



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

SUSCEPTIBILIDAD DE REMOCIONES EN MASA EN
LAS COSTAS DE FIORDOS CERCANOS A
HORNOPIRÉN, X REGIÓN.

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGO

MARÍA VERÓNICA NÁQUIRA BAZÁN

PROFESOR GUÍA:
SERGIO SEPÚLVEDA VALENZUELA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
MANUEL ARENAS ABARCA
SOFÍA REBOLLEDO LEMUS

SANTIAGO DE CHILE
OCTUBRE 2009

RESUMEN

Las remociones en masa son uno de los peligros geológicos más frecuentes, y su importancia ha ido en aumento a medida que el asentamiento humano crece en lugares con pendientes.

La susceptibilidad de remociones en masa puede definirse como la posibilidad de que una zona, sea afectada o genere un determinado fenómeno de remoción en masa. La susceptibilidad depende de los factores que controlan o condicionan la ocurrencia de las remociones en masa, que pueden ser intrínsecos a los propios materiales geológicos o externos.

El 21 de Abril de 2007, un sismo superficial de magnitud Mw 6.2 afectó la zona del fiordo Aysén (45.5° S), generando cientos de remociones en masa en la costa del fiordo y sus alrededores. Tres de las remociones más voluminosas, al impactar violentamente en las aguas del fiordo, generaron tsunamis locales, que causaron, junto con flujos de detritos, diez víctimas fatales y un importante daño en granjas salmoneras. La actividad sísmica se asocia a la zona de falla Liquiñe-Ofqui (ZFLO), una estructura de carácter regional norte-sur de más de 1000 km de longitud. Debido a las consecuencias generadas por los sismos de Aysén de 2007, se ha despertado un interés en registrar con mayor constancia la actividad sismogénica de la ZFLO, y en especial, en la comuna de Hualaihué, donde Hornopirén es el principal centro poblado. A partir de mayo de 2008 una actividad sísmica asociada a la ZFLO, se ha registrado en la localidad de Hornopirén, actividad que continuó hasta los primeros meses del año 2009, con magnitudes de hasta Mw 5.4.

Este trabajo se centró en la generación de mapas de susceptibilidad de remociones en masa generadas por sismos en la zona de Hornopirén (aprox. 42.5° S), más específicamente en las costas de los canales Hornopirén, Cholgo, Llancahué, en la costa norte del canal Comau, y en el fiordo Quintumpeu. El estudio se basó en la identificación de factores condicionantes que se ha hecho en estudios recientes, principalmente del sismo que afectó al fiordo Aysén. El análisis de susceptibilidad de este trabajo se realizó por medio de un método de análisis estadístico bivariado. En este método los factores que se consideran determinantes en la inestabilidad del terreno, se califican para poder indicar algún grado de contribución al desequilibrio, generando mapas de factores. Luego se combina cada uno de los mapas de factores, con el mapa de remociones en masa. Para cada parámetro se calcula la densidad de deslizamientos, y se le asigna un peso ponderado.

Se determinó que la zona de estudio es susceptible a remociones en masa, especialmente a caídas y deslizamientos de roca. Las zonas que poseen mayor susceptibilidad son la costa oriental del canal Cholgo, la costa occidental del canal Hornopirén, y la costa norte del fiordo Quintumpeu. Los factores considerados como los más influyentes en la susceptibilidad de la zona son: distancia a lineamientos y fallas, geología, densidad de lineamientos y fallas, pendiente y aspecto. Debido a las similitudes que presenta la zona de estudio con las costas del fiordo Aysén, y la posibilidad que posee la zona de sufrir un evento sísmico de magnitudes mayores a las que se han registrado hasta el momento, la localidad de Hornopirén podría verse afectada por un tsunami, razón por la cual es recomendable realizar estudios más detallados para este peligro.

Agradecimientos

*Ufff!!!! ...Que tengo **agradecimientos**!!!*

Claramente esta memoria no podría haberse concretado sin la participación de muchos.

Financiamiento, proyecto Fondecyt 11070107 y el Centro Internacional de Investigación de Terremotos Montessus de Ballore.

Las asistencias más directas, mis profesores “guías”, Sergio Sepúlveda y Manuel Arenas. Luego, Sofía Rebolledo.

*Sin embargo, claramente existe la ayuda, y los aportes, de muchas otras personas. Acá, se encuentran varios compañeros **geólogos**, cosa natural. Pero también, se encuentran otras personas que si no hubiera sido por esta memoria, quizás nunca habría conocido.*

*Compañeros **geólogos**: Cristóbal Padilla, Rodrigo Rauld, André Stumpf, Alejandra Serey, Sergio Calderón, Gabriel Orozco.*

*“Amigo Especial” : Jorge Riquelme (alguna vez nominado al “más **geólogo**”).*

Los que quizás nunca hubiera conocido: Rusbber Tampier, Robinson Cabezas.

Bueno, y claramente María Rosa Rocco, ella siempre está ahí....

*Aprovechando que esta es mi memoria,
Quiero **agradecer** lo que siento al estar aquí.
En este momento de mi vida...
Terminando una etapa,
Cerrando un ciclo,
Concretando un símbolo de la experiencia adquirida al estudiar **Geología**.*

***Geología**, muchas personas no saben lo que es...*

*¿**Geo** qué?, ¿**Geografía**?, ¿**Teología**?...
O sencillamente...
¿Qué es eso?
Son preguntas que muchas veces me ha tocado contestar.*

*Geo...Tierra....
Logía...Ciencia...
Claro, Ciencia de la Tierra.*

*Osea, estudio la Tierra...
“Las piedras”...como dicen muchos...*

*Y, sí...
Es que la Tierra es tan hermosa!*

*Redonda,
De colores variados y bellos,
Cristalina,
Acuosa,
Energética,
Frágil,
Dúctil,
Mágica...*

Sagrada...

Y evoluciona...

Y claro, si el describir, es como una poesía...

*La Geología...
Nos conecta con la belleza de la naturaleza.
Pocas personas se pueden imaginar los bellos lugares por los que andan los
geólogos.
Lugares que centran...*

*Los geólogos intentamos leer la Tierra...
Para poder comprender cómo evoluciona...
Por lo que echamos a volar la imaginación...
Para poder encontrar respuestas...*

*Menos mal que el método científico...
Nos pone el cable a Tierra...*

*Es que claro,
Tan deslumbrante es la Tierra...
Que siempre queremos volver con algún pedacito de ella...
Y más que pedacitos a veces...*

*Pero nadie puede negar...
Que bellas se ven esas rocas en las casas...
Decoran,*

*Y nos recuerdan, al elemento **tierra**...*

*Esotéricamente hablando,
El elemento **tierra** es un “frío seco”.
Algo que es inmóvil, y rígido.
Algo concreto.*

*Y lo más concreto de todo ésto,
Es que en **Geología** el trabajo grupal es evidente.*

*Según el tarot “Madre **Paz**”...
Un trabajo realizado en conjunto.
Un acto común de construir...
Un colectivo donde predomina el compromiso común,
La cooperación,
Y la no competencia.
Creativamente, la expresión es en libertad.
Y con afectos.*

*¿Será porque los **geólogos** creemos en el “uniformismo”?
Uniformismo
Filosofía de la **Ciencia**
Los procesos naturales que actuaron en el pasado son los mismos que actúan en el presente.
“El presente es la clave del pasado”.*

*Mmmmm...
¿Por lo que tenemos raíces filosóficas en la antigüedad...?*

*Como una civilización primitiva...
De alrededor de 10 mil a 5 mil años A.C.
Edad del Hielo,
Periodo Magdaleniense,
Paleo-lítico.
...Antigua Piedra...*

*Antes del “Patriarcado”,
Cuando el padre de la **humanidad** era una **conciencia** matrística.
Un modo de **conciencia** creativo e intuitivo...
Nutritivo...
Transparente...
Descubriendo lo inagotable que hay en uno...
Despertando semillas...*

*Y eso era...
Hace miles de años...*

*“La visión que cada uno tiene de Dios se encuentra en su nivel de Con**Ciencia**.”*
Olmo Halpunte, (2005).

*“Construir la iglesia de la Diosa” ...Budapest, Z., (1975).
“Lo femenino, espacioso como el **cielo**”... Argüelles, J. y M.
“...así en la **tierra** como en el **cielo**...”...Lucas 11, 1- 4.*

*¿**Tierra** ~ **Cielo**?*

*...”...Que estás en los **cielos**...”... Lucas 11, 1- 4.*

*“El **cielo** es el lugar que habita la esencia. Los lugares donde se encuentra a la esencia. Y la oración no dice “el cielo”, sino “los **cielos**”. Porque, evidentemente se refiere a muchos **cielos**, ya que cada cuerpo tiene su **cielo**”. Olmo Halpunte, (2005).*

*Como dicen los budistas,
“El centro está en todas partes, la circunferencia en ninguna”.*

*El **cielo** es un estado subjetivo de perfecta felicidad.
Se trata de vivir en **paz** y equilibrio, con el mundo de las formas,
Para finalmente, lograr la armonía.*

*“Estar en los **cielos** es vivir por encima de cualquier horizonte”.*

*En contacto con la mejor parte de nuestra “**humanidad**”...*

*Por lo que yo deseo **agradecer**...
Que he tenido el placer de compartir con “**seres humanos**”.*

*“**Ser humano**”*

*Significa compartir con otros la vida propia,
De forma tal...
Que los demás participen del conocimiento adquirido.
Ya sea amor o sabiduría.
Significa ser honesto de pensamiento y sentimientos, en palabra y acto.
Ser sincero y sensible.
Significa haber desarrollado dentro de sí mismo la capacidad de poder dar a los demás algo bueno y positivo...
Para que aprendan y progresen.
Significa no angustiarse para no herir,
Ni sentirse herido por los actos de otros.
Significa disfrutar las alegrías justas libremente,
La alegría de estar cerca de otros,
Y poder preocuparse por la alegría de los demás.*

Según Bascuñán, (2005), esto se resume en el “Padre Nuestro”. Al decir “Padre Nuestro” nos estamos comprometiendo con la primera misión de todos los **seres humanos**: confiar en el prójimo. Nuestra primera misión colectiva es aceptarnos uno a otros, y encontrar seguridad en el trato, pues sólo así se puede crecer, y desarrollarse.

Por todo lo planteado anteriormente...

Agradezco el haber estudiado rodeada de “**seres humanos**”.

Bueno, quizás...

*“Proyectos de **seres humanos**”, como lo soy yo...*

Pero de todos modos...

Puedo darme el lujo de decir que:

“Estudie en un ambiente donde pude adquirir, dar, y darme seguridad y confianza”.

La mejor experiencia de aprendizaje.

*Quiero **agradecer** también, a mi familia.*

*Especialmente por haber comprendido a mi amor por la **Tierra**.*

Y en consecuencia, a mis padres,

Por haberme dado el apoyo, y la posibilidad de estar aquí.

*Finalmente, quiero **agradecerle** a mi mejor amiga, María Verónica N.B....*

Por la asertividad que tuvo al elegir su profesión...

Por el coraje, y la entrega con la que la obtuvo...

Y especialmente,

Por haber escuchado a su esencia...

PaZciencia 

*PD: Estos agradecimientos son para todo el Departamento de **Geología** (compañeros, profesores, funcionarios).*

Pero claramente, con un especial cariño a mi curso: Gabriel Orozco, Nicolás Anguita, María Isabel Varas, Paola Peña, Felipe Tapia, Iñigo Irarrázabal, Felipe Coloma, Matías Peña, Francisco Delgado.

