



**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS
GEOLOGÍA**

**GEOLOGÍA Y PRINCIPALES PELIGROS
GEOLÓGICOS DE LA PENÍNSULA DE COLIUMO,
COMUNA DE TOMÉ, REGIÓN DEL BIOBÍO.**

Memoria para optar al Título de Geólogo

Erwin Boris Hödl Cruzat

Profesor Guía: MSc. Abraham Elías Gonzalez Martinez

Profesor Co-Guía: Sr. Alberto Nicolás Sanhueza Andrade

Profesor Comisión: Sr. Ramiro Ulises Bonilla Parra

Concepción, 2024

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a todas las personas que han hecho posible la confección de esta Memoria, primero que todo a mi profesor guía Abraham González Martínez y profesional co-guía Alberto Nicolas Sanhueza Andrade que me han brindado apoyo y consejo siempre que lo he necesitado, también a aquellos que conforman la comisión Ramiro Ulises Bonilla Parra, y además de otros docentes del Departamento de Geología de la Universidad de Concepción, que han tenido muy buena disposición a responder mis inquietudes y me han facilitado gran cantidad de material indispensable para el desarrollo de esta Memoria. También doy gracias a la disponibilidad y buena voluntad de Iván Arévalo y Andres Parra por conformar mi indispensable e incansable equipo de trabajo en terreno sin esperar nada a cambio. De igual manera mi amigo Eduardo Salgado, que con su amistad y consejo hizo ameno mi tiempo en la Universidad. Finalmente, por supuesto, no puedo dejar de agradecer al apoyo más importante en este proceso, aquel que me ha brindado mi familia madre, padre, y hermano quienes siempre han mostrado mucha preocupación no solo por mi desarrollo como profesional, sino también como persona.

TABLA DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS	1
INDICE DE FIGURAS	1
RESUMEN	1
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Objetivos	1
1.1.1 Objetivo general	1
1.1.2 Objetivos específicos.....	1
1.2 Ubicación y accesos del área de estudio	2
1.3 Metodología	3
1.3.1 Etapa de recopilación y estudio bibliográfico:	3
1.3.2 Etapa de Terreno	3
1.3.3 Etapa de Análisis y Procesamiento de Datos	4
1.4 Clima.....	5
1.5 Flora y fauna	5
2. GEOMORFOLOGÍA	6
3. ROCAS METAMÓRFICAS	10
4. ROCAS IGNEAS	11
5. ROCAS SEDIMENTARIAS.....	12
6. GEOLOGÍA ESTRUCTURAL.....	16
7. PELIGROS GEOLÓGICOS	18
7.1. Remociones en masa	18
7.2. Peligro y exposición de tsunamis.....	34
8. RESULTADOS Y CONCLUSIONES	36
9. REFERENCIAS	38
10. ANEXO	41
10.1 Tabla de historial de tsunamis en Chile.....	42
10.2 Mapas y perfiles (Tamaño A0).....	44

INDICE DE FIGURAS

Fig. 1: Imagen satelital del acceso al área de estudio.	2
Fig. 2: Imagen satelital ruta y puntos realizados en terreno.	3
Fig. 3: Foto del camino de afloramientos costeros recorridos en terreno.	4
Fig. 4: Imagen satelital con perfil de elevación con exageración vertical.	7
Fig. 5: Foto de acantilado costero dividido por quebrada, sector NNO de la península.	7
Fig. 6: Foto de arco en el punto 12, Noroeste de la península.	8
Fig. 7: Foto de cueva en el punto 13 al Noroeste de la península.	8
Fig. 8: Foto de plataforma de abrasión, punto 1 sector sureste del área de estudio.	9
Fig. 9: Foto de contacto entre rocas metamórficas y Fm Quiriquina, (Punto 17).	10
Fig. 10: Foto de filitas aflorando al noreste del área, (Punto 6).	10
Fig. 11: Foto de intrusivo tonalítico del BCS costa norte de la península, (Punto 11).	11
Fig. 12: Foto de fragmento de Baculites sur de Playa Blanca (Punto 16).	12
Fig. 13: Foto de afloramiento de Fm Curanilahue, sureste del área de estudio, (Punto 1). .	13
Fig. 14: Foto del afloramiento de la unidad clástica de terrazas litorales, (Punto 10).	14
Fig. 15: Foto de conglomerado polimíctico en la base de la secuencia. (Punto 10).	14
Fig. 16: Foto de niveles de arenas titaníferas en Playa Blanca (Punto 14).	15
Fig. 17: Perfiles realizados a partir de la información obtenida en terreno.	17
Fig. 18: Escala de comparación utilizada (Via ArcGeek.com)	18
Fig. 19: Mapa clasificado del factor “Pendiente”	20
Fig. 20: Mapa clasificado del factor “Distancia a fallas”.	22
Fig. 21: Mapa clasificados del factor "Litología".	24
Fig. 22: Mapa clasificado del factor “Orientación de pendiente”.	26
Fig. 23: Mapa clasificado del factor “Distancia a redes de drenaje.”	28
Fig. 24: Mapa clasificado del factor “Uso de suelo”	30
Fig. 25: Mapa de susceptibilidad de remociones en masa de la península de Coliumo.	33
Fig. 26: Clasificación de los tsunamis.	34
Fig. 27: Mapa de peligro de tsunami.	35
Fig. 28: Exposición a peligro de tsunami de la red vial del sector este de la península.	37
Fig. 29: Exposición importante de un tramo del camino a peligro de remoción en masa.	37

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Matriz AHP de clases del factor "Pendiente"	19
Tabla 2: Índice de consistencia "Pendiente"	19
Tabla 3: Pesos normalizados de las clases del factor "Pendiente"	19
Tabla 4: Matriz AHP de clases del factor "Distancia a fallas"	21
Tabla 5: Índice de consistencia "Distancia a fallas"	21
Tabla 6: Pesos normalizados de las clases del factor "Distancia a fallas"	21
Tabla 7: Matriz AHP de clases del factor "Litología"	23
Tabla 8: Índice de consistencia "Litología"	23
Tabla 9: Pesos normalizados de las clases del factor "Litología"	23
Tabla 10: Matriz AHP de clases del factor "Orientación de pendientes"	25
Tabla 11: Índice de consistencia "Orientación de pendientes"	25
Tabla 12: Pesos normalizados de las clases del factor "Orientación de pendientes"	25
Tabla 13: Matriz AHP de clases del factor "Distancia a redes de drenaje"	27
Tabla 14: Índice de consistencia "Distancia a redes de drenaje"	27
Tabla 15: Pesos normalizados de las clases del factor "Distancia a redes de drenaje"	27
Tabla 16: Matriz AHP de clases del factor "Uso de suelo"	29
Tabla 17: Índice de consistencia de "Uso de suelo"	29
Tabla 18: Pesos normalizados de las clases del factor "Uso de suelo"	29
Tabla 19: Matriz general de factores	31
Tabla 20: Índice de consistencia matriz general	31
Tabla 21: Pesos normalizados de los factores causantes	31

RESUMEN

Este trabajo se centra en el levantamiento geológico de la península de Coliumo y en el análisis de los peligros geológicos del área, específicamente remociones en masa y tsunamis. Coliumo presenta una serie de características que tornan estos dos importantes riesgos geológicos de la región en una problemática a resolver. Coliumo es una península costera de aproximadamente 4,5 kilómetros de largo y 1,7 de ancho; su disposición relativamente paralela al continente genera en su cara oriental un profundo embahamiento con playas y roqueríos tranquilos con vistas a los importantes balnearios de Dichato y Pingueral; en su cara occidental la topografía es mucho más elevada y presenta empinados acantilados de roca intrusiva que otorgan una panorámica espectacular del océano pacífico. Sus atractivos paisajes y con la importante urbe regional de Tomé a menos de 10 minutos en automóvil convierten a Coliumo en un destino cada vez más demandado, recibiendo regularmente no solo nuevos habitantes que han encontrado en la belleza de Coliumo un lugar para hacer su residencia, también encontramos nuevas y crecientes actividades económicas de cabañas, restaurantes y mini-markets que se sustentan de la comunidad local y turistas. Sin embargo, a pesar de la creciente urbanización la zona se encuentra geológicamente subestudiada y la única conexión que tiene la península con el resto del continente es un único y estrecho camino que la recorre en forma de circuito. Esto significa que cualquier traslado interno en caso de emergencia, como por ejemplo una evacuación hacia el continente, queda sujeto a un punto único de fallo. La problemática por responder entonces es la siguiente: ¿De qué manera los peligros geológicos de la región amenazan a la península de Coliumo? Para responder a esto en el contexto de remociones en masa se aplicó una metodología AHP (Analytic Hierarchy Process) utilizando matrices multifactoriales ponderadas inspirados en Saaty (2008), Basharat (2016) y Kayastha (2013). Los resultados de la metodología revelaron que un tramo del camino de aproximadamente 1 km de largo al sureste del área de estudio se encuentra expuesto a peligro muy alto de remociones en masa. Para evaluar el peligro de tsunami se utilizó una metodología estadística que toma en cuenta todos los tsunamis registrados en Chile según la base de datos “*Global Historical Tsunami Database*” y se les asignó una peligrosidad a rangos de altura según recurrencia histórica. El resultado de esta metodología muestra la mayoría del camino de costa Este de la península se encuentra expuesto a peligro de tsunami medio y alto, además de ciertas áreas pobladas. Trabajando en conjunto con la Municipalidad de Tomé se espera que este documento represente una contribución al conocimiento geológico de la zona y a la seguridad de sus residentes y visitantes.

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo general

El objetivo general de esta memoria es realizar un levantamiento geológico de la península de Coliumo y utilizar esta información para analizar de qué manera los principales peligros geológicos del sector, específicamente remociones en masa y tsunami, exponen sectores del área de estudio.

1.1.2 Objetivos específicos

- Llevar a cabo un trabajo de campo para identificar y clasificar las rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias presentes en el sector, así como la relación estructural entre ellas.
- Realizar un mapa geológico con la información obtenida en terreno, haciendo uso de software de mapeo y ayuda de información satelital.
- Realizar perfiles en la zona integrando la información geológica, estructural del terreno y bibliográfica para lograr un mejor entendimiento de la disposición de las litologías en el área de estudio.
- Elaborar un mapa de susceptibilidad de remociones en masa en la península.
- Elaborar un mapa de peligro de tsunami en el área de estudio.
- Generar un documento gráfico que integre el mapa geológico, los perfiles, y los mapas de susceptibilidad de remoción en masa y peligro de tsunami.

1.2 Ubicación y accesos del área de estudio

El área de estudio se localiza en la península de Coliumo, entre las coordenadas $36^{\circ}30'25,0''$ - $36^{\circ}58'9,8''$ S y $72^{\circ}59'19,0''$ - $72^{\circ}56'56,1''$ W aproximadamente. Coliumo es una pequeña península situada en la provincia de Concepción, Región del Biobío, que cierra por el oeste la Bahía de Coliumo. Se encuentra a una distancia de 10 kilómetros de Tomé y 39 km al norte de Concepción. Para acceder al área de estudio desde la ciudad de Tomé, se debe tomar el camino N-14-O en dirección a Dichato y, posteriormente, tomar el desvío O-252 a la izquierda que conduce a la localidad de Coliumo (Fig. 1).

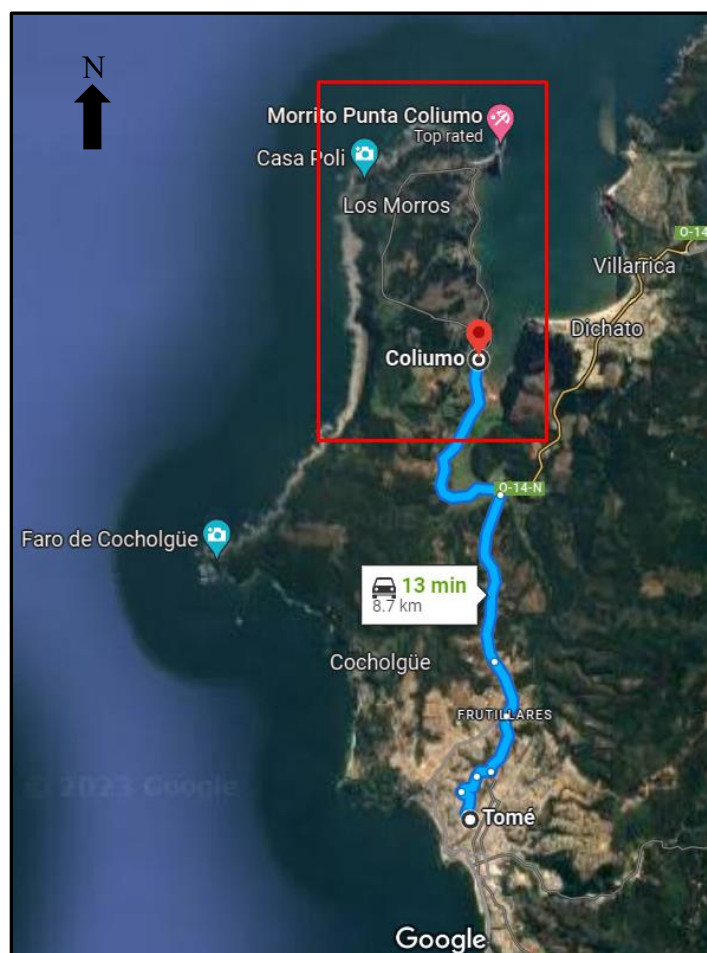


Fig. 1: Imagen satelital del acceso al área de estudio.

1.3 Metodología

1.3.1 Etapa de recopilación y estudio bibliográfico:

En esta fase inicial, se realizó una revisión de la literatura disponible relacionada con la geología de la península de Coliumo y sus alrededores. Se consultaron publicaciones científicas, informes geológicos previos, tesis y otros documentos que ofrecieran información relevante para el estudio. Esta revisión permitió establecer un marco teórico y contextualizar el trabajo de terreno y post terreno alrededor de los objetivos establecidos.

1.3.2 Etapa de Terreno

El trabajo de campo se llevó a cabo en 6 días continuos, del 7 al 12 de octubre 2023, en la península de Coliumo. Durante este período, se establecieron 18 puntos de estudio y se recorrió prácticamente toda la costa. El alojamiento directamente en la península facilitó este acceso extensivo. La costa resultó ser la zona de mayor interés geológico debido a la presencia de los mejores afloramientos, mientras que el suelo reciente en el centro de la península oculta los afloramientos más interiores. Durante el trabajo de campo, se emplearon herramientas de GPS, lupa, rayador, brújula y martillo geológico para documentar observaciones y tomar muestras adecuadas de rocas y sedimentos. Cabe agregar que los fósiles encontrados NO se extrajeron y solo fueron observados y fotografiados in situ.

