de enfrentar una situación de peligro.

6. REFERENCIAS

- Bar, N & Barton, N (2017). *The Q-slope method for rock slope engineering*. Rock Mechanics and Rock Engineering, Volumen 50, Issue 12. Pp. 3307-3322
- Barton, N.R., Lien, R. and Lunde, J. (1974). *Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support*. Rock Mech. 6(4), 189-23.
- Bieniawski, Z.T. (1989). *Engineering Rock Mass Clasifications: A complete Manual for Engineers and Geologist in Mining, Civil, and Petroleum Engineering*. Canada: John Wiley & Sons.
- Campo II, 2009. *Mapa geológico del sector costero provincia de Concepción*. Universidad de Concepción.
- Celada, B. Tardáguila, I., Rodríguez, A. Verona, P. y Bieniawski, Z.T (2014). *Actualización y mejora del RMR*. Ingeopres, (234), 18-22.
- Contreras, N. (2017). *Análisis post terremoto 2010 de la zonificación y estratificación de las comunas de Talcahuano y Hualpén*. Universidad del Bío-Bío, Facultad de Ingeniería.
- Cruden, D., Varnes, D. (1996). *Landslide types and processes*. En: *Landslides Investigation and Mitigation*. Special Report 247. Transportation Research Board, National Research Council. National Academy Press. Washington D.C.
- Deere, D.U., and D.W. Deere (1989). *The RQD index in practice proc. Sump rock classif. Eng. Prup.*, ASTM Special technical publication 984.
- Goodman R.E. (1976). *Methods of geological engineering*. Est Publishing, San Francisco.
- Hyndman, D., Hyndman, D. (2011). *Natural Hazards and Disasters*, Third Edition.
- Ilabaca, P. (1978). *Transgresión marina reciente en el litoral de Concepción: Antecedentes morfológicos*. In: Actas Seminario/Taller Desarrollo e Investigación de los recursos marinos de la Octava Región, Chile. págs. 31-40.
- Instituto Nacional de Estadísticas (INE). (2019). *Ciudades, Pueblos, Aldeas y caseríos 2017*.
- ISRM. (1978). *Suggest methods*. Int. Jour Rock Mech. And Min.Sci y geomech. Abs Pergamon Press.
- Miller, R.P. (1965). *Thesis*, Univ. Illinois.
- Municipalidad de Hualpén, 2018. *Plan regulador comunal de Hualpén*.
- Naranjo, J., Clavero, J., Hauser, A., Ramírez, P., (2005). *Informe geológico sobre las remociones en masa causadas por las lluvias torrenciales de los días 26 y 27 de junio 2005 en Concepción, VIII Región*. Subdirección Nacional de Geología, Servicio Nacional de Geología y Minería.
- Naranjo, J., Arenas, M., Ramirez, P., (2006). *Remociones en masa causadas por las precipitaciones de los días 9 al 11 de julio de 2006, en algunos sectores de la provincia de Concepción*. Subdirección Nacional de Geología, Servicio Nacional de Geología y Minería.
- Palmström, A (1982). *The volumetric joint count-a useful and simple measure of the Degree of rock jointing*. En Proceeding 4th International Congress. International Association of Engineering Geology.
- Quezada, J., Cecione, A., Esterio, H., Pineda, V., (1997). *Geología urbana de Talcahuano*. Departamento de Ciencias Geológicas, Universidad Católica del Norte.
- Rodríguez, J.A. (2007). *Caracterización de macizos rocosos*. Universidad de Oviedo.
- Romana, M. (1985). *New adjustment ratings for application of Bieniawski classification to slopes*. En Int. Symp. On the role of rock mechanics ISRM. Zacatecas. Pp 49-53.
- Romana, M. (1997). *El papel de las clasificaciones geomecánicas en el estudio de la estabilidad de taludes*. En: IV Simposio Nacional sobre taludes y laderas inestables. Comunicaciones, 3: 995-1011.

- SERNAGEOMIN. (2019). *Evaluación de remoción en masa en Parque Pedro del Río Zañartu*, comuna de Hualpén, región del Biobío.
- Tarbuck, E., & Lutgens, L. (2010). *Ciencias de la tierra: introducción a la geología física*. (8° ed). España: Pearson Educación.
- Torres, C. (2018). *Elementos para el diseño de un plan de Gestión Ambiental en el Santuario de la Naturaleza Península de Hualpén*. Facultad de Ciencias Ambientales, Universidad de Concepción.
- Vásquez, D. (2013). *Metodología para delimitación y zonificación de humedales costeros tipo mediterráneo*.
- Vásquez, P. (2001). *Petrología y geotermobarometría del Basamento Metamórfico de la cordillera de la Costa de Chile, entre los 36°30' y 38°00' latitud Sur*. Universidad de
- Wiczorek, G. (1996). *Landslides types and processes*. Landslides. Investigation and Mitigation (Turner, A.K.: Schuster, R.L: editors). Transportation Research Board National Research Council: 76-90. Washington.
- Wyllie, D. (2017). *Rock Slope Engineering: civil application*. Boca Ratón, Estados Unidos: Taylor & Francis, CRS Press.