PD₂: Agradezco también a Anibal Bascuñán, por entregar sus conocimientos y experiencias...Y especialmente, por el “punch” recibido con “el mapa del tesoro”.

Referencias

- Vicky Noble, (2008). MadrePaz. Ed. Cuatro Vientos.
- Olmo Halpunte, (2005). El Padre Nuestro Esencial. Ed. Beso de Chocolate
- Lucas 11,
- <http://es.wikipedia.org/wiki/Uniformismo>
- http://es.figu.org/ensenanza_del_espiritu/ser_humano
- <http://es.wikipedia.org/wiki/Paleol%C3%ADtico>

INDICE

	Pág.
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Objetivos.....	7
1.2. Hipótesis de Trabajo	8
1.3. Metodología de Trabajo.....	8
1.3.1. Estudios preliminares de gabinete.....	8
1.3.2. Trabajo de terreno	9
1.3.3. Análisis de susceptibilidad.....	10
1.3.4. Discusiones y conclusiones.....	11
1.4. Limitaciones.....	11
2. GEOLOGÍA DEL AREA DE ESTUDIO.....	13
2.1. Introducción.....	13
2.2. Marco Geológico Regional.....	13
2.2.1. Geomorfología.....	13
2.2.2. Geología regional.....	14
2.2.3. Geología costera.....	15
2.2.4. Estructura.....	19
2.3. Geología Local.....	22
2.3.1. Geomorfología.....	22
2.3.2. Geología.....	27
2.3.3. Estructura.....	38
2.3.4. Sismicidad de la zona de estudio.....	44
3. METODOLOGÍA DE TRABAJO.....	46
3.1. Introducción.....	46
3.2. Uso de Métodos Estadísticos en Análisis de Susceptibilidad de Remociones en Masa.....	48
3.3. Análisis Estadísticos Bivariados.....	51
3.4. Metodología del Análisis.....	54

4. RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE SUSCEPTIBILIDAD DE REMOCIONES EN MASA	62
4.1. Introducción.....	62
4.2. Catastro de Remoción en Masa.....	62
4.3. Mapas de Factores Determinantes en la Inestabilidad de Laderas.....	71
4.4. Resultados del Análisis de Susceptibilidad de Remociones en Masa.....	79
4.4.1. Resultados de cada tipo de remoción en masa.....	79
4.4.1.1. Caída y/o deslizamiento de roca.....	80
4.4.1.1.1. Pesos factores.....	80
4.4.1.1.2. Índice de éxito y mapa de susceptibilidad.....	83
4.4.1.2. Flujo de detritos.....	87
4.4.1.2.1. Pesos factores.....	87
4.4.1.2.2. Índice de éxito y mapa de susceptibilidad.....	90
4.4.1.3. Deslizamiento de roca-suelo.....	94
4.4.1.3.1. Pesos factores.....	94
4.4.1.3.2. Índice de éxito y mapa de susceptibilidad.....	97
4.4.1.4. Deslizamiento de suelo.....	101
4.4.1.4.1. Pesos factores.....	101
4.4.1.4.2. Índice de éxito y mapa de susceptibilidad.....	104
4.4.2. Resultados para remociones en masa en general.....	108
5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS	112
5.1. Introducción.....	112
5.2. Discusión de los Resultados de los Análisis de Susceptibilidad de Remociones en Masa.....	112
5.2.1. Catastro de remoción en masa.....	112
5.2.2. Mapas de factores determinantes en la inestabilidad de laderas.....	113
5.2.3. Valores de peso de las clases-factores.....	114
5.2.4. Discusión de los mapas de susceptibilidad obtenidos según tipo de remociones en masa.....	116
5.2.4.1. Índice de éxito de los mapas de susceptibilidad.....	116
5.2.4.2. Mapas de susceptibilidad.....	117
5.2.5. Discusión del mapa de susceptibilidad de remociones en masa.....	118
5.2.5.1. Índice de éxito del mapa de susceptibilidad.....	118
5.2.5.2. Mapa de susceptibilidad de remociones en masa.....	119
5.2.6. Posibilidad de tsunami.....	120

6.	CONCLUSIONES.....	122
7.	REFERENCIAS.....	124

ANEXOS

A.	Coordenadas de los puntos de terreno.....	135
B.	Descripción de muestras de mano.....	137
C.	Descripción de cortes transparentes.....	152
D.	Medidas estructurales.....	166
D.1.	Estructuras por punto.....	166
D.2.	Direcciones de foliación por punto.....	171
D.3.	Descripción de macizo rocoso por punto.....	172
E.	Diagramas de concentración de polos, y diagramas de polos y planos de estructuras por punto.....	181
F.	Catastro de remociones en masa.....	196
G.	Scripts.....	198

1. INTRODUCCIÓN

Las remociones en masa son uno de los peligros geológicos más frecuentes, y su importancia ha ido en aumento a medida que el asentamiento humano crece en lugares con pendientes.

Los fenómenos de remoción en masa son procesos de transporte de material definidos como procesos de ‘movilización lenta o rápida de determinado volumen de suelo, roca o ambos, en diversas proporciones, generados por una serie de factores’ (Hauser, 1993). Estos movimientos tienen carácter descendente ya que están fundamentalmente controlados por la gravedad (Cruden, 1991).

Existen numerosas clasificaciones para los distintos tipos de eventos de remoción en masa, las cuales han sido proporcionadas, entre otros, por Varnes (1978), Hauser (1993) y Cruden & Varnes (1996). Las remociones en masa han sido clasificadas por estos últimos autores en los siguientes tipos principales:

- Desprendimientos o caídas
- Deslizamientos (rotacionales y traslacionales)
- Flujos
- *Toppling* o volcamientos
- Extensiones laterales

Los desprendimientos o caídas corresponden a movimientos rápidos a extremadamente rápidos que se generan cuando el material rocoso o suelo se desprende de una ladera de alta pendiente a través de una superficie donde no se genera cizalle, descendiendo mediante caída libre, rebotando o rodando (Lara, 2007).

Un deslizamiento es un movimiento ladera abajo de masas de suelo o roca a través de superficies de cizalle definidas. Este movimiento no ocurre a lo largo de toda la superficie de ruptura simultáneamente, sino más bien comienza en zonas donde se generan

fallas locales. Los deslizamientos rotacionales ocurren a lo largo de superficies curvas y cóncavas. En los deslizamientos traslacionales se genera una superficie de cizalle aproximadamente plana. Entre los principales tipos de deslizamientos traslacionales figuran los deslizamientos en bloque, y en cuña (Lara, 2007).

Los flujos corresponden a movimientos continuos de masa en el espacio, donde las superficies de ruptura no son preservadas, y las masas desplazadas son fuertemente deformadas internamente, comportándose de manera similar a un líquido viscoso (Varnes, 1978). Los flujos son clasificados por diversos autores de acuerdo al tipo de material involucrado (ej. detritos, barro) y a la cantidad de agua que presentan (Varnes, 1978; Hauser, 1993; Naranjo & Varela, 1996). En esta categoría de flujos clasifican también avalanchas y lahares.

El *toppling* (o volcamiento), corresponde al desprendimiento de uno o varios fragmentos de rocas o suelo mediante el volcamiento de éstos en torno a un punto o un eje bajo el centro de gravedad de la masa desplazada. Lo que lo distingue de una caída propiamente tal es que en la superficie de ruptura se genera cizalle, característica que lo hace ser catalogado por algunos autores como deslizamiento (Goodman, 1989).

Las extensiones laterales se definen como extensiones de suelos cohesivos o masas de roca combinadas con una subsidencia general de la masa fracturada de material cohesivo en material subyacente más blando, siendo condicionados por pendientes de laderas bajas a moderadas. La superficie de ruptura que se genera presenta poco cizalle. Algunos tipos de extensión lateral corresponden a extensiones laterales en bloque y a extensiones por licuefacción del suelo. (Lara, 2007).

Estas clasificaciones consideran diversos factores, como por ejemplo, los tipos de materiales involucrados (suelo o roca), el mecanismo de ruptura, el grado de saturación que alcanza. Estos factores, junto con las características geológicas, geotécnicas y geomorfológicas del entorno, condicionan la potencial generación de remociones en masa, así como las velocidades de desplazamiento y el volumen de material desplazado. Son

frecuentes además, los procesos combinados, como por ejemplo deslizamientos que derivan en flujos (Scott *et al*, 2001).

Los fenómenos externos que desencadenan las remociones en masa varían según el ambiente, siendo los más comunes los factores climáticos y sismos. En los factores climáticos el principal es la intensidad de las lluvias, ya que a medida que aumenta la intensidad de éstas, se produce una mayor infiltración, y en consecuencia una saturación de los suelos. En el caso de los sismos, lo más importante no es la magnitud del sismo, sino la fuerza que ellos generan, ya que según ésta se puede producir el fallamiento y la posterior aceleración de las laderas. Esta fuerza depende de varios factores como la magnitud, distancia al epicentro, condiciones del suelo, etc.

Existen registros de remociones en masa sismo-inducidas desde 373-372 AC. (Seed, 1968). En distintos lugares del mundo estas remociones han sido las generadoras de decenas de miles de muertes, además de enormes pérdidas económicas de billones de dólares durante el siglo pasado. El impacto ambiental que poseen estos deslizamientos muchas veces alcanza alrededor de miles de kilómetros cuadrados.

Algunos ejemplos de sismos de gran magnitud que generaron significantes remociones en masa son:

- 1960, Sur de Chile, sismo de magnitud momento (Mw) 9.5. Produjo cientos de deslizamientos de tierra, avalanchas de detritos, y flujos de barro que destruyeron o modificaron considerablemente a más de 15.000 hectáreas. Alrededor de cien personas murieron como consecuencia directa de estos deslizamientos. (Wright & Mella, 1963).
- 1964, Alaska, sismo de Mw 9.2. Causó la pérdida de aproximadamente 1.2 billones de dólares, de la cual un 56% fue generada por remociones en masa. (Wilson & Keefer, 1985).
- 1970, Perú, sismo de Mw 7.7. Provocó avalanchas de rocas y detritos ($50 - 100 \times 10^6 \text{ m}^3$) en la cima del Monte Huascarán de los Andes peruanos. Estos flujos alcanzaron

velocidades promedios de 270 - 360 km/h, tapando a dos pueblos y causando la muerte de 18.000 personas. (Plafker & Ericksen, 1978).

- 1985, Valparaíso, Chile, sismo de Mw 8.1. Generó deslizamientos disgregados, desplomes, y flujos rápidos de suelos, los cuales abarcaron un área de 17.000 km². (Rodríguez *et al.*, 1999).
- 1999, Taiwan, sismo de Mw 7.6. Gatilló más de 9.000 medianos y grandes deslizamientos, cubriendo un área total de 127.8 km² (Liao & Lee, 2000), y muchas otras remociones más pequeñas han sido reportadas. (Sitar *et al.* 2001).

Cabe destacar que muchos sismos de menor magnitud también pueden gatillar este tipo de remociones, y si bien no lo hacen a niveles catastróficos, lo realizan con mayor frecuencia.

El riesgo presentado por las remociones en masa sismo-inducidas, depende tanto de sus propias características, como de la homeostasis que tenga la sociedad a éstas (Vargas, 2002). Es decir, el peligro está dado según los movimientos característicos que poseen los deslizamientos y la potencial abundancia que existe en un lugar determinado. A la vez, el riesgo está determinado por la protección y preparación presente en políticas públicas, como el ordenamiento territorial, y la construcción de obras adecuadas.