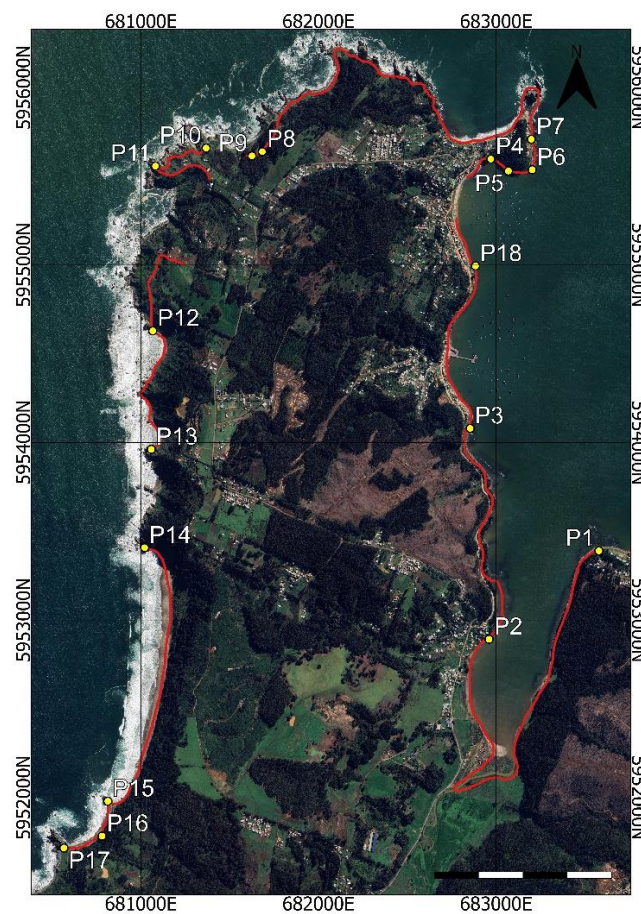


Fig. 2: Imagen satelital ruta y puntos realizados en terreno.

1.3.3 Etapa de Análisis y Procesamiento de Datos

Tras concluir el trabajo de campo, se procedió al análisis y procesamiento de los datos recolectados. Se interpretaron las observaciones de campo y se utilizó software especializado para la elaboración de un mapa geológico y dos perfiles. Los resultados de esta etapa permitieron la identificación y caracterización de las unidades geológicas que afloran en el sector.

Esta información también se utilizó para la elaboración de mapas especializados de susceptibilidad de remoción en masa y peligro de tsunami cuyas metodologías específicas se explican en sus secciones respectivas.



Fig. 3: Foto del camino de afloramientos costeros recorridos en terreno.

1.4 Clima

Según Díaz y otros (2018), la latitud a la cual se encuentra la Región del Biobío permite designarla como una zona climática de transición entre el clima mediterráneo y clima templado húmedo. Coliumo, al ser una localidad costera, se ubica a merced de factores como el Ciclón del Pacífico Sur, que se sitúa entre los 20° y 40° de latitud S, determinando una fuerte influencia marítima. Esta influencia se traduce en precipitaciones más constantes a lo largo del año, con una distribución más homogénea en las estaciones. Las temperaturas tienden a ser más moderadas debido a la proximidad del océano, con veranos frescos e inviernos suaves. Esta condición marítima también genera una mayor humedad y salinidad relativa en la zona, lo que puede influir en la erosión de las formaciones rocosas y estructuras antropogénicas.

1.5 Flora y fauna

La flora de Coliumo está predominantemente compuesta por matorrales como boldos (*Peumus boldus*), litres (*Lithraea caustica*), peumos (*Cryptocarya alba*), maquis (*Aristotelia chilensis*) y laureles (*Laurelia sempervirens*). Las plantaciones de Pino radiata con fines comerciales también se han expandido en la zona, reduciendo las especies endémicas. A lo largo de la península, se pueden encontrar arbustos comestibles como la murtilla (*Ugni molinae*) y zarzaparrilla (*Smilax aspera*). Además, diversas enredaderas, como el copihue (*Lapageria rosea*), coille (*Lardizabala biternata*) y boqui (*Campsidium valdivianum*), se pueden encontrar alrededor de árboles autóctonos principalmente. Otras especies presentes en la región incluyen el natre (*Solanum crispum*), culén (*Psoralea glandulosa*), palo negro (*Leptocarpha rivularis*), zarzamora (*Rubus ulmifolius*) y retamillo (*Genista monspessulana*). En las laderas costeras, el cardón o chagual (*Puya chilensis*) destaca con sus flores amarillas, mientras que, en áreas más cercanas al mar, crecen incluso cactus, docas (*Carpobrotus chilensis*) y chupones (*Greigia sphacelata*). Las áreas húmedas albergan chilcos (*Fuchsia magellanica*), helechos y similares.

Respecto a la fauna, según testimonio de lugareños, Coliumo solía ser hogar de diversas especies como zorros (*Lycalopex culpaeus*), chingues (*Conepatus chinga chinga*), güiñas (*Leopardus guigna*), pudús (*Pudu puda*), quiques (*Galictis cuja*), coipos (*Myocastor coypus*) y ratones. Actualmente, solo estos últimos se encuentran con facilidad debido a la modificación del hábitat natural y la caza. La región alberga más de cuarenta especies de aves, como jotes, tiuques (*Milvago chimango*), perdices, zorzales, loicas, entre otras. Por otro lado, la bahía de Coliumo y aguas adyacentes son hogar de diversas especies de peces, incluyendo corvina (*Pogonias courbina*), cazón (*Galeorhinus galeus*), congrio, lenguado y pescada (*Merluccius gayi gayi*). Las aguas también albergan variedades de moluscos, cangrejos, lobos de mar y algas, algunas de las cuales son explotadas comercialmente. Sin embargo, es importante mencionar que algunas especies han disminuido debido a la sobreexplotación y contaminación.

2. GEOMORFOLOGÍA

De las grandes unidades geomorfológicas regionales sólo las planicies litorales se expresan dentro del área de estudio. El sector se distingue por las pronunciadas pendientes y acantilados costeros al norte y al oeste de la península. Por el otro lado, en la bahía que da al continente y sector oriental del área de estudio, las cotas decrecen de manera mucho más gradual en dirección Este (Fig. 4), terminando finalmente en playas, roqueríos, y plataformas de abrasión a nivel del mar. La topografía singular de Coliumo provoca una divisoria de aguas con redes de drenaje largas y que adoptan un patrón dendrítico hacia el Este; y cortas y abruptas al oeste. Estas redes cumplen un papel notable en los procesos meteorización y sedimentación de la península, contribuyendo a la generación de formas de relieve como quebradas y playas.

Al norte y por el lado occidental de la península se pueden observar la presencia de rasgos geomorfológicos de menor orden los cuales han afectado de forma parcial o total a las planicies litorales, destacando entre estos la presencia de niveles de terrazas (Cuevas, 2012). En las planicies de las terrazas existen numerosas quebradas que se disponen de manera perpendicular a la costa, dividiendo los acantilados costeros del lugar (Fig.5) y generando en este sector playas pequeñas y rocosas. Al norte y noroeste encontramos también arcos, pilares y cuevas litorales que se generan a raíz de la constante erosión provocada por el mar en rocas con resistencias que varían, generalmente asociado a planos de debilidad que ayudan al colapso y rompimiento de estas. (Fig. 6), (Fig.7). Por la costa del lado occidental y llegando hacia el sur del área de estudio terminan los acantilados de intrusivo y dan lugar a “Playa Blanca”, la playa más grande de la península con casi 2 km de largo.

Por el lado oriental, al extremo Noreste se encuentra el característico “Morro de Coliumo”, una pequeña península secundaria con cotas que llegan a los 50 metros y que protege la distintiva “Playa Coliumo”, siendo esta la de mayor actividad pesquera y turística de la península. Más hacia el sur encontramos al sureste plataformas de abrasión (Fig. 8), también conocidas como plataformas de erosión marina, que se manifiestan en el lugar como una extensa y llana superficie rocosa que se encuentra en la zona intermareal de la costa. Estas plataformas se formaron por la acción erosiva del oleaje sobre la roca costera, especialmente durante las mareas altas y tormentas, cuando las olas tienen mayor energía. La superficie de la plataforma tiende a ser rugosa y puede presentar grietas, hendiduras, y pozas de marea o pequeñas depresiones donde el agua queda atrapada durante la marea baja.

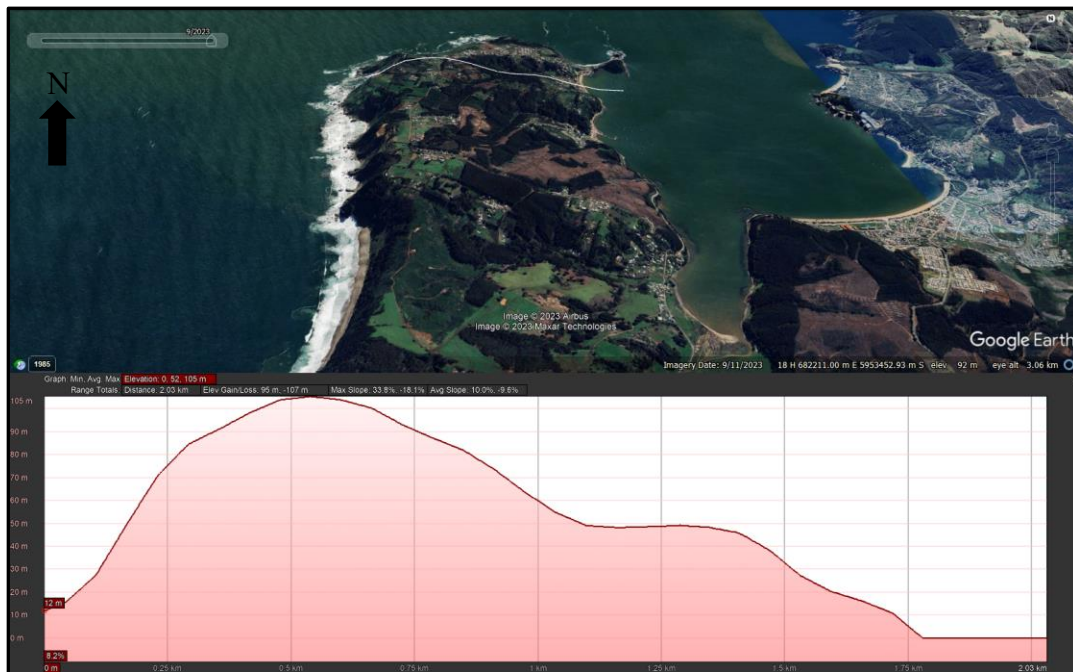


Fig. 4: Imagen satelital con perfil de elevación con exageración vertical. Se observa la disminución de la pendiente de la península Coliumo hacia el E. Obtenido de Google Earth



Fig. 5: Foto de acantilado costero dividido por quebrada, sector NNO de la península.



Fig. 6:Foto de arco en el punto 12, Noroeste de la península.



Fig. 7: Foto de cueva en el punto 13 al Noroeste de la península



Fig. 8: Foto de plataforma de abrasión, punto 1 sector sureste del área de estudio.

3. ROCAS METAMÓRFICAS

Basamento Metamórfico (Carbonífero – Pérmico)

Entre las latitudes 34° y 42°S, en la cordillera de la Costa, el Basamento Metamórfico queda expuesto de manera continua y hacia el este es intruido por el Batolito Costero de Sur del Paleozoico tardío (Veas, 2017). Este complejo se divide en dos series: Occidental y Oriental definidas por Godoy (1970) y Aguirre y otros (1972). Miyashiro (1961) interpreta ambas series como un cinturón metamórfico pareado.

En el área de estudio se encontraron afloramientos de rocas metamórficas que se asociaron como pertenecientes a la serie Oriental del Basamento Metamórfico al sur de Playa Blanca (Punto 15 y 17), también en la zona media de la bahía de Coliumo (Punto 3), y en el “morro” al noreste de la península (Punto 6). Las rocas encontradas se describieron como filitas de coloración negra. Se puede observar al sur de Playa Blanca (Punto 17) (Fig.9) el contacto discordante entre el Basamento Metamórfico y la Formación Quiriquina.



Fig. 9: Foto de contacto entre rocas metamórficas y Fm Quiriquina, (Punto 17).

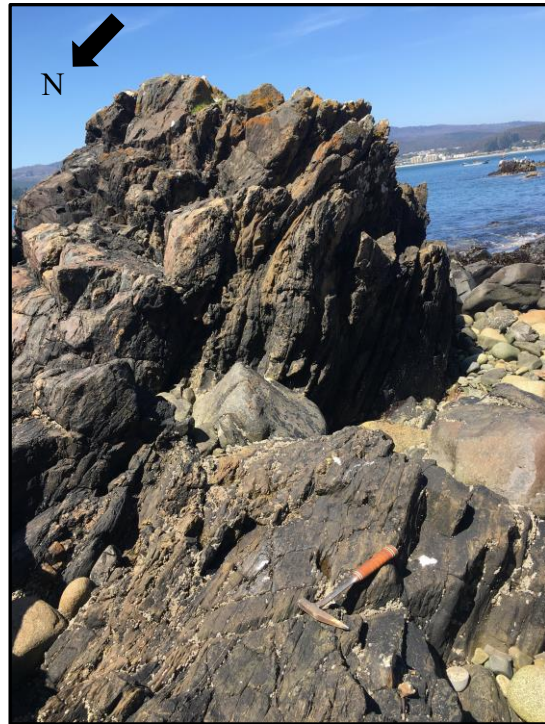


Fig. 10: Foto de filitas aflorando al noreste del área, (Punto 6).

4. ROCAS IGNEAS

Batolito Costero del Sur (Carbonífero - Triásico)

Unidad definida por Hervé y otros (1976) compuesta por granitoides. Incluye las rocas intrusivas paleozoicas existentes en la cordillera de la Costa y aflora en una franja continua de orientación NNE-SSW entre los 32°30' y los 38°S. En la zona estas se encuentran cubiertas por rocas sedimentarias del Cretácico Superior y Paleógeno inferior de las formaciones Quiriquina y Curanilahue, respectivamente, entre los 36° y 37°S (Quezada, 1996) (Creixell, 2001).

En la zona de estudio encontramos este tipo de rocas aflorando en toda la costa norte y la mayoría de la costa oeste hasta llegar a playa blanca donde se infiere un contacto por falla con Fm. Curanilahue (Punto 14). Su composición es casi invariablemente tonalítica con xenolitos de tamaños muy diversos e intruida por diques de composición andesítica y textura hipoabisal.



Fig. 11: Foto de intrusivo tonalítico del BCS aflorando en la costa norte de la península, (Punto 11).

5. ROCAS SEDIMENTARIAS

Formación Quiriquina (Maastrichtiano)

La litología de esta formación, descrita en su localidad tipo, consiste en un conglomerado basal, areniscas amarillas, niveles de coquina y zona de areniscas con concreciones calcáreas (Salazar, 2004). La máxima potencia reconocida es en los afloramientos de su localidad tipo, en Bahía las Tablas, con un espesor de 65m (Salazar, 2004). La edad de esta formación se determinó sobre la base de su contenido fosilífero. Salazar (2004) la restringe al Maastrichtiano Superior. Estas rocas se disponen en inconformidad sobre las rocas metamórficas de la Serie Oriental y del Batolito Costero del Sur e infrayace concordante a la Formación Curanilahue y en paraconformidad a los depósitos del Cuaternario.