El concepto de susceptibilidad puede definirse como la posibilidad de que una zona, unidad geomorfológica o geológica, sea afectada o genere un determinado proceso, expresada en diversos grados cualitativos y relativos (González de Vallejo, 2002). Depende de los factores que controlan o condicionan la ocurrencia de los procesos, que pueden ser intrínsecos a los propios materiales geológicos o externos.

Los mapas de susceptibilidad pueden realizarse en base a (González de Vallejo, 2002):

- Mapa inventario: las áreas que sufren o han sufrido procesos pueden volver a sufrirlos.

- Mapa de factores: las áreas en que confluyen determinados factores que condicionan los procesos en una determinada zona o región, aunque éstos no se hayan presentado hasta la actualidad, pueden ser afectadas en un futuro.

Los principales factores que determinan la susceptibilidad de una ladera; es decir, los elementos que configuran una condición potencialmente inestable son (Lara, 2007):

- Topografía y Geomorfología
- Geología
- Condiciones geotécnicas de los materiales
- Clima
- Vegetación
- Acción humana

Para las remociones en masa sismo-inducidas, la topografía y geomorfología, juegan un papel fundamental en la susceptibilidad de una ladera, debido a la amplificación de las ondas sísmicas que puede generar la topografía (Sepúlveda *et al.*, 2004, 2005). La amplificación ocurre cuando las ondas sísmicas entran a la base de una cresta topográfica, y son parcialmente reflejadas hacia el interior del macizo rocoso, y difractadas a lo largo de las superficies libres. Por lo tanto, las ondas sísmicas progresivamente se focalizan hacia la cima, la interferencia constructiva de las ondas reflejadas, y la asociación de las ondas difractadas aumenta hacia la cresta, lo que aumenta las aceleraciones en las alturas topográficas (Meunier *et al.* 2008). Esto genera una mayor susceptibilidad de remociones en masa en las zonas superiores de las laderas. Meunier *et al.* (2008) propone un método gráfico para representar la posición de las remociones con respecto a la ladera, combinando la distancia normalizada de la parte más alta de una remoción hasta la cresta, con la distancia normalizada al valle más cercano. Sepúlveda *et al.* (2009) muestra, utilizando este método, como las remociones sismo-inducidas del terremoto de 2007 en las costas de fiordo de Aysén se distribuyen principalmente en las zonas superiores de las laderas. Sobre un 50% de los deslizamientos se generan en el cuarto superior de las laderas, un 85% de la mitad hacia lo alto.

Este trabajo se centra en la generación de mapas de susceptibilidad de remociones en masa generadas por sismos en la X región, más específicamente en las costas de los canales Hornopirén, Cholgo, Llancahué, en la costa norte del canal Comau, y en el fiordo Quintumpeu (aprox. 42.5° S). Se basa en la identificación de factores condicionantes que se ha hecho en estudios recientes, principalmente del sismo ocurrido el 21 de abril de 2007, que afectó la zona del fiordo Aysén (45.5° S). Este sismo fue el de mayor magnitud (Mw 6.2) de un enjambre sísmico que se inició tres meses antes. Generó decenas de remociones en masa en las costas del fiordo Aysén, como también en valles glaciales cercanos en un radio de unos 15 km. del epicentro localizado en el fiordo (Sepúlveda *et al.*, 2009). Los grandes volúmenes de roca que cayeron a las aguas del fiordo causaron un tsunami, produciendo víctimas fatales e importantes daños en la industria salmonera de la zona. También hubo daños menores en las ciudades cercanas de Puerto Aysén y Puerto Chacabuco, además de aislados deslizamientos hasta unos 50 km. de distancia del epicentro (Sepúlveda & Serey, 2009).

La actividad sísmica se asocia a la Zona de Falla Liquiñe-Ofqui (ZFLO), una estructura de carácter regional norte-sur de más de 1000 km. de longitud (Cembrano *et al.* 2002), desde la zona de Liquiñe en la provincia de Valdivia, hasta el Golfo de Penas por el sur. La subducción oblicua se ha considerado como la principal causa de la deformación de cizalle lateral a lo largo de la ZFLO (Hervé, 1976; Cembrano, 1992). Sin embargo, otros autores consideran que la generación y/o activación de la zona de falla sería una respuesta mecánica y termal del margen continental a la colisión de la Dorsal de Chile con la Placa Sudamericana, en el extremo sur de la zona de falla (46°30') (Nelson *et al.*, 1994).

Debido a las consecuencias generadas por los sismos de Aysén de 2007, se ha despertado un interés en registrar con mayor constancia la actividad sismogénica de la ZFLO. El Servicio Sismológico de la Universidad de Chile instaló, el 10 de mayo de 2008, una estación sismológica en la localidad de Hornopirén con la ayuda de la Ilustre Municipalidad de Hualaihué. El 23 de mayo, una actividad sísmica sensible fue registrada por esta estación, y a fines del mismo mes registró eventos sísmicos menores. Existen registros de que la actividad sísmica continuó durante el resto del año 2008, y los primeros

meses del año 2009. Esto no significa que la actual actividad sísmica esté en proceso de término, cosa que no podría afirmarse ni descartarse. Otros estudios (Lange et al. 2007) habían detectado ya actividad sísmica en la misma zona.

En la comuna de Hualaihué, donde Hornopirén es el principal centro poblado, la actividad humana se ha desarrollado en distintas áreas, como agricultura en los valles, y la pesca y salmonicultura en los canales y fiordos. El turismo es otra actividad importante, ya que la comuna resguarda el Parque Nacional Hornopirén y parte del Parque Pumalín. En esta zona se planea además construir la sección faltante de la Carretera Austral. Además, el poblado de Hornopirén es susceptible a ser afectado por tsunamis, dada su ubicación. Por esta razón, es conveniente evaluar la susceptibilidad de remociones en masa a lo largo de las costas de los fiordos y canales ante posibles futuros eventos sísmicos.

1.1 Objetivos

Objetivo general: Evaluar la susceptibilidad de remociones en masa sismo-inducidas en las costas de los canales Hornopirén, Cholgo, Llancahué, en la costa norte del canal Comau y en el fiordo Quintumpeu.

Objetivos específicos:

- Establecer los factores que determinarán la susceptibilidad de las laderas de la zona de estudio.
- Determinar la susceptibilidad de remociones en masa en la zona de estudio.

1.2. Hipótesis de Trabajo

Las costas de los fiordos y canales próximos a la Zona de Falla Liquiñe-Ofqui poseen una alta susceptibilidad a las remociones en masa, en particular aquéllas generadas por sismos cercanos; esto obedece a las condiciones geotécnicas vinculadas a la presencia de la zona de falla, y a la vez a las condiciones geomorfológicas particulares de un ambiente glacial, y su respuesta ante la sismicidad.

1.3. Metodología de Trabajo

Este estudio está basado principalmente en el modelo de susceptibilidad de remociones en masa realizado por Arenas *et al.* (2008) en las costas del fiordo Aysén, a partir de las remociones en masa generadas por el terremoto de abril de 2007.

1.3.1. Estudios preliminares de gabinete

- Revisión de antecedentes de la zona de estudio: bibliografía, registros históricos de sismicidad, cartografía, y fotografías aéreas.

Dentro de la bibliografía se examinaron distintos tópicos: litología, estructuras, morfologías, y los resultados de las de investigaciones realizadas en los deslizamientos generados durante el terremoto del 2007 en el fiordo de Aysén.

Para poder paliar la falta de registros instrumentales de la sismicidad de la zona, se realizó una recopilación de los registros históricos, con la idea de conocer la actividad sísmica en el máximo intervalo de tiempo posible, y que en ese período exista homogeneidad de la información.

Tanto la cartografía como las fotografías aéreas fueron revisadas con el fin de obtener una percepción de las morfologías y alturas del relieve. Además, con las fotografías se interpretaron los posibles contactos litológicos, lineamientos, y remociones en masa.

- Elaboración de mapas digitales.

Para trabajar en terreno se realizó, con el software ArcGis 9.3, un modelo de elevación digital de la zona de estudio (MED), y mapas temáticos (topográfico, hipsométrico, de pendientes, y de orientación de laderas).

1.3.2. Trabajo de terreno

Para el trabajo en terreno se utilizaron como medio de transporte una camioneta, un bote, y un helicóptero.

- Se analizó la topografía y geomorfología de las costas de los canales de la zona de estudio. Se observó la geometría de las laderas y de las masas susceptibles a movilizarse. Para ello se caracterizaron los siguientes elementos: pendiente, curvatura, morfologías, alturas, y orientación de las laderas.
- Se analizó la geología de la zona de estudio, determinando el tipo de roca, edad, la morfología de los afloramientos y sus grados de meteorización. También se ubicaron y determinaron la disposición de fallas, set de diaclasas, zonas de cizalle, etc.
- Se analizaron las condiciones geotécnicas de macizos rocosos. Para ello se caracterizaron algunos afloramientos, determinando la resistencia de la roca, el grado de meteorización, las características de las discontinuidades (tipo de discontinuidad, orientación, resistencia de las paredes, rugosidad, apertura, tipo y espesor de relleno, espaciamiento, persistencia, número de sets), y la filtración de agua. En este análisis se utilizaron índices como el GSI (Geological Strength Index), J_v (número total de discontinuidades por m^3), y J_n (Joint set number).

- Se mapearon las remociones en masa existentes en las costas de los canales Hornopirén, Cholgo, Llancahué, en la costa norte del canal Comau, y el fiordo Quintumpeu. Para ello se utilizaron los mapas elaborados, las fotografías aéreas, y las fotografías y grabaciones de terreno.

1.3.3. Análisis de susceptibilidad de remociones en masa

- Se recopilaron y analizaron los datos obtenidos en terreno. Con ellos se generó un mapa geológico, y uno de remociones en masa con el software ArcGis 9.3.
- Se definieron los factores condicionantes de las remociones en masa, basado en los estudios de terreno y gabinete, incorporando factores que se hayan identificado como asociados a la respuesta sísmica de las laderas.
- Se complementó el modelo de susceptibilidad de remociones en masa realizado por Arenas *et al.* 2008 para las costas del fiordo Aysén. Para el análisis de la susceptibilidad, se utilizaron métodos semicuantitativos de superposición de parámetros y métodos estadísticos bivariados, por medio de rutinas especialmente programadas para ello en el software Ilwis 3.3 Academic, Los resultados fueron pasados al software ArcGis 9.3, para poder obtener una mejor imagen de ellos.
- Se aplicó el modelo de susceptibilidad complementado en los canales cercanos a Hornopirén, con lo que se obtuvo el análisis de susceptibilidad de remociones en masa de la zona de estudio.

1.3.4. Discusiones y conclusiones

- A partir de los resultados obtenidos con los métodos estadísticos, se pudo discutir y concluir sobre las condiciones de susceptibilidad de remociones en masa en la zona de estudio, y su relación a posibles peligros sismogénicos.

1.4. Limitaciones

En los estudios preliminares de gabinete se presentaron las primeras limitaciones, éstas consisten principalmente en la baja cantidad de antecedentes que existen para la zona de estudio, tanto en bibliografía, como en registros históricos de sismicidad.

En el trabajo de terreno, las restricciones fueron generadas primordialmente por la vegetación, ya que posee una alta densidad. La vegetación, por presentarse tan tupida, impide el acceso a los distintos afloramientos, por tanto sólo se pudo trabajar con los afloramientos costeros. Por otro lado, la vegetación no permitió la observación clara de los lineamientos presentes en la zona, lo que llevó a que el trabajo fotointerpretativo adquiriera gran importancia.

El tamaño de las remociones en masa presentes en la zona de estudio, también generó ciertas limitaciones. Debido a que en general, las remociones no abarcan una gran área, éstas fueron difíciles de mapear. Por un lado, la mayoría no se logran ver en las fotografías aéreas. Y por otro lado, las pequeñas dimensiones de las remociones mapeadas, hacen difícil la separación entre sus zonas de arranque, trayectorias, y depósitos; lo que afecta en el modelamiento de susceptibilidad.

La baja cantidad de evidencias obtenidas en la zona de estudio, también genera limitaciones. Dado que este trabajo utiliza métodos estadísticos, es recomendable trabajar con muestras de alta cardinalidad.

La principal limitación del análisis de susceptibilidad está dada por el método utilizado. El análisis estadístico bivariado posee la limitación de no entregar información sobre posibles correlaciones entre los distintos factores, por tanto sólo se puede analizar el peso particular de cada factor, sin hacer observaciones de cómo se afectan entre ellos.

2. GEOLOGÍA DEL ÁREA DE ESTUDIO

2.1. Introducción

Este capítulo describe geomorfología, geología, y estructuras del área de estudio, en dos escalas, regional y local. Dentro del marco geológico regional, se detalla en mayor medida la geología costera, ya que en este estudio se trabajó sólo con los afloramientos que se encuentran en las costas de los fiordos y canales de la zona.

2.2. Marco Geológico Regional

2.2.1. Geomorfología

La costa de la parte sureste de la provincia de Llanquihue y la de Chiloé Continental forman el borde oriental del seno de Reloncaví, golfo de Ancud y golfo Corcovado. En la provincia de Chiloé continental una serie de fiordos y canales disectan el continente.

Al sur de la latitud de Puerto Montt, las características morfológicas de la costa representan la continuación de la Cordillera Principal. Éstas son diferentes dependiendo si constituyen el límite oriental de senos y golfos, o si forman la costa este (E) de fiordos y canales. En el primer caso, y hasta la bahía Corcovado, la costa posee una dirección predominantemente norte (N), y se caracteriza por la existencia de pendientes suaves, terrazas y playas. Las terrazas forman acantilados con playas de ripio. Las costas de playa son escasas, y están formadas por depósitos de grava, ripio, y arena volcánica. Los sedimentos en mayor medida son de origen glacial, o depositados por corrientes de barro,

de probable edad cuaternaria. Las rocas son metamórficas y sedimentarias de edad precámbrica-paleozoica (Levi *et al.* 1966).

Las costas de los fiordos y canales son abruptas y de dirección variable entre norte, este, y noreste; alcanzan alturas de 1700 m s.n.m. Están constituida principalmente por rocas intrusivas de edad terciaria-cretácica, y en menor parte por rocas metamórficas, de edad precámbrica-paleozoica.

2.2.2. Geología regional

Regionalmente la geología de la zona de estudio esta constituida principalmente por cinco unidades (Sernageomin, 2003). Las unidades que abarcan una mayor área corresponden a rocas intrusivas, y en menor medida existen afloramientos de rocas extrusivas, metamórficas y sedimentarias. Las rocas intrusivas corresponden a granitos, granodioritas, y tonalitas; y representan en su mayoría al Batolito Norpatagónico. Las rocas metamórficas corresponden a los esquistos y anfibolitas del Complejo Metamórfico Liquiñe. Las rocas extrusivas, y sedimentarias se presentan como secuencias volcánicas continentales y marinas, formadas por lavas y aglomerados, tobas, con intercalaciones de areniscas, calizas marinas y conglomerados continentales (figura 2.1.).

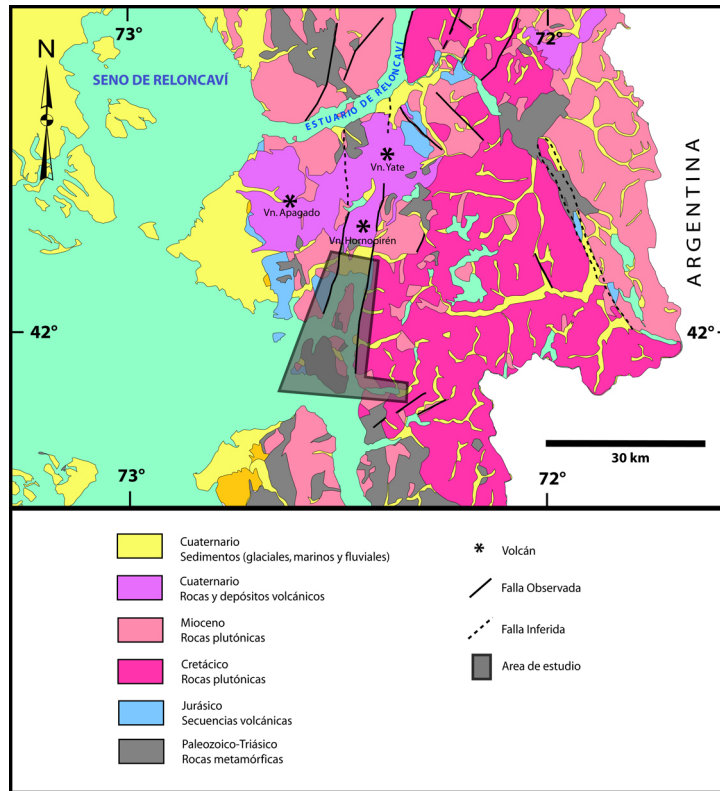


Figura 2.1.: Imagen obtenida de el Mapa Geológico de Chile, publicación geológica digital, N° 4, Sernageomin 2003.

2.2.3. Geología costera

La costa de la zona de estudio está compuesta mayoritariamente por rocas graníticas de probable edad terciaria y/o cretácica, que intruyen principalmente a rocas metamórficas y sedimentarias de edad precámbrica- paleozoica. Existen, además, afloramientos aislados de rocas sedimentarias marinas cuya edad, según fósiles, es terciaria inferior a miocena. Rocas sedimentarias y volcánicas de edad terciaria superior y/o pleistocena, y sedimentos recientes, cubren la costa (Levi *et al.*, 1966), como se presenta en la figura 2.2.

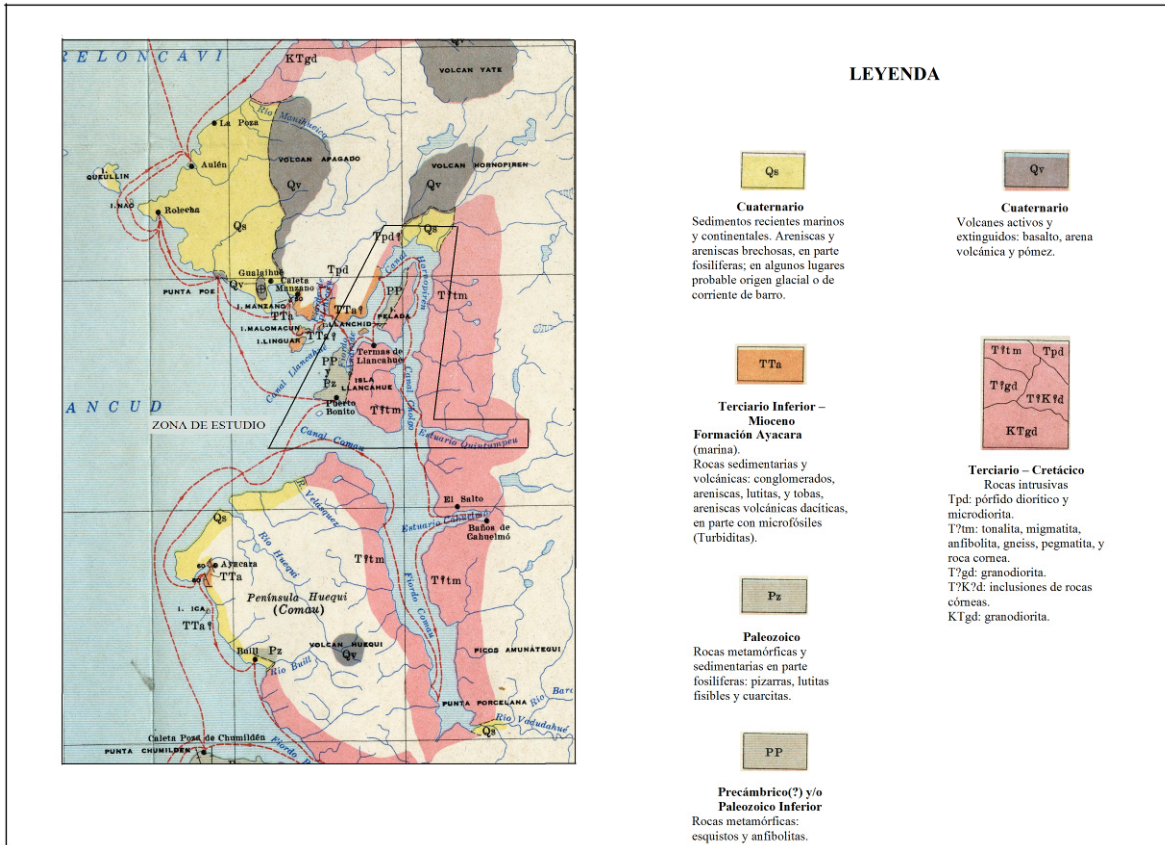


Figura 2.2.: Imagen obtenida del mapa geológico del Boletín N°19, Levi *et al.*, 1966.

- Rocas metamórficas, sedimentarias y volcánicas.

Los afloramientos de estas rocas no poseen una continuidad areal. La estratificación y foliación que presentan son de dirección predominantemente norte y noroeste. La asignación de las edades relativas para los distintos conjuntos litológicos, a excepción de las unidades fosilíferas, se ha basado en correlaciones litológicas, y en consideraciones y comparaciones de grado de metamorfismo regional, estructura o rasgos morfológicos.

Las rocas más antiguas expuestas son rocas metamórficas y sedimentarias.

- Precámbrico (?) y/o Paleozoico Inferior (?) (PP)

Afloramientos aislados de esquistos y anfibolitas están tentativamente asignados a esta edad. Estas rocas poseen una fuerte esquistosidad de rumbo norte a noroeste. Por sus características mineralógicas y texturales, representarían facies metamórficas entre esquistos verdes y anfibolita. La mayoría de sus afloramientos se encuentran intruídas por rocas graníticas de edad terciaria y/o cretácica.

- Paleozoico (Pz)

Rocas que consisten principalmente en pizarras, lutitas y cuarcitas calcáreas, con estratificación generalmente de rumbo norte a noroeste. Gracias a una fauna fósil encontrada en la costa norte del fiordo Reñihué, en la península Huequi, se pudo establecer la edad paleozoica (devónica). En las demás áreas de afloramientos, las rocas presentan un grado de metamorfismo regional parecido al que presentan las rocas donde fue el hallazgo, por esta razón se les otorga la misma edad.

- Mesozoico

No existen rocas estratificadas mesozoicas.

- Cenozoico

Las rocas estratificadas cenozoicas corresponden a depósitos sedimentarios marinos y continentales, y volcánicos continentales. Ellos se distribuyen en la costas, cubriendo discordantemente a rocas graníticas de edad terciaria y/o cretácica, y a rocas sedimentarias y metamórficas de edad precámbrica (?) y/o paleozoica. Una característica de los depósitos cenozoicos es el abundante contenido de clastos de rocas volcánicas derivados posiblemente de un volcanismo sincrónico con su depositación.