En el área de estudio se observó aflorando rocas que se asociaron a esta formación en las plataformas de abrasión al sureste (Puntos 1 y 2) donde se observan areniscas con abundantes bioturbaciones y material vegetal fosilizada. También encontramos afloramientos de Fm Quiriquina al sur de Playa Blanca Puntos (16 y 17), Las rocas que floran en este lugar se lograron distinguir como rocas sedimentarias de colores verdosos y pardos, principalmente areniscas y conglomerados con presencia de concreciones con fósiles distintivos como *cardium* y baculites (Fig. 12), los cuales son característicos de la Formación Quiriquina.



Fig. 12: Foto de fragmento de Baculites observado en concreción, sur de Playa Blanca (Punto 16).

Formación Curanilahue (Eoceno inferior)

La Formación Curanilahue consiste en una secuencia sedimentaria continental, constituida principalmente por areniscas, en parte conglomerádicas y arcillolitas asociadas a mantos carboníferos, con intercalaciones marinas, correspondientes a areniscas verdes fosilíferas (Pineda, 1983). La potencia estimada de esta formación es de 500 m (Muñoz-Cristi, 1968).

En el área de estudio encontramos rocas de secuencias sedimentarias que presentaban areniscas, lutitas y conglomerados, con presencia de niveles carbón, y ramitas. Estas secuencias se asociaron a la Formación Curanilahue. Pudimos encontrar estas rocas al sur de la bahía (Puntos 1) sobreyaciendo el nivel de las plataformas de abrasión aunque no se apreció el contacto (Fig. 13). Además, al norte de la península (Puntos 8 y 9), en cotas más altas se encontraron secuencias de, lutitas y conglomerados, con presencia de hojas fósiles además de ramas y otros vestigios de materia orgánica. Estas rocas también fueron asociadas a esta formación.



Fig. 13: Foto de afloramiento de Fm Curanilahue sobre la ciclovía frente a la bahía, sureste del área de estudio, (Punto 1).

Unidad Clástica de Terrazas Litorales

Unidad no formalmente definida, al norte de la península de Coliumo conformada por un nivel conglomerádico en la base (Fig. 14) seguido de varios estratos de rocas sedimentarias finas variando de areniscas finas a limolitas pobremente consolidadas des colores pardos grisáceos y verdosos. Presentan en algunos niveles estratificación cruzada y laminar. Solo se observaron en el Punto 10 en el sector NNO de la península. Se identifica un manto subhorizontal.



Fig. 15: Foto de conglomerado polimictico matriz-soportado en la base de la secuencia. (Punto 10).



Fig. 14: Foto de vista general del afloramiento de la unidad clástica de terrazas litorales,(Punto 10).

Depósitos litorales

Cabe mencionar brevemente los depósitos litorales presentes en playas de Coliumo notablemente en Playa blanca (Puntos 14,15, y 16) y Playa Coliumo (Puntos 4 y 18) donde se encuentran capas de espesor variable de milimétrico a centimétrico de arenas titaníferas (Fig. 16) con gran contenido de hierro como se pudo comprobar con imanes en terreno.

Corresponden a mantos de arenas negras de granulometría media a fina con alto contenido en minerales pesados como titanomagnetita, magnetita, ilmenita, hematita, esfeno y rutilo, cuya edad es Pleistoceno-Holoceno (Collao y otros, 2000).

Su origen se atribuye principalmente a la meteorización de rocas ígneas portadores de minerales pesados, los que posteriormente son transportados por agentes fluviales, mareales y eólicos, sufriendo la posterior depositación. (Collao y otros, 2000).



Fig. 16: Foto de niveles de arenas titaníferas en Playa Blanca (Punto 14)

6. GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

En el contexto regional, el área de estudio se encuentra en el borde del margen convergente de la placa de Nazca y placa Sudamericana. Las estructuras que afectan las rocas son el resultado de los esfuerzos que se resuelven en la interacción entre ambas placas. Tales esfuerzos no son constantes en el tiempo, varían en dirección e intensidad (Pardo-Casas y Molnar, 1987; Somoza y otros, 1998; Charrier y otros, 2003) y son consecuencia de las condiciones de stress generadas de esta interacción. Las variaciones de este stress responden a cambios en el ángulo y velocidad de convergencia entre las placas, de variaciones del ángulo de subducción tanto en el tiempo como en el espacio, del grado de acople sísmico y de la geometría de la loza oceánica entre otros (Kley y otros, 1999) (Moreno, 2004). La combinación de estos factores a lo largo del tiempo ha generado una historia deformacional muy compleja de estudiar.

A nivel local, en el área de estudio el gran desarrollo de suelo reciente dificulta la observación in situ de índices cinemáticos, sin embargo los cambios litológicos y marcados lineamientos permitieron inferir tres posibles fallas representadas en los perfiles de la Fig. 17, la ubicación de las trazas de estos perfiles se pueden observar en el mapa geológico del área de estudio en el Anexo 10.2, página 44.

La primera es una falla inversa (Fig. 17; falla n°1) al norte del área de estudio donde se encuentra depositada la secuencia de *Unidad clástica de Terrazas litorales*, en este lugar se observó en terreno como estas rocas sedimentarias pleistocenas se encuentran depositadas directamente sobre el intrusivo lo que sugiere que las rocas paleógenas presentes en el resto de la península fueron erosionada en este sector, esto sumado a la gran exposición que tienen los bloques de intrusivo en este lugar (Fig. 12) con respecto al resto de los afloramientos del batolito costero en península sugieren que hubo un alzamiento por falla del bloque norte y que da origen a las observaciones mencionadas. Debido a la completa erosión de Fm. Curanilahue en este lugar y a la edad pleistocena de la *Unidad clástica de Terrazas litorales* se le asocia una actividad oligocena a pleistocena de esta falla.

Más al sur, aproximadamente en el sector medio de la península y cruzándola de lado a lado encontramos un lineamiento SW-NE (Fig. 17; falla n°2). En este punto se observaron en terreno cambios litológicos importantes. Por el oeste en playa blanca a partir de este punto cesan de aflorar las rocas intrusivas del batolito costero y por el este aparecen las rocas cretácicas en las plataformas de abrasión. Esto sumado al marcado descenso en la topografía sugiere la presencia de una falla normal que provoca el descenso del bloque al sur de la falla. Debido a que cortaría las rocas eocenas de Fm Curanilahue se le asocia una edad cenozoica a la actividad de esta falla

La última falla inferida (Fig. 17; falla n°3) se encuentra al sur del área de estudio y en terreno se observó en playa Blanca que en este punto marca la aparición de afloramientos a nivel de superficie de las rocas fosilíferas cretácicas de formación Quiriquina y de rocas del basamento metamórfico esto sugiere que el bloque norte se encuentra más abajo con respecto al bloque sur. Esto sumado al marcado lineamiento E-O permite inferir esta falla presumiblemente normal. Al igual que a la anterior se le atribuye actividad cenozoica.

Finalmente comentar sobre el muy pronunciado lineamiento N-S que sigue el embahiamiento y el estero Coliumo que sugieren la presencia de una estructura pasando por el lugar, sin embargo a ambos lados de la bahía encontramos las plataformas de abrasión a la misma altura y de similar composición de rocas cretácicas descartando preliminarmente un movimiento en la vertical. No se puede descartar una falla de tipo transcurrente en el lugar pero no se encontró en terreno evidencia más que el marcado lineamiento para sugerirla.

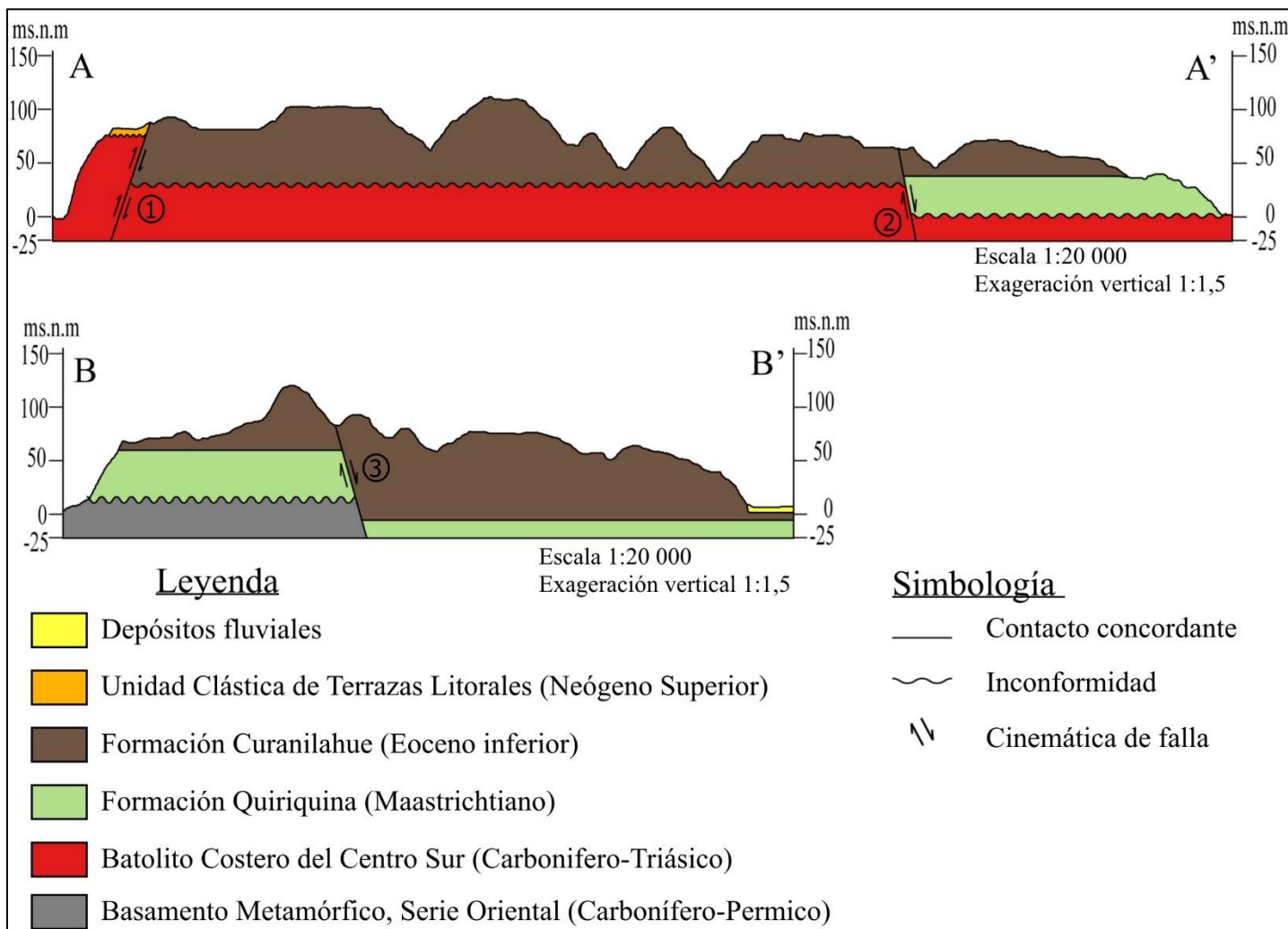


Fig. 17: Perfiles realizados a partir de la información obtenida en terreno, la ubicación de la traza de los perfiles se puede encontrar en el anexo 10.2, página 44. 1-Falla inversa norte; 2-Falla normal sector central; 3-Falla normal sur.

7. PELIGROS GEOLÓGICOS

7.1. Remociones en masa

En esta sección se resume el estudio de susceptibilidad de remociones en masa realizado en la península de Coliumo utilizando el Método Analítico Jerárquico adaptado a la problemática de remociones en masa utilizando GIS inspirado en Basharat (2016) y Kayastha (2013) y empleando un DEM de resolución de 5 metros facilitado por la Municipalidad de Tomé.

El Proceso Analítico Jerárquico (AHP en inglés), es un método semi-cuantitativo en el que se toman decisiones utilizando pesos obtenidos a partir de matrices de comparaciones relativas pareadas. Se ocupó una escala del 1 al 9, y sus recíprocos del 1 al 1/9 (Fig. 18). La ventaja de este método es que mientras la razón de consistencia (CR) esté dentro del rango aceptado (<0.1) posibilita que todos los tipos de información relacionada puedan ser incluidos en el proceso. Esto permitió que las reglas de discusión tomaran en cuenta el conocimiento específico obtenido del área de estudio y a la vez complementar con informaciones y criterios de recopilación bibliográfica, Kayastha (2013) y Basharat (2016).

Para aplicar la metodología primero se comenzó con la descomposición del problema en una jerarquía de elementos más simples, en este caso en factores y sus respectivas clases o subfactores. Los factores causantes considerados en este análisis son: pendiente, distancia a fallas, litología, orientación de las pendientes, distancia a redes de drenaje, y uso de suelo. Luego se utilizó el método AHP para asignar pesos tanto a los factores causantes como a las diferentes clases dentro de cada factor. Esto significa que se creó una matriz general de comparación relativa entre factores y además una serie de matrices internas específicas, una por cada factor, permitiendo la comparación relativa entre sus clases. Para representar esto espacialmente en el área de estudio, se utilizaron herramientas GIS para generar rasters clasificados de los factores que luego se integraron en un raster general que vendría a ser el mapa de susceptibilidad final.



Fig. 18: Escala de comparación utilizada (Via ArcGeek.com)

Pendiente:

Generalmente, los estudios muestran que las pendientes tienen un gran impacto en los deslizamientos de tierra. Por lo tanto, se generó un mapa digital del ángulo de pendiente (Fig. 22) a partir del DEM y se clasificó en cuatro clases diferentes: (1) 0-15°; (2) (15°-30°); (3) (30°-45°), (4) >45° similar a la división y pesos de Basharat (2016).

	C1	C2	C3	C4	Wi	W'i
C1 (0°-15°)	1.00	1/5	1/7	1/2	0.35	0.06
C2 (15°-30°)	5	1.00	1/2	2	1.50	0.28
C3 (30°-45°)	7	2	1.00	5	2.89	0.54
C4 (>45°)	2	1/2	1/5	1.00	0.67	0.12

Tabla 1: Matriz AHP de clases del factor "Pendiente"; Wi: Vector propio; W'i: Vector propio Normalizado.

Ci=	0.00765741	
Rci=	0.99	
CR=	0.0077	Consistente

Tabla 2: Índice de consistencia "Pendiente" (Ci); Índice de consistencia aleatorio "Pendiente" (Rci); Razón de consistencia "Pendiente" (CR)

		PESOS
C1	(0°-15°)	0.06
C2	(15°-30°)	0.28
C3	(30°-45°)	0.54
C4	(>45°)	0.12
		1.00

Tabla 3: Pesos normalizados de las clases del factor "Pendiente".