Formación Ayacara (TTa)

Secuencia de rocas sedimentarias clástico-volcánicas, en su mayor parte marina. Se encuentra bien consolidada en la localidad Ayacara, en la costa noroeste de la península Huequi. Además, rocas sedimentarias de características similares, se presentan en islas y costa norte del canal Llancahué. Esta unidad está compuesta por conglomerados, areniscas, lutitas, tobas, y areniscas volcánicas de composición dacítica. Estas rocas poseen buena estratificación y sus espesores son centimétricos a métricos. En varios niveles se pueden apreciar estructuras sedimentarias. Las capas tienen rumbos variables entre N30°W y N35°W y manteos subverticales. La presencia de microfósiles, *Globigerina* sp. y silicoflagelados afines al género *Naviculopsis*, determina la edad de esta formación, ya que son característicos del Terciario.

- Cuaternario

Los depósitos cuaternarios corresponden a sedimentos recientes marinos y continentales (Qs), y a los distintos materiales volcánicos generados por los volcanes activos y apagados de la región (Qv). Los sedimentos fluviales y aluviales recientes consisten en capas de ripio, grava, arena, limo y arcilla, de algunos centímetros a varios metros de espesor. Los materiales volcánicos son esencialmente basaltos, arena volcánica, y pómez. Algunos de los volcanes principales son, de norte a sur: Yate, Apagado, Hornopirén, Huequi.

• Rocas Intrusivas.

Extensos afloramientos de rocas intrusivas se presentan en la costa de la región. De probable edad terciaria y/o cretácica, intruyen rocas metamórficas y sedimentarias de edad precámbrica (?) y/o paleozoica. En cantidad subordinada, pórfidos y microdioritas intruyen rocas sedimentarias de edad terciaria. Estas rocas intrusivas están parcial y discordantemente cubiertas por depósitos cuaternarios.

T?tm

En la costa este del canal Hornopirén, y en ambas costas del canal Cholgo y fiordo Comau, se presentan migmatitas formadas por rocas graníticas, pegmatitas, gneisses, anfibolitas y rocas córneas de piroxeno. Las rocas graníticas son en su mayoría tonalitas de color gris verdoso claro, de grano medio y textura hipidiomorfa granular. Están compuestas por plagioclasa, biotita, anfíbola o piroxeno, cuarzo, apatito y zircón. Las pegmatitas consisten en cristales menores a 15 cm de plagioclasa, anfíbola, y escaso cuarzo. Los gneisses están compuestos por plagioclasa, cuarzo, biotita, moscovita, granate, magnetita, apatito y zircón. Los gneisses y pegmatitas se encuentran principalmente en el margen oriental del canal Cholgo. Las anfibolitas y las rocas córneas de piroxeno se presentan como inclusiones o bandas de tamaño variable (milimétrico-métrico). Las rocas córneas de piroxeno se encuentran primordialmente en el borde oriental de las Islas Pelada y Llancahué. Las anfibolitas se presentan en la costa este del canal Cholgo y fiordo Comau. Por método radiométrico plomo-alfa, se determinó un valor para la edad de 15 +/- 10 millones de años. Debido a los errores inherentes del método ésta edad no puede ser significativa; sin embargo, sugiere para estas rocas una edad terciaria (Levi *et al.*, 1966).

Tpd

En la isla Manzano y en la costa norte del canal Llancahué existen cuerpos y filones de pórfidos dioríticos, tonalíticos y microdioritas, de espesores métricos, que intruyen de forma concordante y discordante a la formación Ayacara. Los pórfidos dioríticos y tonalíticos tienen color gris verdoso claro y textura porfírica. Las microdioritas son de textura ofítica, de color gris.

2.2.4. Estructura

La Zona de Falla Liquiñe-Ofqui (ZFLO) corresponde a un conjunto de lineamientos coincidentes espacialmente con el eje mio-plioceno del Batolito Norpatagónico, y con la cadena volcánica reciente (Lavenu & Cembrano, 1994). Consta de dos segmentos rectos, con rumbo NNE, de centenares de kilómetros de largo unidos por lineamientos NE en

echelón, arreglo espacial similar a un duplex de rumbo. Además, presenta una serie de fallas cóncavas al suroeste (Cembrano & Hervé, 1993) (figura 2.3.).

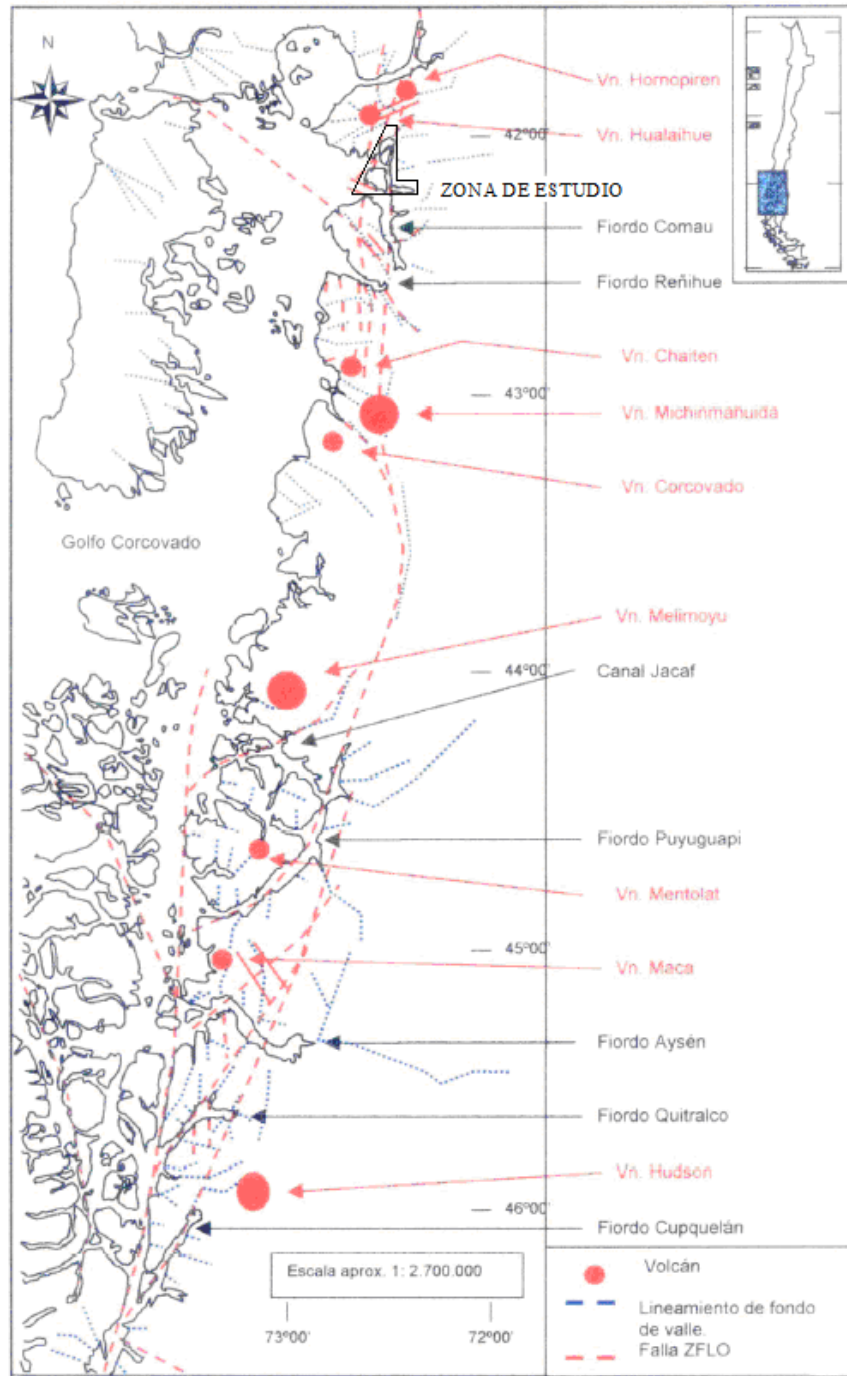


Figura 2.3: Imagen del arco volcánico de la Zona de Falla Liquiñe-Ofqui, según Hervé *et al.* 1978, y Cembrano & Moreno (1994).

Como resultado de un cizalle dextral localizado y distribuido en el margen continental, estudios paleomagnéticos muestran rotaciones de bloques corticales en sentido horario dentro y al este de la ZFLO (García & Beck 1988; Cembrano & Beck, 1992). Al oeste de la ZFLO, las rotaciones son antihorarias, y reflejan problemas espaciales resueltos por las fallas de escarpe curvas de rumbo NW.

La ZFLO registra deformación dúctil y frágil de edad cenozoica. La deformación dúctil se observa en la estructura y microfábrica de franjas de roca intensamente deformadas en unidades plutónicas ubicadas en lineamientos de la ZFLO. En dominios discretos, se registra con mayor intensidad la deformación frágil, donde se sobrepone a la fábrica dúctil. Gracias a estudios radiométricos Ar/Ar, en biotitas obtenidas en granitoides a los 42°S, se le otorga a la deformación frágil una edad post-3.3 Ma (Drake & Hervé, 1992).

Algunos mecanismos propuestos como los causantes del movimiento dextral son el régimen de subducción oblicua de la placa de Nazca bajo Sudamérica durante el Cenozoico, y la indentación de la dorsal de Chile bajo el margen continental (Hervé *et al.* 1976).

2.3. Geología Local

2.3.1. Geomorfología

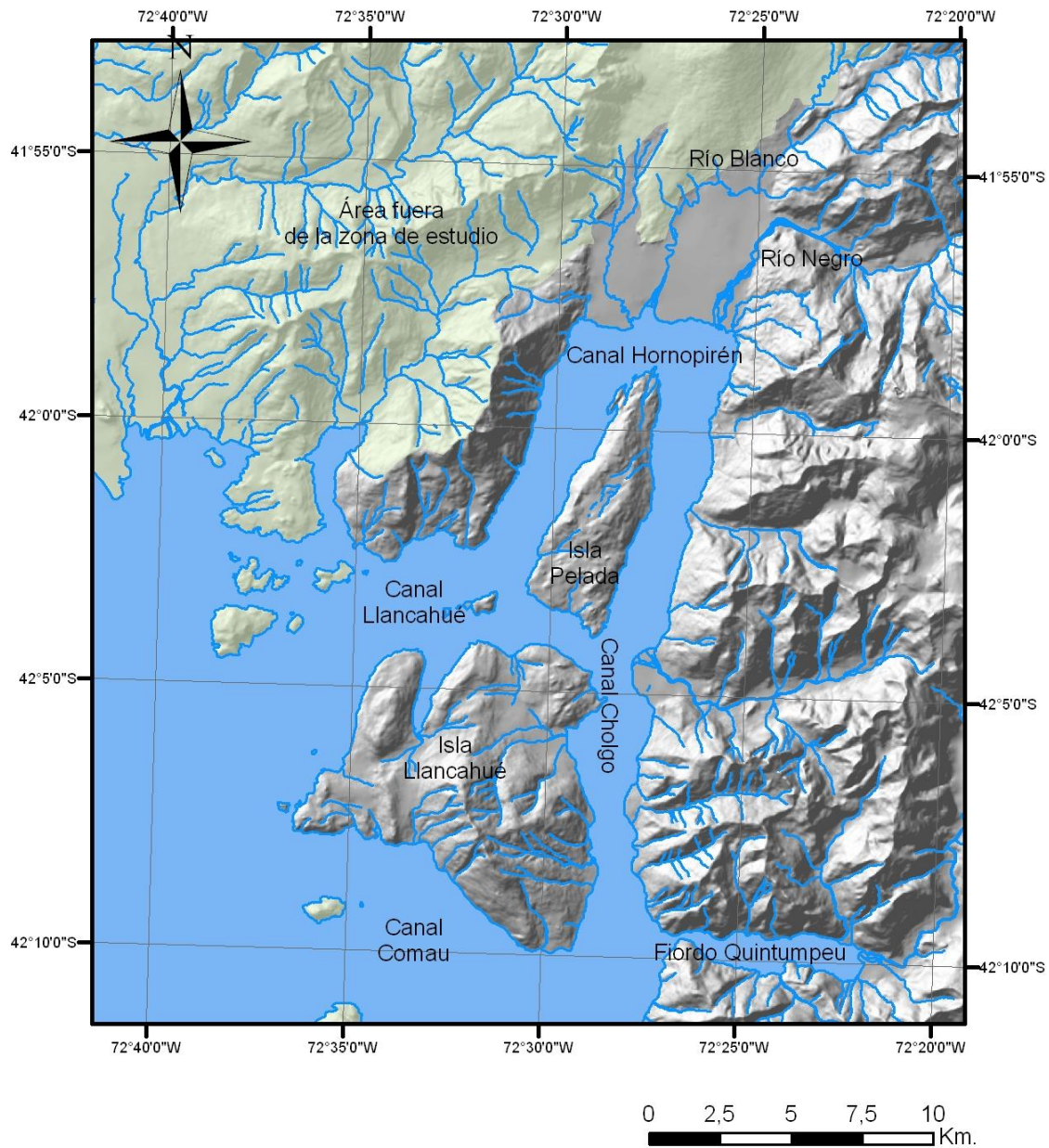
La zona de estudio está constituida por las costas de los fiordos que disectan el continente, desde el sur de Hornopirén y hasta la costa norte del canal Comau aproximadamente (figura 2.4.).

Estos fiordos, llamados también canales o estuarios, presentan costas abruptas. Las alturas al oeste del canal Cholgo no superan los 1.200 m.; en cambio, al oriente del canal Cholgo, las alturas alcanzan hasta los 2000 m. (figura 2.5.).

Las pendientes en general oscilan entre 30° y 50°. Sin embargo, en la costa oeste del canal Cholgo se observan pendientes menores, que varían entre 10° y 30°. Hacia el interior del continente, en las quebradas que desembocan al canal Cholgo, y en el estuario Quintumpeu, las pendientes son mayores, y varían entre 40° y 60° (figura 2.6.).

La dirección de las pendientes, es decir el aspecto, en las costas de los canales varía principalmente entre oeste y este. Tanto en la costa oriental del canal Cholgo, como en las costas occidentales de las islas Pelada y Llancahué, las pendientes presentan una dirección oeste (W). Por lo tanto, las costas que forman las laderas contrarias, presentan una dirección este (E). Sin embargo, en la costa norte del canal Llancahué, y en las costas sur de las islas Pelada y Llancahué, la dirección de pendientes es esencialmente sur (S). Hacia el interior del continente, debido a que la dirección de las aguas es de este a oeste, las quebradas que desembocan al canal Cholgo, y el fiordo Quintumpeu poseen un aspecto que varía entre norte (N) y sur (S) según la ladera en cuestión (figura 2.7.).

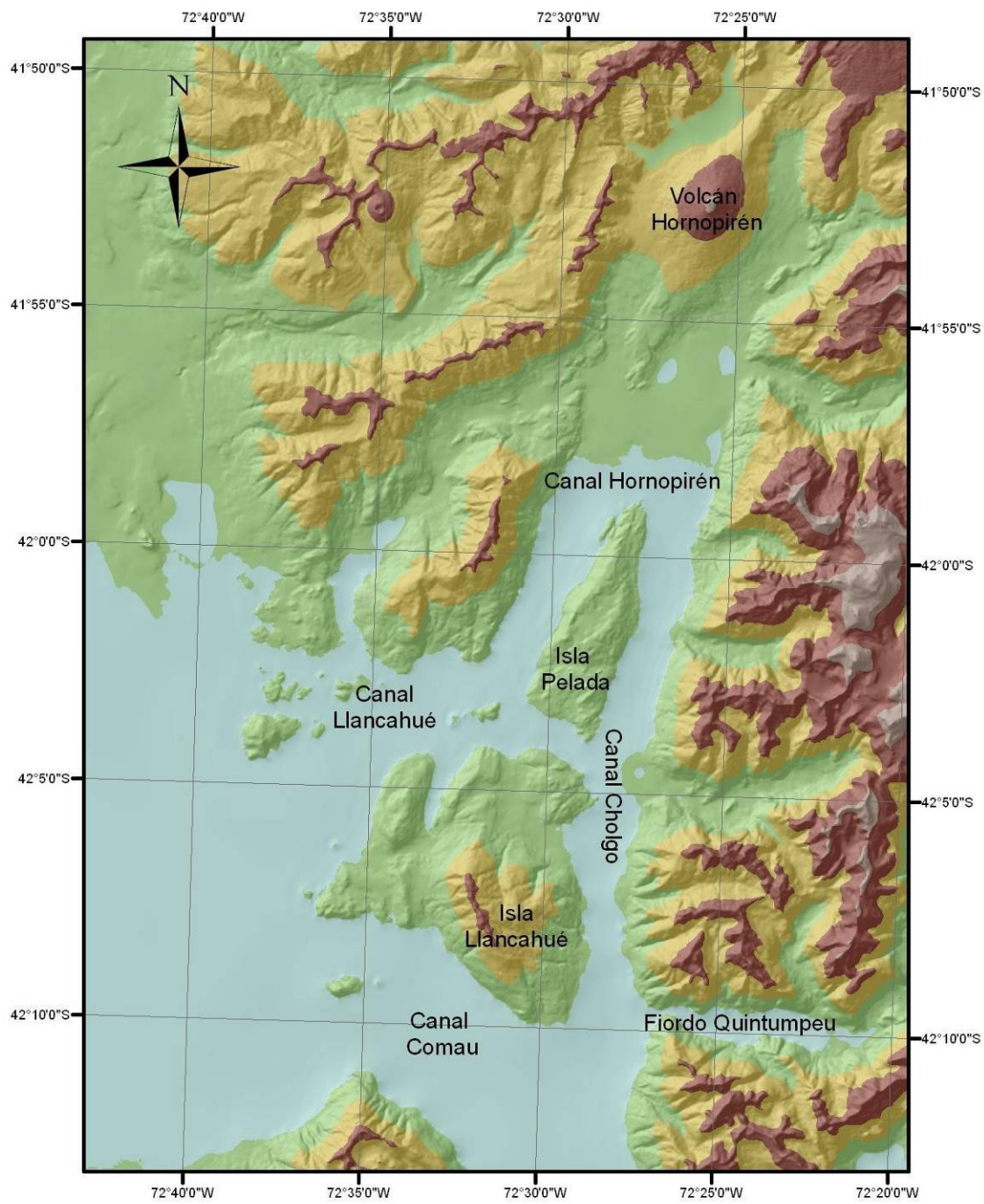
Relieve Sombreado a partir de un Modelo de Elevación Digital (MED)



Leyenda

 **Zona de estudio**

Figura 2.4.: Relieve sombreado a partir de un modelo de elevación digital (MED) de la zona de estudio



Leyenda: Altura (m)

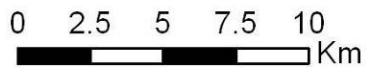
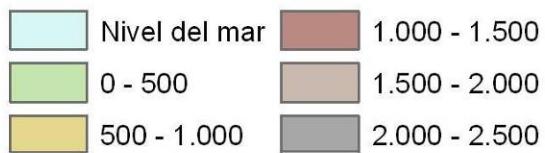


Figura 2.5.: Mapa hipsométrico.

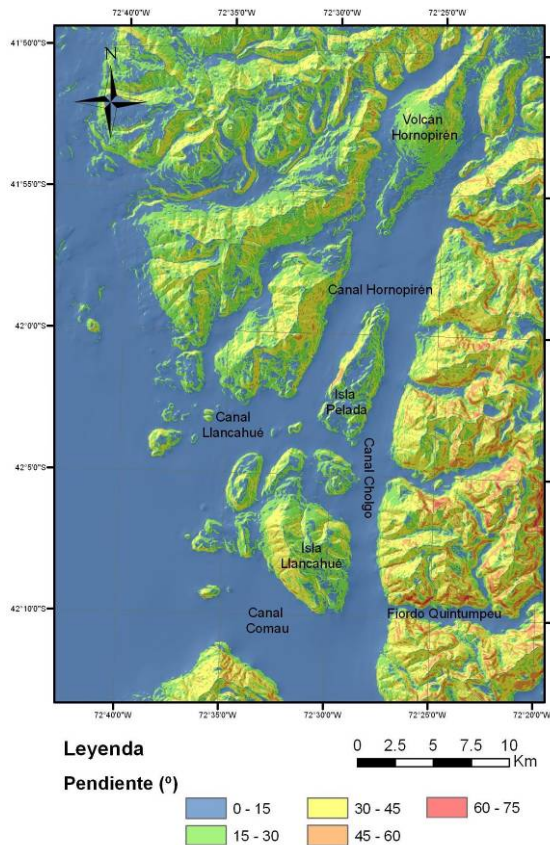


Figura 2.6.: Mapa de pendientes.

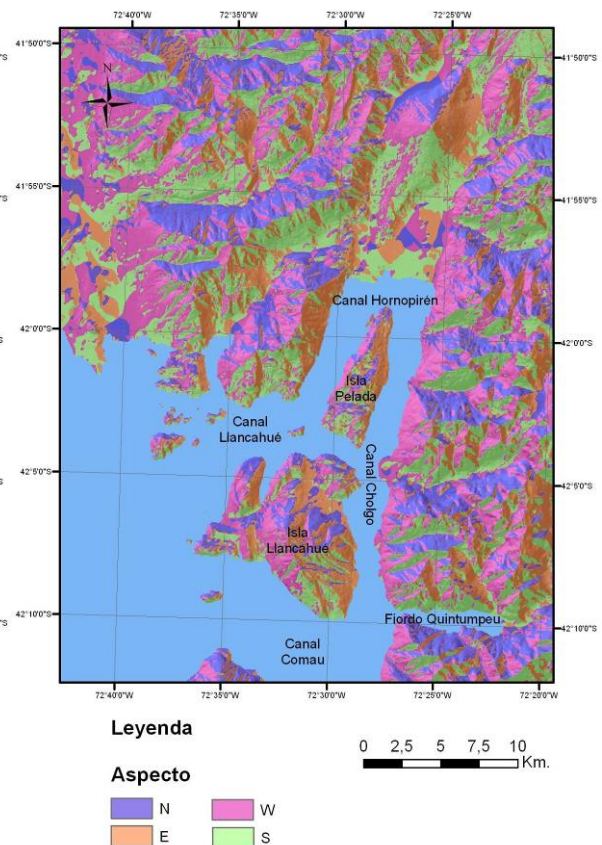


Figura 2.7.: Mapa de dirección de pendientes.

Las playas son escasas y pequeñas (figura 2.8.). Éstas se encuentran en la costa sur de la isla Pelada, la isla Llancahué, y en las desembocaduras de las quebradas presentes en la costa este del canal Cholgo.

Los principales ríos de la zona de estudio son los ríos Negro, y Blanco, los cuales desembocan en el canal Hornopirén. Son de origen glacial, y pasan de ser un río recto a uno anastomosado hacia la desembocadura, debido a la baja pendiente (figura 2.9.). Por esta razón en la desembocadura se encuentran múltiples cursos de agua separados por grandes superficies de inundación. Se presentan depósitos de canal, levées, marismas, y lóbulos de derrame.