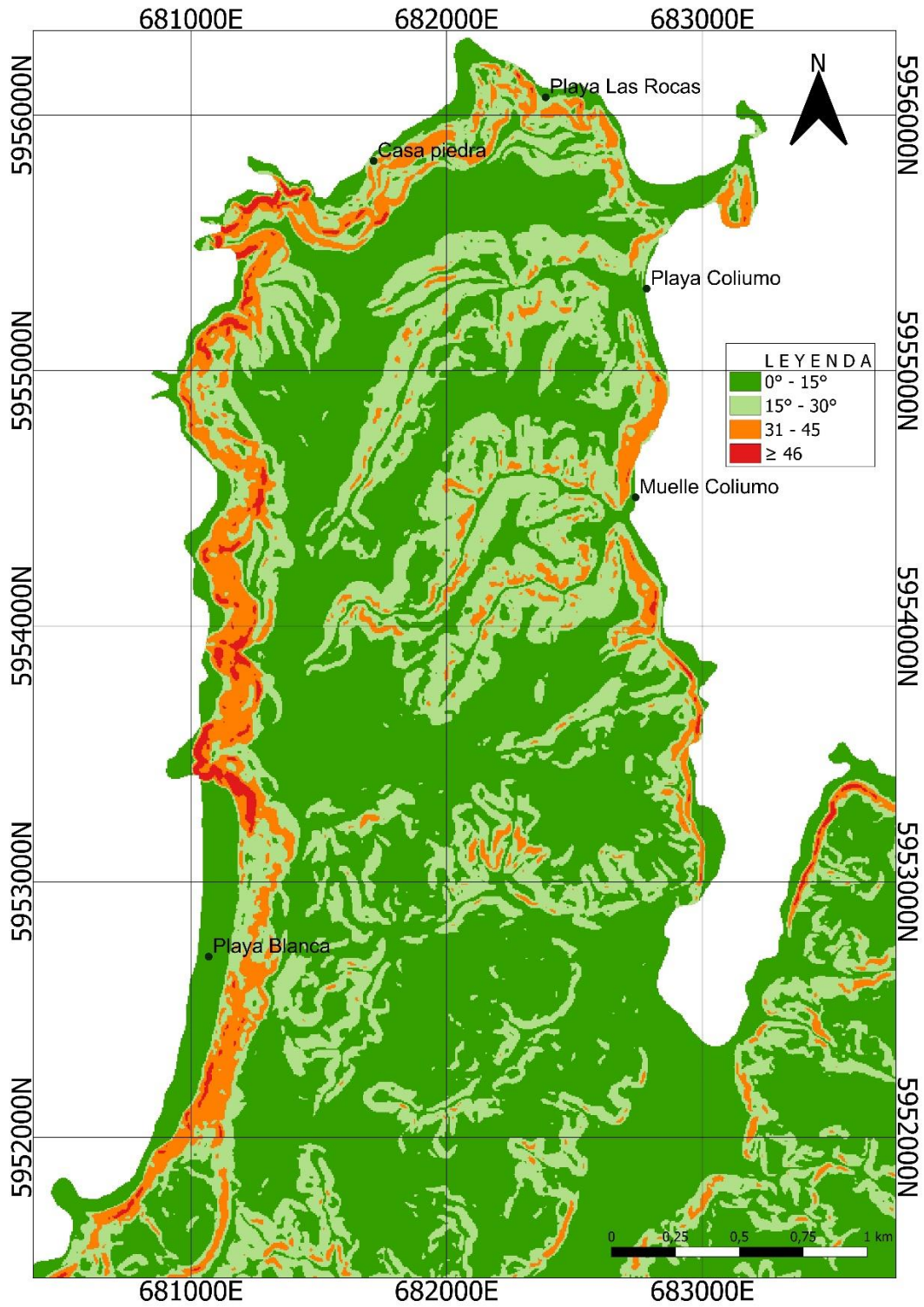


Fig. 19: Mapa clasificado del factor "Pendiente"

Distancia a fallas:

Las fallas activas aumentan la susceptibilidad a deslizamientos de tierra porque las rocas cercanas a una falla son más débiles, (Leir et al., 2004). En este estudio, se preparó un mapa temático digital (Fig. 26) de la distancia a las fallas inferidas utilizando el método de interpolación de Ponderación Inversa por la Distancia (IDW) y se clasificó en tres clases: (1) Cercano (0-100 m), (2) Próximo (100-500 m), y (3) Lejano (>500 m), clasificación similar a Kayastha (2013)

	C1	C2	C3	Wi	Ci
C1 Cercano (<100 m)	1.00	1 1/3	2	1.39	0.44
C2 Próximo(100-500 m)	3/4	1.00	1 1/2	1.04	0.33
C3 Distante (>500 m)	1/2	2/3	1.00	0.69	0.22

Tabla 4: Matriz AHP de clases del factor "Distancia a fallas". Wi: Vector propio; Wi: Vector propio Normalizado.

Ci=	0	
Rci=	0.66	
CR=	0.0000	Consistente

Tabla 5: Índice de consistencia "Distancia a fallas" (Ci);
Índice de consistencia aleatorio "Distancia a fallas" (Rci);
Razón de consistencia "Distancia a fallas" (CR)

		PESOS
C1	Cercano (<100 m)	0.44
C2	Próximo (100-500 m)	0.33
C3	Distante (>500 m)	0.22
		1.00

Tabla 6: Pesos normalizados de las clases del factor "Distancia a fallas"

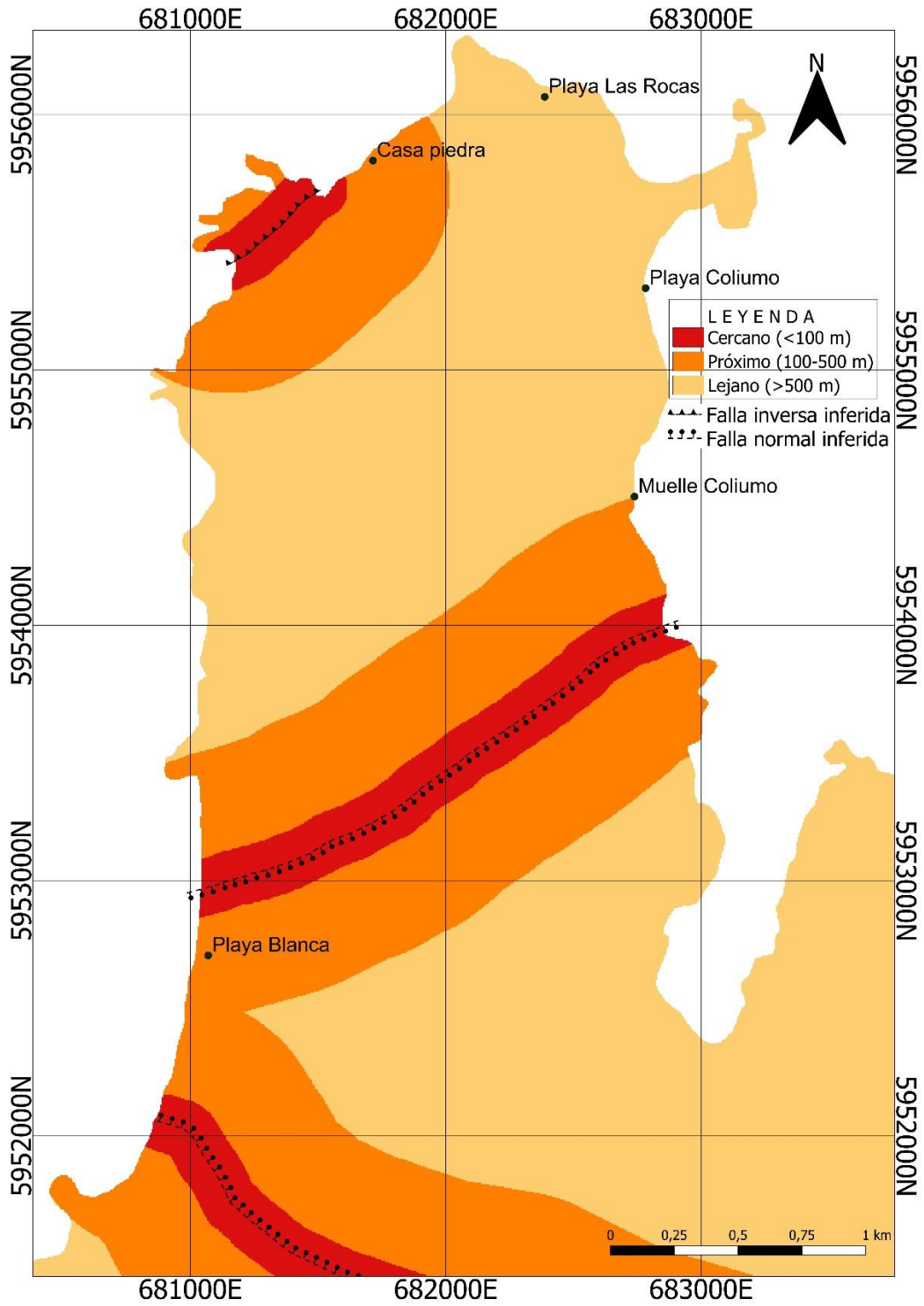


Fig. 20: Mapa clasificado del factor "Distancia a fallas".

Litología

La litología juega un papel importante en la estabilidad de las pendientes. Las clases se dividieron según la geología previamente descrita del área de estudio. Encontramos (1) depósitos cuaternarios litorales, (2) fluviales, y una (6) unidad clástica de terrazas. Con respecto formaciones de se tienen (7) rocas cretácicas (Fm Quiriquina), y (4) eocenas (Fm Curanilahue). Encontramos también rocas (3) ígneas intrusivas como son las rocas del Batolito Costero del Sur y por último rocas (5) metamórficas, particularmente filitas de la serie oriental del basamento metamórfico (Fig. 30). Los pesos fueron asignados y discutidos según las observaciones y experiencia terreno del equipo de trabajo.

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	Wi	Ci
C1 D.Litorales	1.00	3	6	4	7	3	5	3.58	0.34
C2 D.Fluviales	1/3	1.00	6	3	7	1	4	2.08	0.20
C3 Intrusivo	1/6	1/6	1.00	1/6	1/3	1/8	1/5	0.23	0.02
C4 Curanilahue	1/4	1/3	6	1.00	8.00	1/2	5.00	1.39	0.13
C5 Metamórfico	1/7	1/7	3	0.13	1.00	1/9	0.14	0.28	0.03
C6 Terrazas	1/3	1	8	2.00	9.00	1.00	5.00	2.19	0.21
C7 Quiriquina	1/5	1/4	5	0.20	7.00	0.20	1.00	0.68	0.07

Tabla 7: Matriz AHP de clases del factor "Litología". Wi: Vector propio; Wi: Vector propio Normalizado.

Ci=	0.13485022	
Rci=	1.41428571	
CR=	0.0953	Consistente

Tabla 8: Índice de consistencia "Litología" (Ci);
Índice de consistencia aleatorio "Litología" (Rci);
Razón de consistencia "Litología" (CR).

		PESOS
C1	D.Litorales	0.34
C2	D.Fluviales	0.20
C3	Intrusivo	0.02
C4	Curanilahue	0.13
C5	Metamorfico	0.03
C6	Terrazas	0.21
C7	Quiriquina	0.07
		1.00

Tabla 9: Pesos normalizados de las clases del factor "Litología".

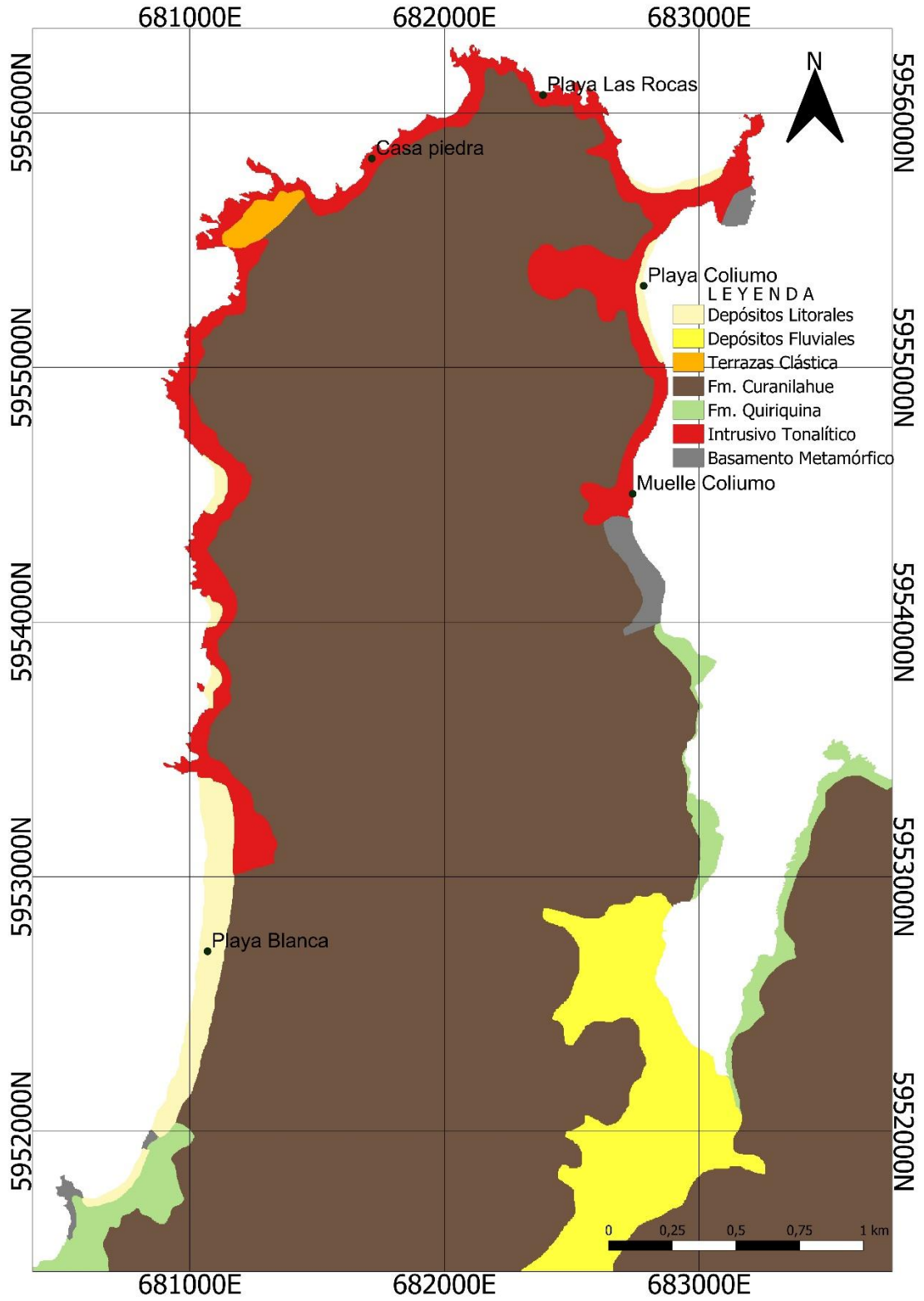


Fig. 21: Mapa clasificados del factor "Litología".

Orientación de pendientes

La orientación de la pendiente es la dirección de la máxima inclinación de la superficie del terreno (Fig. 34). En este estudio, la orientación de la pendiente se dividió en 8 clases: (1) Norte, (2) Noreste, (3) Este, (4) Sureste, (5) Sur, (6) Suroeste, (7) Oeste, (8) Noroeste.