En los piedemontes de la costa este del canal Cholgo, se pueden observar abanicos aluviales de dimensiones variables. Sus depósitos se caracterizan por su morfología conoidal, y por la presencia de clastos angulares a redondeados, y de mala selección.



Figura 2.8.: Playa en la costa este del canal Cholgo



Figura 2.9.: Desembocadura río Negro.

2.3.2. Geología

La geología del área de estudio se presenta en la figura 2.10., y se describe a continuación:

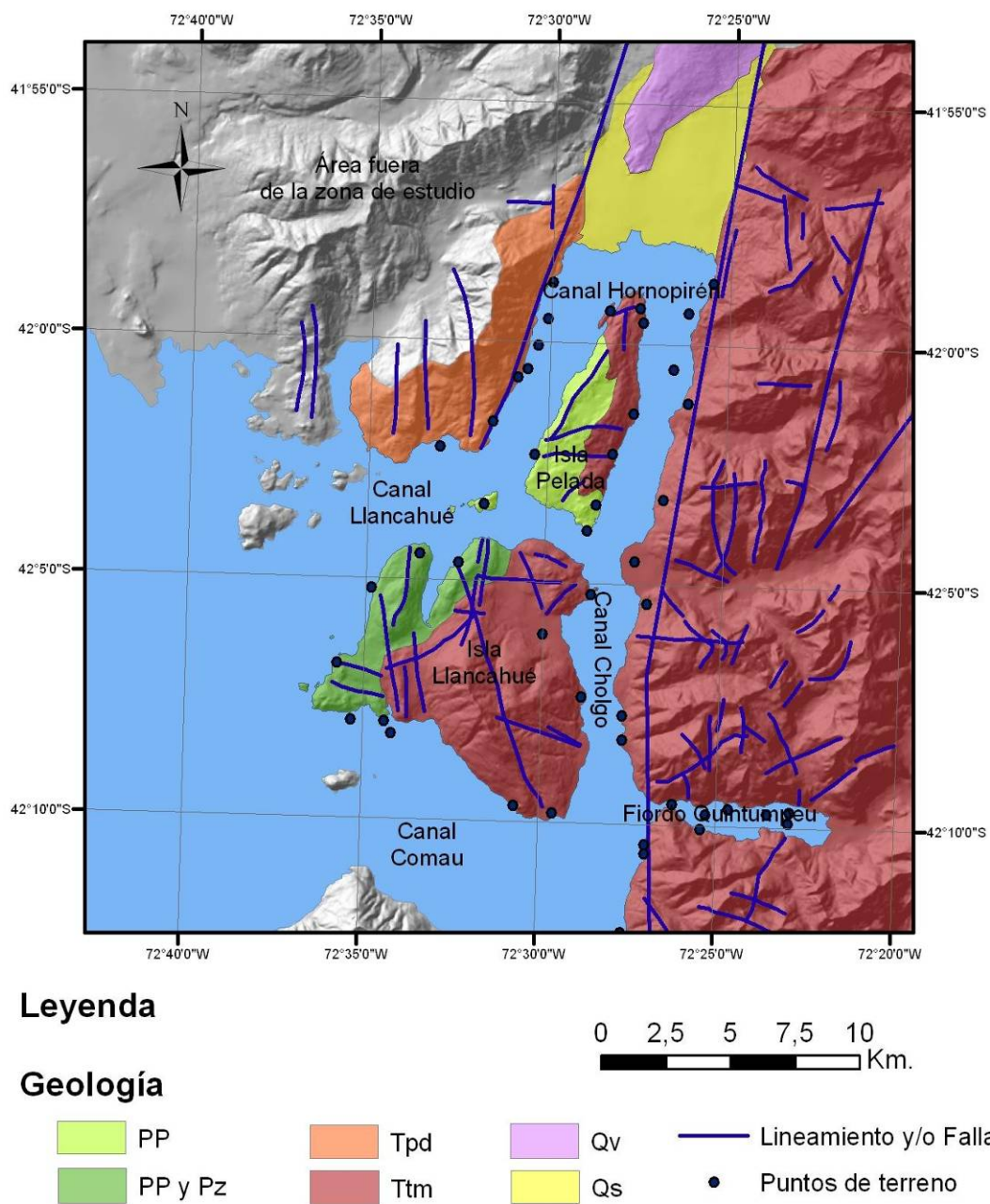


Figura 2.10.: Mapa geológico de la zona de estudio.

- Rocas metamórficas, sedimentarias y volcánicas.

- Precámbrico (?) y/o Paleozoico Inferior (?) (PP)

Los afloramientos de esta unidad abarcan aproximadamente la mitad suroeste de la isla Pelada (figura 2.12.), la isla Cabras (figura 2.11.), y zonas de la mitad oeste de la isla Llancahué. Corresponden a esquistos verdes de textura lepidoblástica, fábrica planar, y estructura homogénea (ver anexo B, muestras N° 333, 334, 335). Poseen una esquistosidad variable, con un rumbo y manteo promedio de $N8^{\circ} W / 77^{\circ} E$. Esta unidad se encuentra intruída por rocas graníticas de edad terciaria y/o cretácica.



Figura 2.11.: Afloramiento unidad PP en isla Cabras.



Figura 2.12.: Afloramiento unidad PP en Isla Pelada

Gracias al corte transparente realizado a la muestra N° 333 (ver anexo C), se puede decir que algunos de estos afloramientos están compuestos por: 50% cuarzo; 30% arcillas; 10% plagioclasas; 7% muscovita; 3% ortoclasa (figura 2.13.). Debido a la presencia de muscovita se podría inferir un protolito pelítico.

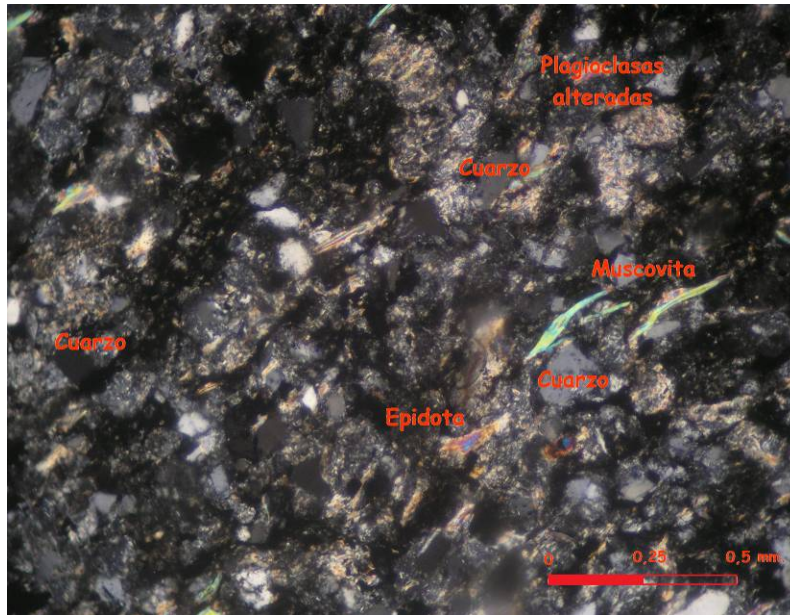


Figura 2.13.: Corte transparente de la muestra N° 333 a nicoles cruzados.

- Paleozoico (Pz)

Esta unidad se presenta como afloramientos aislados, y mezclados con los afloramientos de la unidad PP, en la zona noroeste de la isla Llancahué; es decir, en la costa sureste del canal Llancahué. Corresponden principalmente a rocas clásticas de color gris, de matriz foliada (figura 2.14.). Los clastos en su mayoría son andesitas y poseen un tamaño que varía entre los 1-10 cm. Esta unidad se encuentra intruída por rocas de composición andesítica, de color gris verdoso, y tamaño de grano fino a muy fino (figura 2.15.; ver anexo C, corte 328).



Figura 2.14.: Afloramiento unidad Pz.

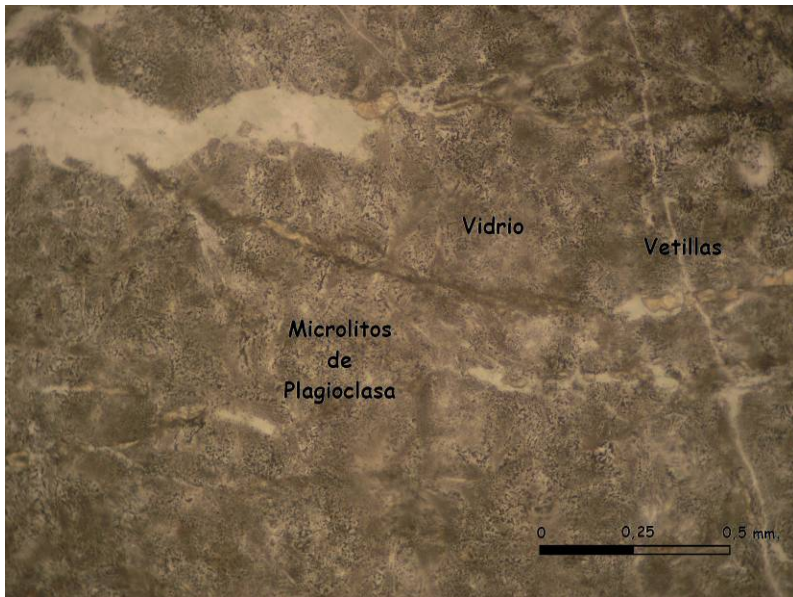


Figura 2.15.: Intrusivo hipabisal de composición andesítica, corte 328 a nículos paralelos.

- Rocas Intrusivas.

- Ttm

Los afloramientos se presentan en la costa oriental del canal Hornopirén (figura 2.16.), costa oriental de las islas Pelada y Llancahué, borde oriental del canal Cholgo, y en las costas del fiordo Quintumpeu.

En el margen oriental de canal Cholgo, la roca corresponde a granitoides monzodioríticos gneissicos de color gris, grano medio, y con bandeamiento variable. Su textura es fanerítica e hipidiomórfica. Los minerales alineados son máficos, principalmente anfíbolos y piroxenos, que existen en gran cantidad (figura 2.17.) (ver anexo B, muestras N° 332, 337, 340, 359, 365). También posee inclusiones máficas. La roca está intruída por diques andesíticos de grano fino.

En las costas del fiordo Quitumpeu, los afloramientos son muy similares; sin embargo, además de presentarse los minerales máficos alineados, se pueden encontrar como cúmulos (figura 2.18.).

En el borde oriental de las Islas Pelada y Llancahué, la roca presenta inclusiones o bandas de tamaño variable (milimétrico-métrico) de rocas córneas de piroxeno.



Figura 2.16.: Afloramiento unidad Ttm, borde oriental del canal Hornopirén.



Figura 2.17.: Muestra N° 365, obtenida de un afloramiento presente en el borde oriental del canal Cholgo.



Figura 2.18.: Cúmulos de minerales máficos de la unidad Ttm, costas del fiordo Quintumpeu.

- Tpd:

En la costa norte del canal Llancahué, frente al fiordo Andrade (figura 2.19.), se presentan cuerpos y filones de pórfidos dioríticos, tonalíticos y microdioritas, de espesores métricos. Los pórfidos dioríticos y tonalíticos son de color gris verdoso claro y textura porfírica (ver anexo B, muestras N° 321, 321 A, 325, 326, 327). Las microdioritas son de color gris oscuro, textura afanítica, y presentan mineralización de calcopirita - pirita diseminada y en vetillas (figura 2.20.; ver anexo C).



Figura 2.19.: Afloramiento un Tpd, costa norte del canal Llancahué.