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	Wi	Ci
C1 Norte	1.00	1/4	1/5	1/3	5	5	4	2	1.16	0.09
C2 Noreste	4	1.00	1/4	4	5	6	6	4	2.71	0.22
C3 Este	5	4	1.00	5	8	8	7	6	4.77	0.39
C4 Sureste	3	1/4	1/5	1.00	4	5	5	4	1.67	0.14
C5 Sur	1/5	1/5	1/8	1/4	1.00	1/2	1/3	1/4	0.29	0.02
C6 Suroeste	1/5	1/6	1/8	1/5	2	1.00	1/3	1/3	0.34	0.03
C7 Oeste	1/4	1/6	1/7	1/5	3	3	1.00	1/3	0.49	0.04
C8 Noroeste	1/2	1/4	1/6	1/4	4	3	3	1.00	0.81	0.07

Tabla 10: Matriz AHP de clases del factor "Orientación de pendientes". Wi: Vector propio; Wi: Vector propio Normalizado.

Ci=	0.14651265	
Rci=	1.485	
CR=	0.0987	Consistente

Tabla 11: Índice de consistencia "Orientación de pendientes" (Ci); Índice de consistencia aleatorio "Orientación de pendientes" (Rci); Razón de consistencia "Orientación de pendientes" (CR)

		PESOS
C1	Norte	0.09
C2	Noreste	0.22
C3	Este	0.39
C4	Sureste	0.14
C5	Sur	0.02
C6	Suroeste	0.03
C7	Oeste	0.04
C8	Noroeste	0.07
		1.00

Tabla 12: Pesos normalizados de las clases del factor "Orientación de pendientes"

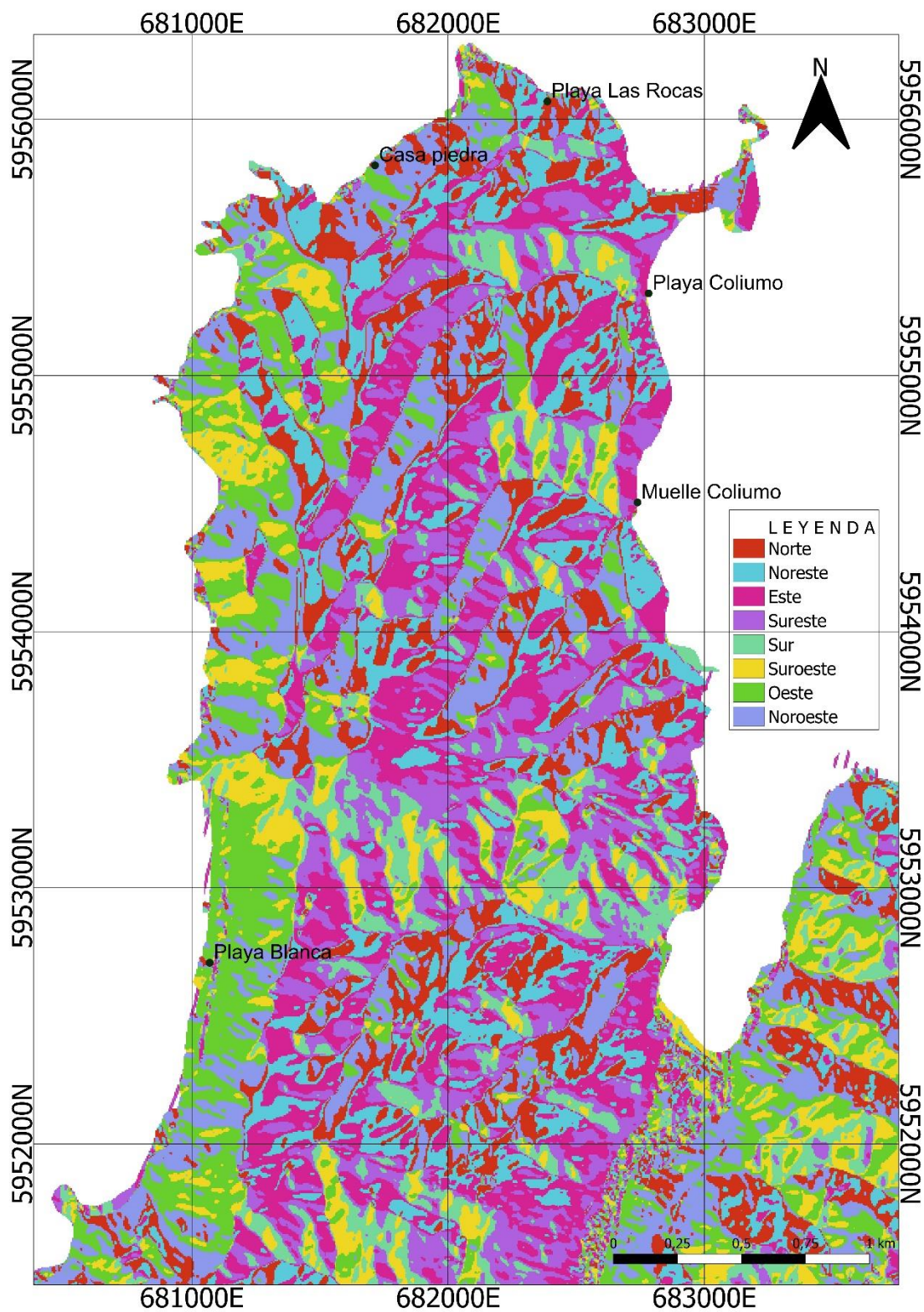


Fig. 22: Mapa clasificado del factor "Orientación de pendiente".

Distancia a redes de drenaje

El escurrimiento es uno de los factores importantes para la inestabilidad de las pendientes. En el área, los deslizamientos de tierra ocurren frecuentemente en quebradas. Con el fin de incorporar la influencia de redes de drenaje en los deslizamientos, se preparó un mapa temático digital de la distancia a los cursos de agua (Fig. 38) utilizando el método de interpolación de Ponderación Inversa por la Distancia (IDW) y se clasificó en tres clases: (1) Cercano (0-100 m), (2) Próximo (100-500 m) y (3) Lejano (>500 m). Similar a Kayastha (2013) y adaptado al área de estudio.

	C1	C2	C3	Wi	Ci
C1 Cerca (<100 m)	1.00	5	7	3.27	0.72
C2 Próximo(100-500 m)	1/5	1.00	4	0.93	0.20
C3 Lejano (>500 m)	1/7	1/4	1.00	0.33	0.07

Tabla 13: Matriz AHP de clases del factor "Distancia a redes de drenaje". W_i : Vector propio; W'_i : Vector propio Normalizado.

Ci=	0.06185664	
Rci=	0.66	
CR=	0.0937	Consistente

Tabla 14: Índice de consistencia "Distancia a redes de drenaje" (Ci); Índice de consistencia aleatorio "Distancia a redes de drenaje" (Rci); Razón de consistencia "Distancia a redes de drenaj

		PESOS
C1	Cerca (<100 m)	0.72
C2	Próximo (100- 500 m)	0.20
C3	Lejano (>500 m)	0.07
		1.00

Tabla 15: Pesos normalizados de las clases del factor "Distancia a redes de drenaje"

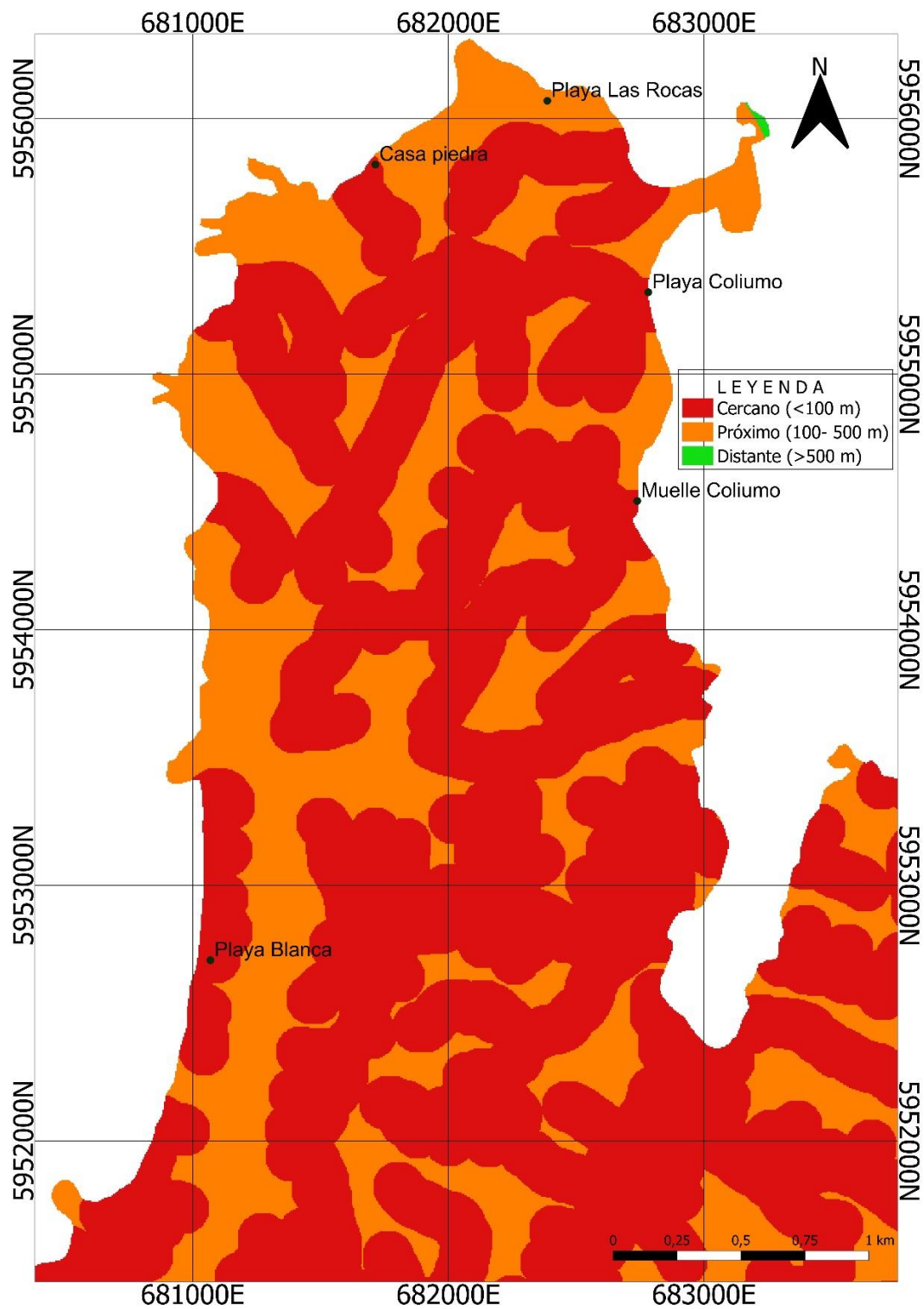


Fig. 23: Mapa clasificado del factor "Distancia a redes de drenaje."

Uso de Suelo

El uso de suelo es un importante factor en la estabilidad de pendientes. Se construyó un mapa de uso de suelo del sector (Fig. 42) utilizando imágenes satelitales e observaciones en terreno y considerando 3 clases: (1) Bosques, (2) Áreas Construidas, y (3) Baja Vegetación y Vegetación estacional.

	C1	C2	C3	Wi	Ci
C1 Bosques	1.00	1/2	1/4	0.50	0.14
C2 Áreas Construidas	2	1.00	1/3	0.87	0.24
C3 Baja Vegetación/Estacional	4	3	1.00	2.29	0.63

Tabla 16: Matriz AHP de clases del factor "Uso de suelo". W_i : Vector propio; W'_i : Vector propio Normalizado.

Ci=	0.00914735	
Rci=	0.66	
CR=	0.0139	Consistente

Tabla 17: Índice de consistencia de "Uso de suelo" (Ci); Índice de consistencia aleatorio de "Uso de suelo" (Rci); Razón de consistencia de "Uso de suelo" (CR)

		PESOS
C1	Bosques	0.14
C2	Áreas construidas	0.24
C3	Baja vegetación/Estacional	0.63
		1.00

Tabla 18: Pesos normalizados de las clases del factor "Uso de suelo"

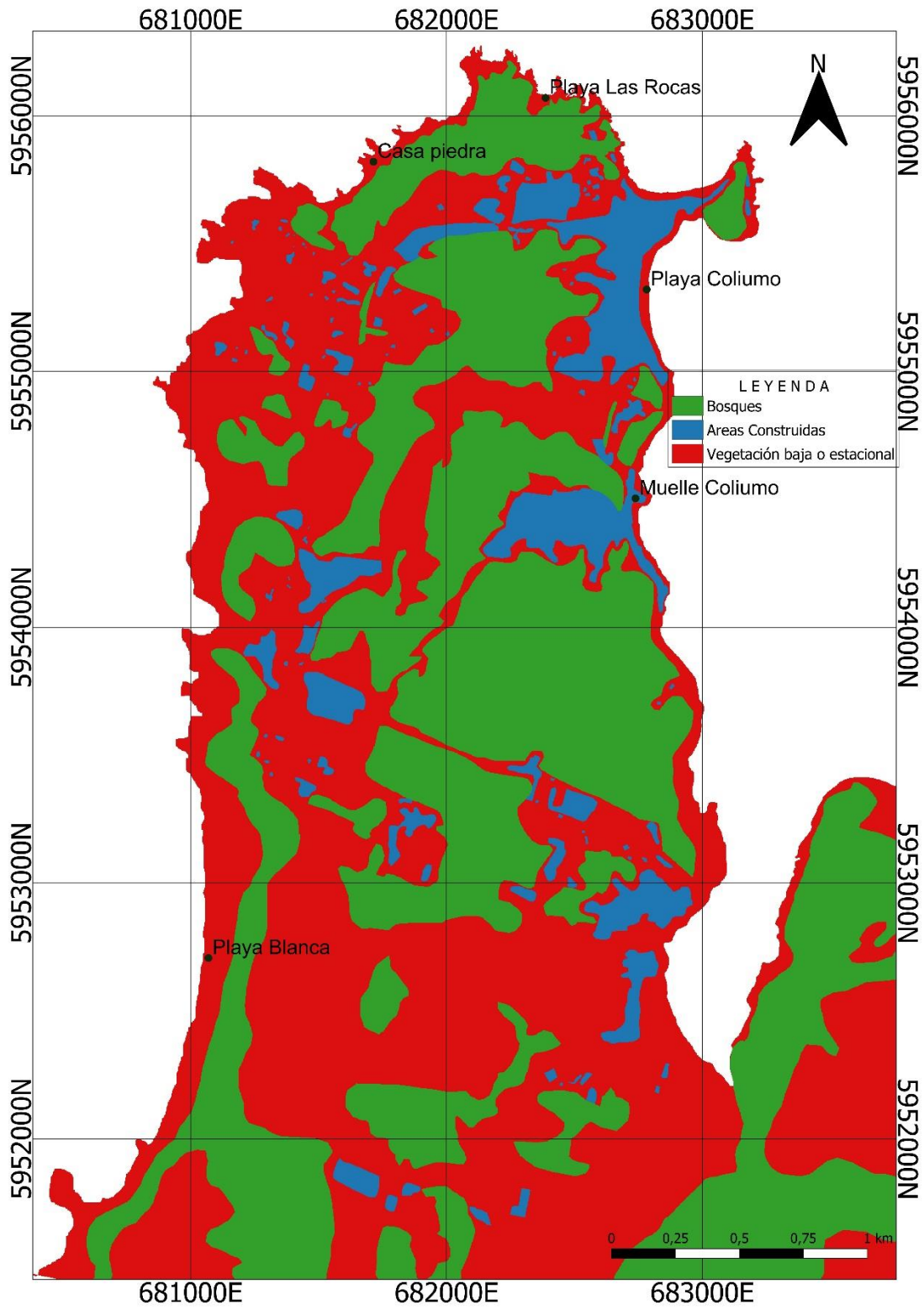


Fig. 24: Mapa clasificado del factor "Uso de suelo"

Mapa final de susceptibilidad

Para generar el mapa de susceptibilidad se requiere la matriz AHP general de los 6 factores causantes vistos anteriormente y determinar los pesos de cada uno en la matriz general:

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	Wi	Ci
C1 Pendiente	1.00	3	3	4	4	5	2.99	0.39
C2 Distancia a falla	1/3	1.00	2	3	3	4	1.70	0.22
C3 Litología	1/3	1/2	1.00	4	2	3	1.26	0.16
C4 Orientación de la pendiente	1/4	1/3	1/4	1.00	1	4	0.66	0.09
C5 Distancia a red de drenaje	1/4	1/3	1/2	1	1.00	4	0.74	0.10
C6 Uso de suelo	1/5	1/4	1/3	1/4	1/4	1.00	0.32	0.04

Tabla 19: Matriz general de factores. Wi: Vector propio; Wi: Vector propio Normalizado.

Ci=	0.07711778	
Rci=	1.32	
CR=	0.0584	Consistente

Tabla 20: Índice de consistencia (Ci);
Índice de consistencia aleatorio de (Rci);
Razón de consistencia (CR)

		PESOS
C1	Pendiente	0.39
C2	Distancia a falla	0.22
C3	Litología	0.16
C4	Orientación de la pendiente	0.09
C5	Distancia a red de drenaje	0.10
C6	Uso de suelo	0.04
		1.00

Tabla 21: Pesos normalizados de los factores causantes.

Finalmente, la integración de los diversos factores causantes y sus clases en un único índice de susceptibilidad a deslizamientos (LSI) se da mediante un procedimiento basado en la suma lineal ponderada.

$$LSI = \sum_{j=1}^n W_j w_{ij}$$

donde W_j es el valor de peso del factor causante j , w_{ij} es el valor de peso de la clase i del factor causante j , y n es el número de factores causantes.

El mapa de LSI resultante (Fig. 46) los valores de LSI varían de 0.0894 a 0.4941. La mayoría de los investigadores utilizan su propia opinión experta para desarrollar límites de clases ya que tampoco existen reglas generales para categorizar automáticamente dichos datos continuos (Ayalew et al., 2004). En este estudio, el mapa de LSI resultante (Fig. 46) dividió simplemente el intervalo mencionado (0.0894 - 0.4941) en 4 clases iguales según su cercanía a los extremos. Obteniendo así las etiquetas finales de Baja, Media, Alta, y Muy alta susceptibilidad.

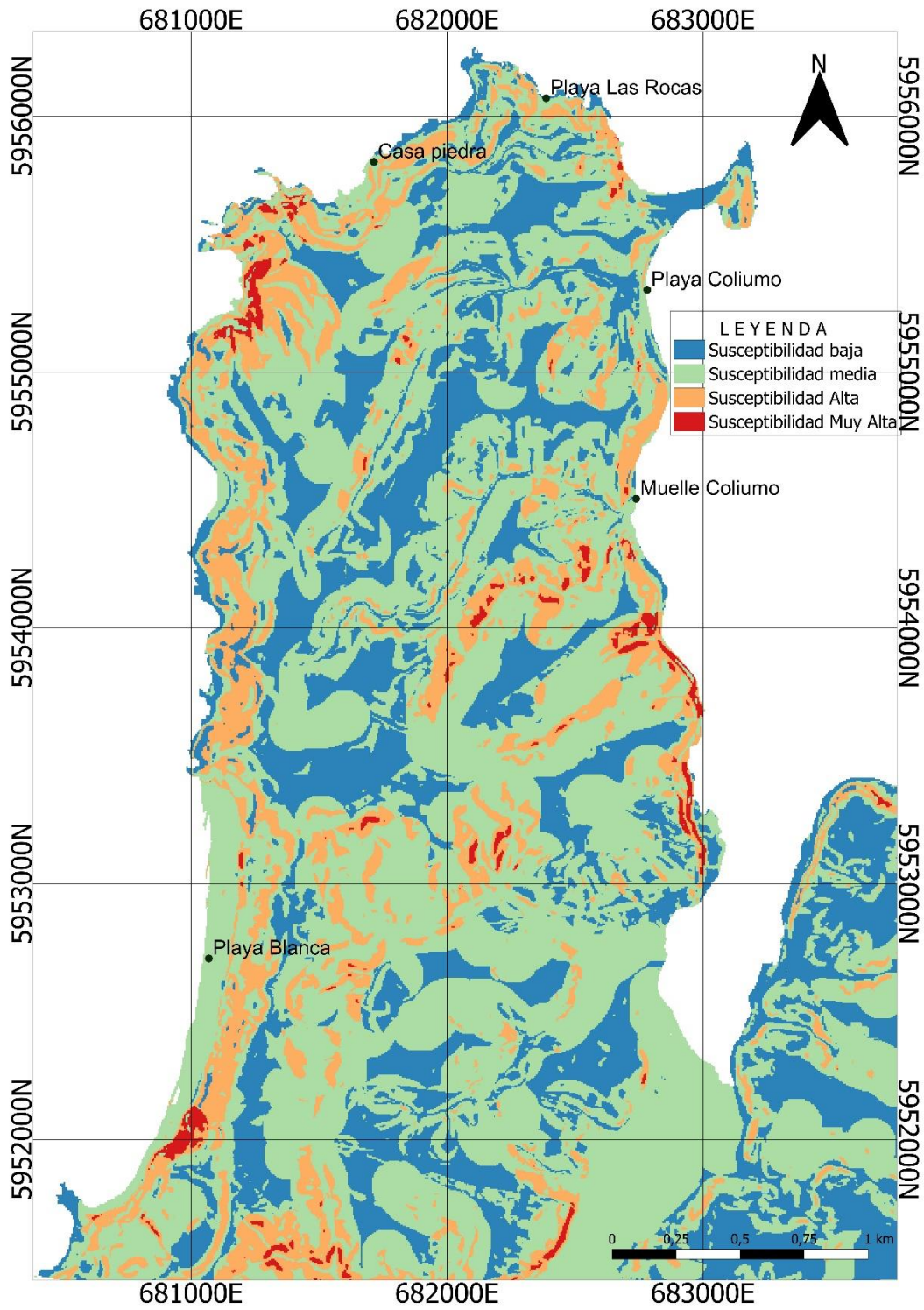


Fig. 25: Mapa obtenido de susceptibilidad de remociones en masa de la península de Coliumo.

7.2. Peligro y exposición de tsunami

Para evaluar el peligro de tsunami se consideró la base de datos del NCEI o *National Centers for Environmental Information* (<https://www.ngdc.noaa.gov>), anteriormente NGDC (National Geophysical Data Center) del gobierno de los Estados Unidos. Aquí se filtró la información de la *Global Historical Tsunami Database* (<https://www.ngdc.noaa.gov/hazel/view/hazards/tsunami/event-search>) que contiene información sobre eventos de tsunami desde el año 2000 a.C. Los filtros utilizados en la búsqueda fueron: **tsunamis registrados en Chile**, y **registros definitivos de tsunami** (es decir se descartaron los registros cuestionables o probables), Se consideraron estos filtros con el objetivo de tener la mayor cantidad de datos fiables de tsunamis en contextos relativamente similares al área de estudio.

El resultado de esta búsqueda arrojó 44 entradas desde el año 1730 a la actualidad de las cuales 43 contenían registros de **altura máxima del agua** que se define como la diferencia de altura entre el nivel del mar en condiciones normales y el punto máximo de inundación alcanzado por el tsunami. Se clasificó esta información en 3 categorías (Fig. 47): alto peligro de 0-10 m por la gran cantidad de tsunamis registrados en este rango de altura, peligro medio de 10-30m ya que a los 30m es la mayor altura registrada por tsunamis generados por terremoto en Chile (Quezada et al., 2011) y finalmente 30-50m asociado a bajo peligro ya que hay un solo registro de un caso extremo de tsunami que ha alcanzado estas alturas en el país provocado por remoción en masa gatillado por actividad sísmica (Naranjo et al., 2009) que pareció pertinente incluir. De esta manera se generó un mapa de peligro de tsunami en el área de estudio (Fig. 48).

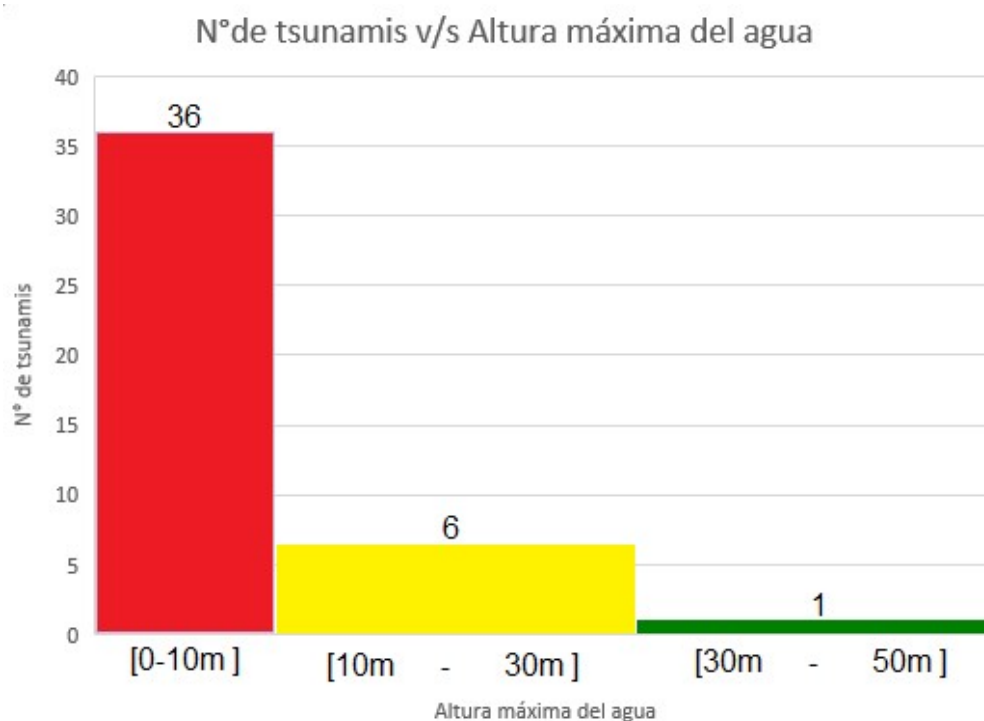


Fig. 26: Representación gráfica de clasificación de los tsunamis según su frecuencia histórica y rangos de altura de agua alcanzada.

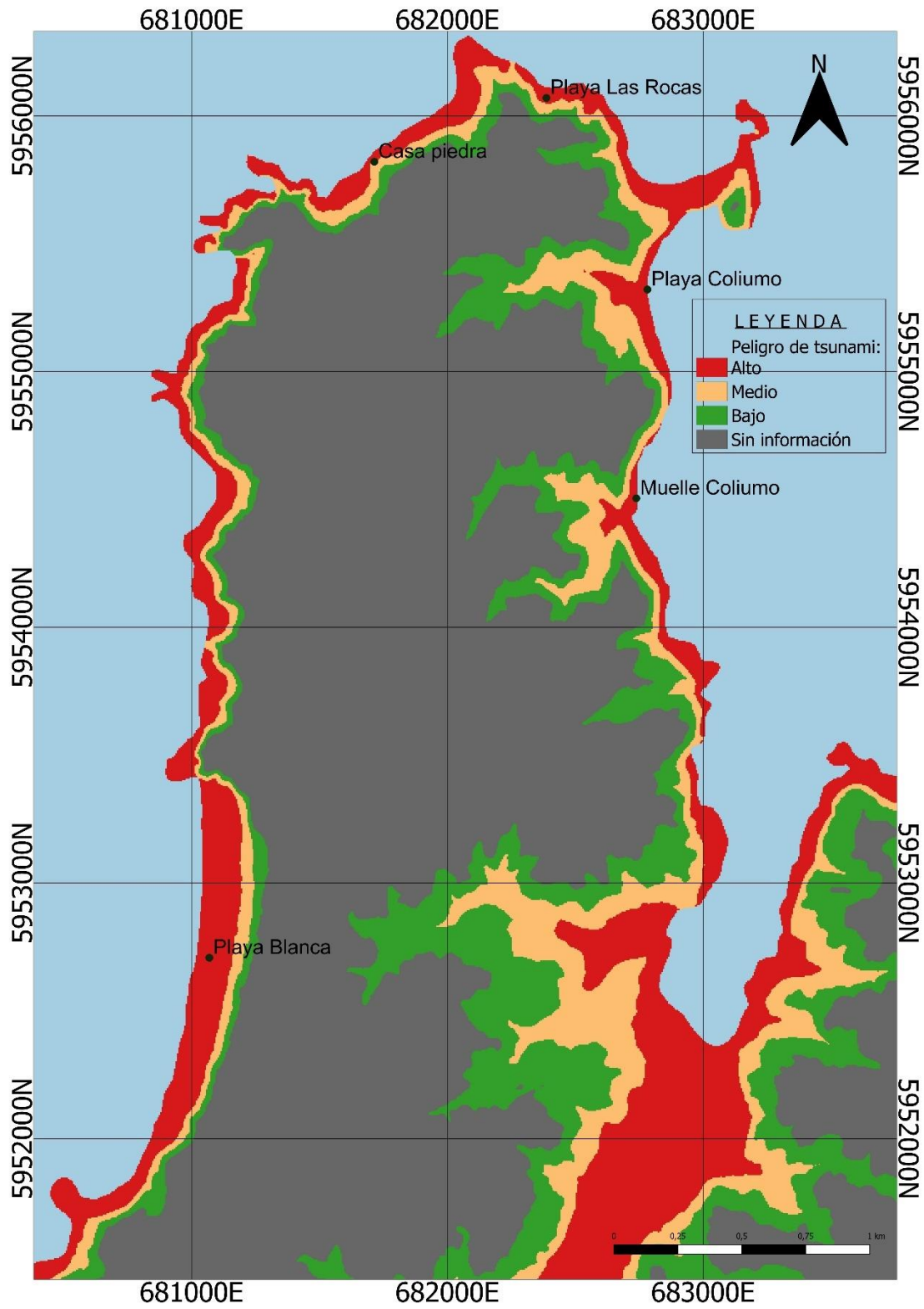


Fig. 27: Mapa de peligro de tsunami.

8. RESULTADOS Y CONCLUSIONES

El estudio en terreno de la geología de la península de Coliumo revela que el área de estudio presenta algunas de las grandes unidades geológicas regionales. Por el norte de la península encontramos rocas ígneas intrusivas del Batolito Costero Sur formando acantilados escarpados y playas de diversos tamaños. Más al sur del área de estudio se encontraron rocas fosilíferas del Cretácico pertenecientes a formación Quiriquina en las plataformas de abrasión en la bahía y también en el sector suroeste en contacto con el basamento metamórfico junto a las arenas titaníferas de Playa Blanca. La zona central de la península se encuentra más bien dominada por las secuencias continentales eocenas de Formación Curanilahue y suelo reciente. Esta información geológica sumada a la información estructural de tres fallas inferidas a partir de lineamientos, cambios litológicos, y topografía permitió generar dos mapas de peligro de los dos principales riesgos geológicos del sector como son remociones en masa y tsunami.

El resultado del estudio de susceptibilidad de remociones en masa realizado utilizando la metodología AHP de matrices multifactoriales ponderadas muestra que una sección particular de aproximadamente 1,2 Km del camino que recorre la península se encuentra particularmente expuesto a alto peligro de remociones en masa (Fig. 49). Este resultado es apoyado por imágenes satelitales del sector que muestra múltiples remociones en masa en el corto tramo mencionado. A pesar del resultado aparentemente acertado es importante considerar las limitaciones de la metodología utilizada ya que debemos tomar en cuenta que este método se basa en juicios subjetivos para la ponderación de factores, lo que puede introducir sesgos personales en el análisis. Estos juicios, aunque fueron basados en el criterio de expertos y adaptados a la zona de estudio, pueden variar significativamente. Además, el AHP requiere un proceso de verificación de la consistencia en las comparaciones pareadas, y aunque esto ayuda a reducir la arbitrariedad, no elimina completamente la subjetividad inherente a las valoraciones humanas. Por último, el AHP, al ser un método semi-cuantitativo, puede no capturar completamente la complejidad y la naturaleza dinámica de las remociones en masa, que a menudo están influenciadas por una variedad de factores interconectados y cambiantes. Estas limitaciones deben ser tenidas en cuenta al utilizar el AHP en la evaluación de peligro de remociones en masa para asegurar una interpretación equilibrada y una toma de decisiones informada.

El resultado del análisis de peligro de tsunami utilizando un método de evaluación según tsunamis históricos en Chile revela que prácticamente todo el camino que recorre la costa este se encuentra expuesto a alto y medio peligro de tsunami (Fig. 50), además de gran parte de la creciente urbanización de la península en el sector mencionado. Esta evaluación coincide con los efectos devastadores que tuvo el tsunami causado por el terremoto del 27 de febrero de 2010 en Coliumo, particularmente en la costa este. Sin embargo debemos tomar en cuenta las limitaciones de la metodología utilizada. Primero, la dependencia de registros históricos puede no reflejar adecuadamente la variedad y la magnitud de eventos futuros, ya que los tsunamis son fenómenos complejos influenciados por una variedad de factores geológicos y oceánicos. Segundo, la clasificación en categorías de peligro basada en la altura

del agua máxima no considera otros factores críticos como la velocidad de llegada del tsunami, y las características topográficas y morfológicas locales que pueden influir en el impacto del tsunami. Finalmente basarse en una base de datos puede tener sesgos inherentes, como la subrepresentación de ciertos tipos de eventos o áreas geográficas.

Este estudio sobre la geología de la península de Coliumo revela áreas significativas de peligro y exposición de remociones en masa y tsunamis, a pesar de las limitaciones de las metodologías utilizadas. Mirando hacia el futuro, existe un potencial considerable para expandir el conocimiento actual utilizando metodologías más avanzadas. El uso de modelos de simulación, como modelización hidrodinámica para tsunamis o modelos de estabilidad de taludes para remociones en masa, podría proporcionar una comprensión más profunda de los mecanismos subyacentes. También es importante mencionar que problemas complejos como los riesgos geológicos se abordan con mayor eficacia desde enfoques multidisciplinarios como climatología, hidrología y ecología entre otros. Si bien queda mucho por explorar y mejorar se espera que este trabajo constituya una base informativa para residentes y autoridades locales en una localidad que no presenta signos de detener su rápido desarrollo turístico y residencial.

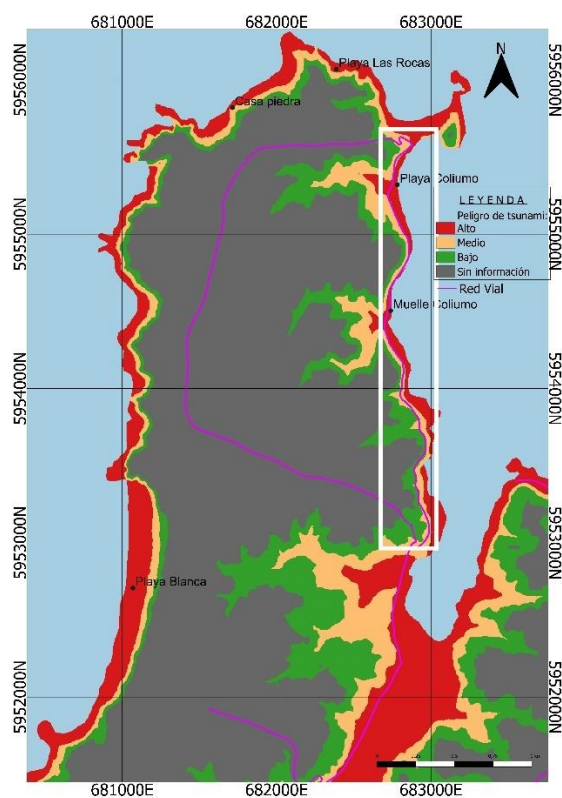


Fig. 29: Exposición a peligro de tsunami de la red vial del sector este de la península (cuadro blanco).

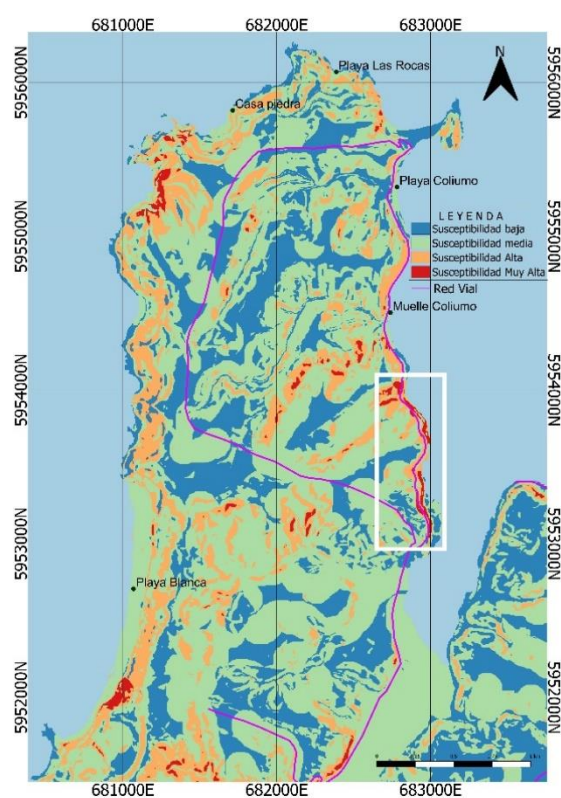


Fig. 30: Exposición importante de un tramo del camino (cuadro blanco) a peligro de remoción en masa

9. REFERENCIAS

- Aguirre, L., Hervé, F., & Godoy, E. (1972). Distribution of metamorphic facies in Chile: an outline. *Krystallinikum*, 9, 7-19.
- Ayalew, Lulseged & Yamagishi, Hiromitsu & Ugawa, Norimitsu. (2004). Landslide susceptibility mapping using GIS-based weighted linear combination, the case in Tsugawa area of Agano River, Niigata Prefecture, Japan. *Landslides*. 1. 73-81.
- Basharat, M., Shah, H. R., & Hameed, N. (2016). Landslide susceptibility mapping using GIS and weighted overlay method: a case study from NW Himalayas, Pakistan. *Arabian Journal of Geosciences*, 9(4).
- Charrier, Reynaldo & Pinto, Luisa & Rodríguez, María. (2007). Tectonostratigraphic evolution of the Andean Orogen in Chile. *Geological Society Special Publication*. 21-114.
- Collao, S.; Alfaro, G.; Cecioni, A.; González, A. y Quinzio, A. (2000). Evaluación de los recursos metálicos de la Región del Bío-Bío. Proyecto Fondo Nacional de Desarrollo Regional. Vol. I: 80 pp. Concepción.
- Creixell, C. (2001). Petrología y Geotermobarometría de las Rocas Intrusivas de la Cordillera de la Costa entre los 36°30' y 38°00'S. Memoria para optar al título de Geólogo. Universidad de Concepción, Departamento Ciencias de la Tierra (Inédito): 139 pp. Concepción.
- Cuevas, M. (2012). Susceptibilidad de remoción en masa, caleta Cocholgüe, comuna de Tomé. Memoria para optar al título de Geógrafo, Universidad de Concepción, Concepción, Chile.
- Del Congreso Nacional Siit, B. (n.d.). Mapas vectoriales. bcn.cl. https://www.bcn.cl/siit/mapas_vectoriales
- Díaz, G. V., Vázquez, V. S., & Machuca, M. Á. H. (2018). Análisis del cambio temporal y espacial del uso del suelo en la región centro-sur de Chile. *Ciencia Florestal*, 28(4), 1831–1844.
- Geología de Campo II, (2005). Geología del Cuadrángulo Tomé. Universidad de Concepción (Inédito): 233 pp. Concepción.
- Geología de Campo II, (2007). Geología del sector Vegas de Itata-Tomé. Universidad de Concepción. (Inédito): 222 pp. Concepción.
- Geología de Campo II, (2010). Geología de las Hojas Talcahuano, Tomé, Concepción y Hualqui entre los 36°29'-36°50' Lat. Sur y los 72°45'-73°13' Long. Oeste, Región del Biobío, Chile. Universidad de Concepción (Inédito): 261 pp. Concepción.
- Geología de Campo II, (2013). Geología de las Hojas Vegas de Itata Sur-Tomé, entre las coordenadas U.T.M. 5.971.750-5.930.500 N Y 701.400-678.000 E, Región del Biobío, Chile. Universidad de Concepción (Inédito): 76 pp. Concepción.

Geología de Campo II, (2016). Geología del Sector Costero e Interior de las Provincias de Concepción y Ñuble, entre los 36°22'30"-36°45'00" S y los 73°10'00"-72°40'30" W, Región del Biobío. Universidad de Concepción (Inédito): 76 pp. Concepción.

Godoy, E. (1970). Estudio petrográfico del granito de Constitución y su aureola de metamorfismo de contacto. Memoria de título. Departamento de Geología. Universidad de Chile, 140 páginas.

HAUSER, Y. (2000). Remociones en Masa en Chile. Mpodozis, C.; Vogel, S. y Gajardo A. Servicio Nacional de Geología y Minería: 89 pp. Santiago.

Hervé, F., Munizaga, F., Mantovani, M., Hervé, M. (1976). Edades Rb/Sr neopaleozoicas del basamento cristalino de la Cordillera de Nahuelbuta. I Congreso Geológico Chileno. Actas: F19 – F16. Santiago.

Kayastha, P. & Dhital, Megh & Smedt, F. (2013). Application of the analytical hierarchy process (AHP) for landslide susceptibility mapping: A case study from the Tinau watershed, west Nepal. *Computers & Geosciences*. 52. 398–408.

Kley, J., Monaldi, C. R. y Salfity, J. A., (1999). Along –Strike Segmentation of the Andean Foreland: Causes and Consequences: *J. Tectonophysics*, v. 301, pp. 75-94.

Leir, M., Michell, A., Ramsay, S., (2004). Regional landslide hazard susceptibility mapping for pipelines in British Columbia. *Geo-engineering for the society and its environment*. 57th Canadian Geotechnical Conference and the 5th Joint CGS-IAH conference, October 24–27, 2004, Old Quebec, Canada, pp. 1–9.

Martinez, Carolina & Rojas, Octavio & Castillo, Edilia & Quezada, Jorge & Vasquez, Daniela & Belmonte, Arturo. (2011). Efectos territoriales del tsunami del 27 de febrero de 2010 en la costa de la región del bio-bío, Chile. *Revista geográfica de América Central*. 2. 1-16.

Mendoza, J., (2001). Distribución, caracterización, génesis y características tectónicas de los yacimientos arenas silíceas del área costera de la Octava Región, entre Coliumo y Los Alamos. Memoria para optar al título de Geólogo, Universidad de Concepción, Departamento Ciencias de la Tierra (Inédito): 181 pp. Concepción.

Miyashiro, A., (1961). Evolution of metamorphic belts. *Journal of Petrology* 2, 277–311.

Moreno, M., (2004). Dinámica del ante-arco externo en la zona del bloque de Arauco, VIII Región del Bio Bio. Chile. Memoria para optar al título de geólogo. Universidad de Concepción, Departamento de Ciencias de la Tierra (Inédito): 121pp. Concepción

Muñoz-Cristi, J. (1968). Contribución al conocimiento geológico de la región situada al sur de Arauco y participación de material volcánico en los sedimentos eocenos. *El Terciario de Chile, zona central*. Sociedad Geológica de Chile. Editorial Andrés Bello: 63-94. Santiago.

Naranjo, José Antonio, Arenas, Manuel, Clavero, Jorge, & Muñoz, Oscar. (2009). Mass movement-induced tsunamis: main effects during the Patagonian Fjordland seismic crisis in Aisén (45°25'S), Chile. *Andean geology*, 36(1), 137-145.

NCEI Global Historical Hazard Database. (n.d.). <https://www.ngdc.noaa.gov/hazel/view/hazards/tsunami/event-data?country=CHILE&minEventValidity=4>

Pardo-Casas, F., Molnar, P. (1987) Relative motion of the Nazca (Farallon) and South America plates since Late Cretaceous Time. *Tectonics*, Vol. 6, No. 3, Pages 233-248, June 1987.

Pineda, V. (1983). Evolución Paleogeográfica de la Península de Arauco durante el Cretácico Superior-Terciario. Memoria para optar al título de Geólogo. Universidad de Chile (Inédito): 268 pp. Santiago.

Quezada, J. (1996). Geología Urbana y Ambiental de la Ciudad de Concepción. Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad de Concepción, Facultad de Ciencias Químicas, Departamento Ciencias de la Tierra (Inédito): 143 pp. Concepción, Chile.

Saaty, T.L., (1980). The analytic hierarchy process: planning, priority setting, resource allocation. McGraw-Hill Book Co, New York 287 pp.

Saaty, T.L., (2000). 2nd ed. The Fundamentals of Decision Making and Priority Theory with the Analytic Hierarchy Process, Vol VI. RWS Publications, Pittsburgh 478 pp.

Salazar, C. (2004). Ammonites del Maastrichtiano de la Formación Quiriquina. VIII Región del Bío-Bío. Chile sistemática, Bioestratigrafía y afinidades paleobiogeográficas. Memoria para optar al título de Geólogo. Universidad de Concepción, Departamento de Ciencias de la Tierra (Inédito): 155 pp. Concepción.

Somoza, R. (1998) Updated Nazca (Farallon)-South America relative motions during the last 40 My: implications for mountain building in the central Andean region. *Journal of South American Earth Sciences*, Vol. 11, No. 3, pp. 211-215, 1998.

Veas, M (2017) Mineralogía de las rocas metamórficas de la Serie Occidental entre los 41° 15'S y los 41° 25'S (Complejo Metamórfico de Bahía Mansa). Implicancias Geobarométricas. Memoria para optar al Título de Geólogo. Departamento de Geología. Universidad de Chile, 89 pp.

10. ANEXO

10.1 Tabla de historial de tsunamis en Chile,

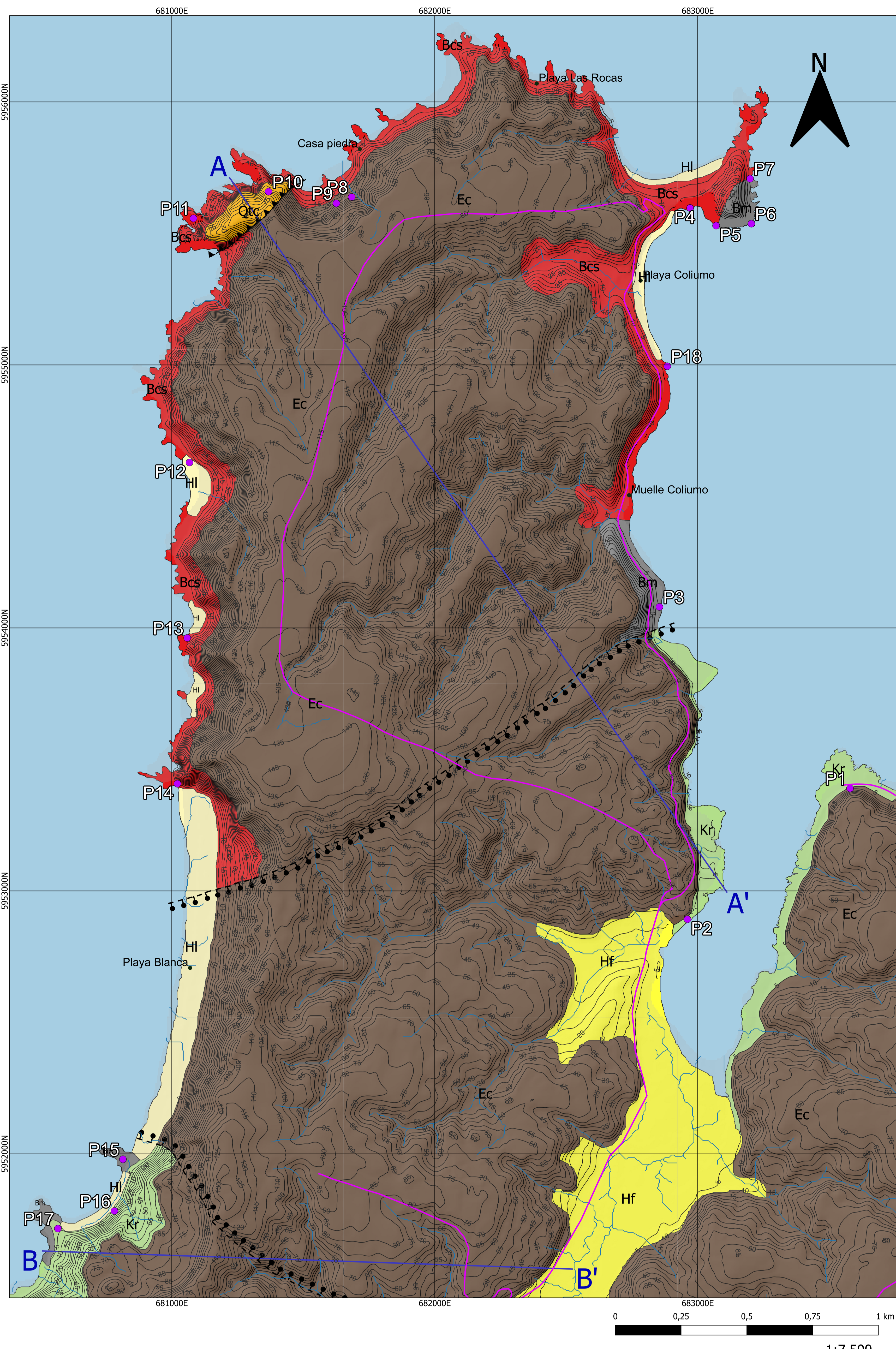
Global Historical Tsunami Database

(<https://www.ngdc.noaa.gov/hazel/view/hazards/tsunami/e>

Search Parameters	Year	Mo	Dy	Hr	Mn	Earthquake Magnitude	Country	Location Name	Latitude	Longitude	Maximum Water Height (m)
["Country = CHILE", "Validity >= Definite Tsunami"]	1730	7	8	8	45	9.1 CHILE	CHILE	CENTRAL CHILE	-32.5	-71.5	8
	1751	5	25	5	30	8.5 CHILE	CHILE	CENTRAL CHILE	-37	-73	3.5
	1819	4	12	3	0	8.5 CHILE	CHILE	NORTHERN CHILE	-27	-71.5	4
	1822	11	20	2	30	8.5 CHILE	CHILE	CENTRAL CHILE	-33	-72	3.6
	1835	2	20	16	22	8.2 CHILE	CHILE	CENTRAL CHILE	-36.83	-73.03	24
	1837	11	7	12	51	8.5 CHILE	CHILE	SOUTHERN CHILE	-42.5	-74	6
	1849	11	17	10	10	7.5 CHILE	CHILE	CENTRAL CHILE	-29.95	-71.37	5
	1859	10	5	12	0	7.6 CHILE	CHILE	NORTHERN CHILE	-27.35	-70.35	6
	1868	8	13	21	30	8.5 CHILE	CHILE	NORTHERN CHILE	-18.6	-71	18
	1868	8	14	1	30	8.5 CHILE	CHILE	NORTHERN CHILE	-18.6	-71	0.17
	1877	5	10	0	59	8.3 CHILE	CHILE	NORTHERN CHILE	-21.5	-70.5	18
	1895	5	31				CHILE	NORTHERN CHILE	-18	-71	
	1918	12	4	11	47	7.8 CHILE	CHILE	NORTHERN CHILE	-26	-71	5
	1922	11	11	4	32	8.5 CHILE	CHILE	NORTHERN CHILE	-28.293	-69.852	9
	1936	7	13	11	12	7.3 CHILE	CHILE	NORTHERN CHILE	-24.5	-70	1
	1943	4	6	16	7	8.2 CHILE	CHILE	CENTRAL CHILE	-30.75	-72	1
	1955	4	19	20	24	7.1 CHILE	CHILE	CENTRAL CHILE	-30	-72	1
	1960	5	21	10	2	8.2 CHILE	CHILE	CENTRAL CHILE	-37.872	-73.243	0.5
	1960	5	22	19	11	9.5 CHILE	CHILE	SOUTHERN CHILE	-38.143	-73.407	25
	1966	12	28	8	18	7.8 CHILE	CHILE	NORTHERN CHILE	-25.5	-70.7	0.42
	1971	7	9	3	3	7.8 CHILE	CHILE	CENTRAL CHILE	-32.5	-71.2	0.6
	1973	10	5	5	47	6.7 CHILE	CHILE	CENTRAL CHILE	-32.5	-71.5	0.2
	1983	10	4	18	52	7.7 CHILE	CHILE	NORTHERN CHILE	-26.535	-70.563	0.2
	1985	3	3	22	47	8 CHILE	CHILE	CENTRAL CHILE	-33.132	-71.708	3.5
	1987	3	5	9	17	7.6 CHILE	CHILE	NORTHERN CHILE	-24.388	-70.161	0.2
	1988	2	5	14	1	7.2 CHILE	CHILE	NORTHERN CHILE	-24.753	-70.433	0.1
	1995	7	30	5	11	8 CHILE	CHILE	NORTHERN CHILE	-23.34	-70.294	3
	1995	11	1	0	35	6.7 CHILE	CHILE	NORTHERN CHILE	-28.906	-71.417	0.07
	1996	9	5	8	14	6.9 CHILE	CHILE	EASTER ISLAND REGION	-22.118	-113.436	0.09

2007	4	21	17	53	6.2 CHILE	SOUTHERN CHILE	-45.285	-72.606	50
2007	11	14	15	40	7.7 CHILE	NORTHERN CHILE	-22.247	-69.89	0.28
2010	2	27	6	34	8.8 CHILE	CENTRAL CHILE	-36.122	-72.898	29
2010	3	11	14	39	6.9 CHILE	CENTRAL CHILE	-34.29	-71.891	0.14
2011	2	11	20	5	6.8 CHILE	CENTRAL CHILE	-36.474	-73.125	0.15
2014	3	16	21	16	6.7 CHILE	NORTHERN CHILE	-19.981	-70.702	0.26
2014	4	1	23	46	8.2 CHILE	NORTHERN CHILE	-19.61	-70.769	4.63
2014	4	3	2	43	7.7 CHILE	NORTHERN CHILE	-20.571	-70.493	0.74
2014	10	9	2	14	7 CHILE	EASTER ISLAND REGION	-32.108	-110.811	0.47
2015	9	16	22	54	8.3 CHILE	CENTRAL CHILE	-31.573	-71.674	13.6
2015	11	11	1	54	6.9 CHILE	CENTRAL CHILE	-29.507	-72.007	0.55
2016	12	25	14	22	7.6 CHILE	SOUTHERN CHILE	-43.406	-73.941	0.44
2017	4	24	21	39	6.9 CHILE	CENTRAL CHILE	-33.038	-72.062	0.16
2019	6	14	0	19	6.4 CHILE	CENTRAL CHILE	-30.056	-72.082	0.07
2020	12	27	21	39	6.7 CHILE	CENTRAL CHILE	-39.343	-74.99	0.16

GEOLOGÍA Y PELIGROS GEOLÓGICOS DE LA PENÍNSULA DE COLIUMO (36°30' - 36°58' S y 72°59' - 72°56' W)



LEYENDA

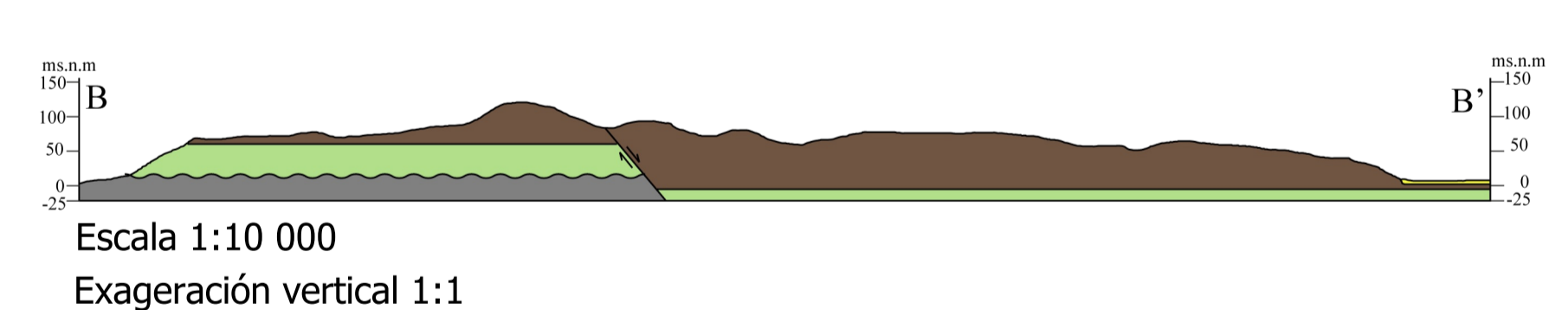
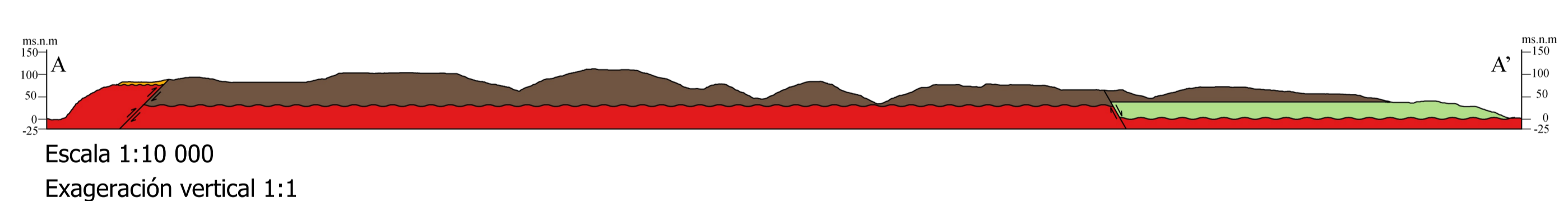
- Depósitos Litorales (Holoceno)**
 - HI** Arenas finas a medias, líticas a cuarzo feldespáticas y titaníferas depositadas en ambiente costero e intertidal.
- Depósitos Fluviales**
 - Hf** Depósitos fluviales de ríos y esteros, y de sus terrazas y llanuras de inundación: limos, arenas y gravas.
- Unidad Clásica de Terrazas Litorales (Neógeno Superior)**
 - Qtc** Terrazas litorales, tanto fluviales como marinas, que se caracterizan por areniscas, conglomerados y limolitas, con moderado a bajo grado de consolidación.
- Formación Curanilahue (Eoceno inferior)**
 - Ec** Secuencia sedimentaria continental conformada por niveles de areniscas de grano medio, niveles de lutitas, arcillolitas y mantos de carbón, el color de las rocas varían de tonalidades verdosas a pardas y grises.
- Formación Quiriquina (Maastrichtiano)**
 - Kr** Secuencia sedimentaria marina, conformada por conglomerados polimícticos, más areniscas amarillas y verdes fosilíferas con niveles de concreciones paralelos a la estratificación.
- Batolito Costero del Centro Sur (Carbonífero-Triásico)**
 - Bcs** Rocas intrusivas paleozoicas que afloran como franja continua en la Cordillera de la Costa. Subunidad Intrusiva Coliumo: Tonalita de biotita y hornblenda de grano medio. Xenolitos anfibolíticos.
- Basamento Metamórfico, Serie Oriental (Carbonífero-Permico)**
 - Bm** Zona de biotita. Filitas y esquistos con biotita, clorita, albita, muscovita y cuarzo.

SIMBOLOGÍA

- Red de drenaje
- Puntos de terreno
- Falla inversa inferida
- Curvas de nivel
- Falla normal inferida
- Localidades
- Perfiles A-A', B-B'
- Camino pavimentado

Simbología Perfiles

- Contacto concordante
- Inconformidad
- Cinematica de falla



Universidad de Concepción
 Facultad de Ciencias Químicas
 Departamento de Ciencias de la Tierra

Memoria para optar al Título de Geólogo:
"GEOLOGÍA Y PRINCIPALES PELIGROS GEOLÓGICOS DE LA PENÍNSULA DE COLIUMO"
 2023

Ubicación del área de estudio

Datos Cartográficos

Proyección Universal Transversal Mercator (UTM)
 Datum Horizontal: WSG 1984 Zona 18S

Profesor(a) Guía: Abraham Elias Gonzalez Martinez
 Profesional Co-Guía: Alberto Nicolas Sanhueza Andrade

Alumno: Erwin Boris Hödl Cruzat