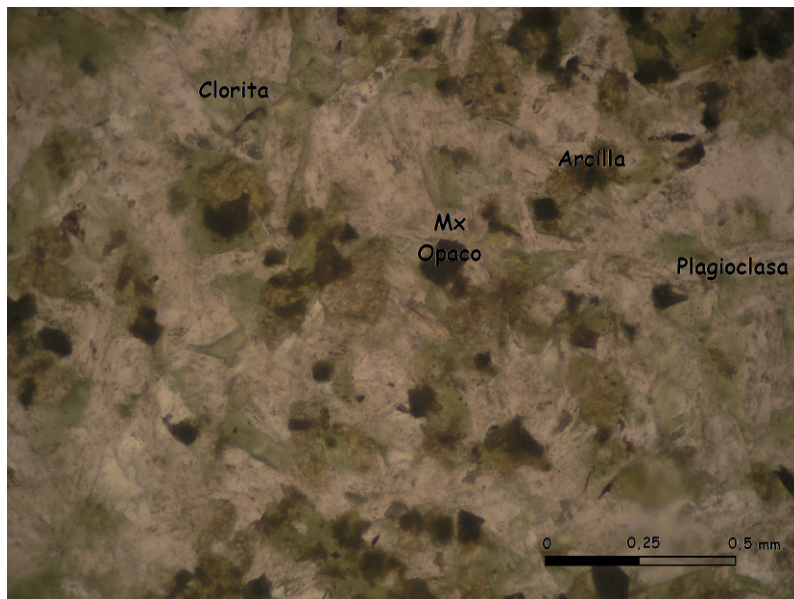


Figura 2.20.: Diorita, corte 327 a nícoles paralelos.

- Cuaternario

Los sedimentos recientes (Qs) consisten en mantos de ripio, grava, arena, limo y arcilla, que van desde algunos centímetros hasta varios metros de espesor. Poseen un origen aluvial y fluvial. Sin embargo, la mayor parte de éstos, y en especial los sedimentos de menor tamaño de grano, corresponden a los depósitos generados por los ríos Negro y Blanco, los cuales se encuentran principalmente al sur del volcán Hornopirén (figura 2.21.). El resto de los depósitos, se encuentran en la costa este del canal Cholgo, tanto en las desembocaduras de las quebradas, como en los piedemontes.



Figura 2.21.: Depósitos fluviales (Qs)

Los materiales volcánicos (Qv) corresponden fundamentalmente a los depósitos del volcán Hornopirén (figuras 2.22., 2.23.). Son esencialmente basaltos, andesitas, arena volcánica, y pómez.



Figura 2.22.: Volcán Hornopirén



Figura 2.23.: Volcán Hornopirén

2.3.3 Estructura

La zona de estudio se puede dividir en dos sectores gracias a la traza de la falla principal de la Zona de Falla Liquiñe-Ofqui (ZFLO). Esta falla presenta una dirección NNE, y se encuentra paralela a la costa este del canal Cholgo.

En distintos puntos de la zona de estudio se recogieron las orientaciones de las diaclasas que presentan los afloramientos, las cuales fueron agrupadas según la ubicación que poseen los puntos con respecto al canal Cholgo (figura 2.24., y 2.25.). Es por ésto, que en los gráficos se puede observar que existe una gran concentración de polos de estructuras dispersos en los diagramas.

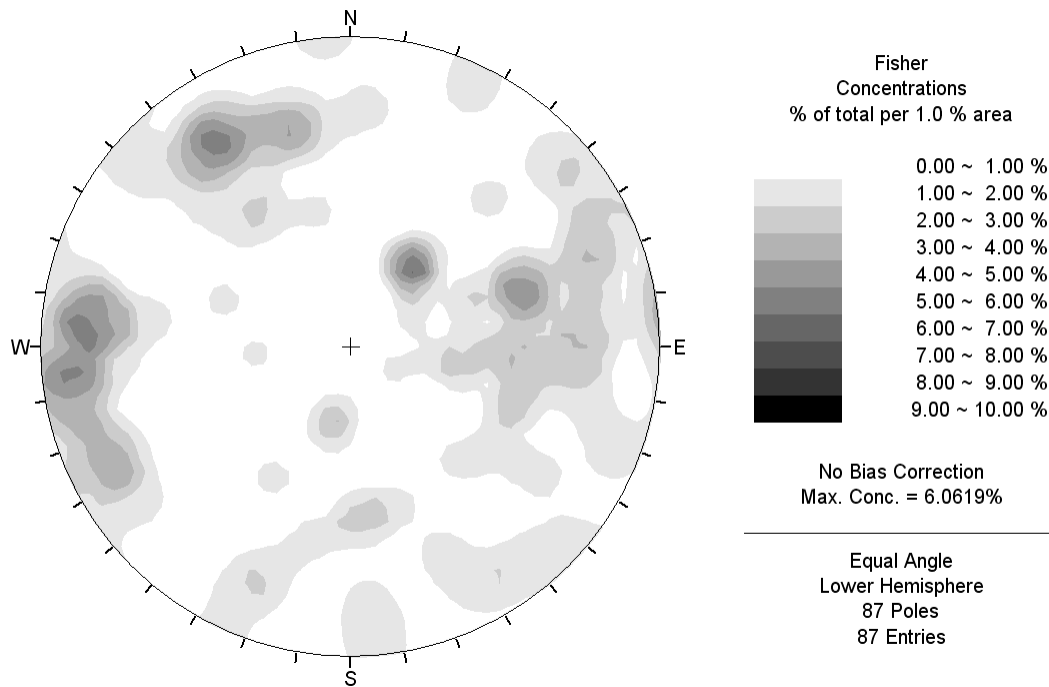


Figura 2.24.: Diagrama de concentración de polos de las estructuras al E del canal Cholgo.

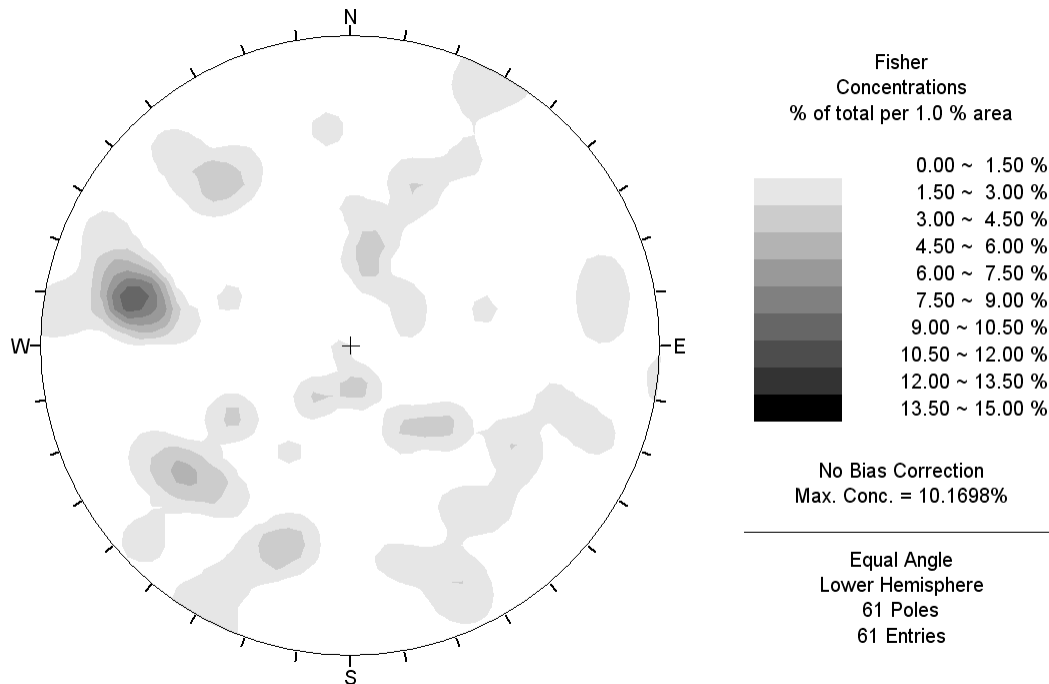


Figura 2.25.: Diagrama de concentración de polos de las estructuras al W del canal Cholgo.

Según la concentración de polos en los diagramas anteriores, se seleccionaron algunos sets de estructuras principales. Al este del canal Cholgo, donde se encuentran los afloramientos de la unidad intrusiva Ttm, se presenta una serie de lineamientos paralelos al rumbo del canal. De las estructuras medidas se puede observar que existe un set principal que posee una orientación de Dip/Direction (Dip/Dir) $82^{\circ}/091^{\circ}$. Otros sets que se presentan en menor cantidad que el anterior tienen las siguientes orientaciones Dip/Dir: $61^{\circ}/251^{\circ}$; $77^{\circ}/146^{\circ}$; $36^{\circ}/218^{\circ}$ (figura 2.26.).

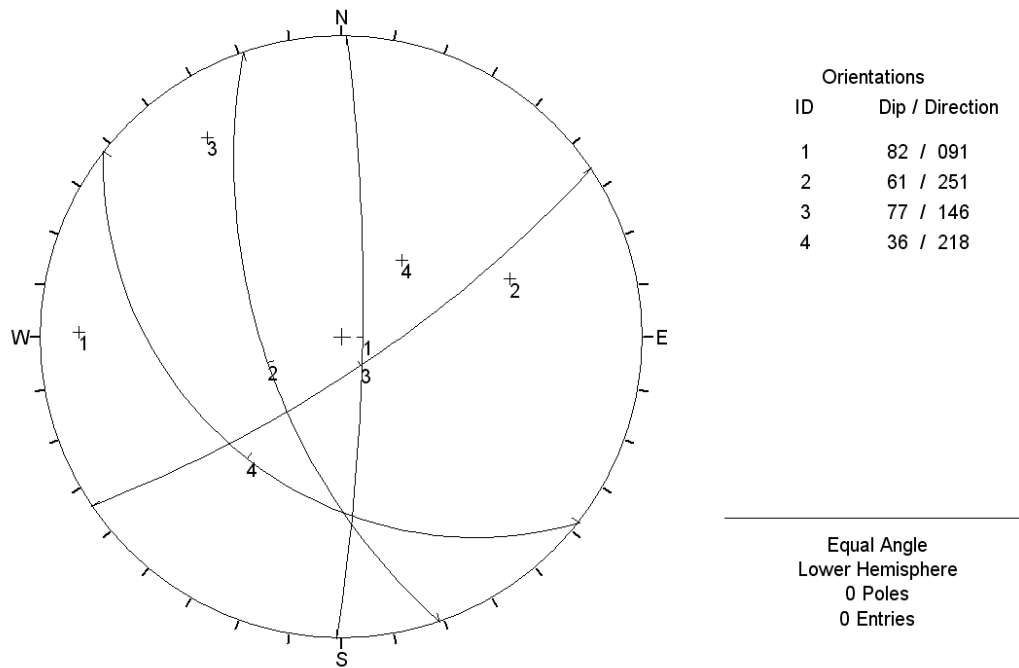


Figura 2.26.: Polos y planos de los sets estructurales al E del canal Cholgo.

Al oeste del canal Cholgo, los lineamientos poseen un rumbo NNW y NS. Las estructuras medidas se pueden agrupar en dos sets principales con direcciones Dip/Dir de $71^{\circ}/102^{\circ}$, y $67^{\circ}/051^{\circ}$. Del primer set existe una mayor población de estructuras, y se puede correlacionar con el set principal que se encuentra al este (E) del canal Cholgo. Por lo tanto, se puede decir que, estos sets están asociados directamente los movimientos de las fallas principales de la zona de estudio (figura 2.27.).

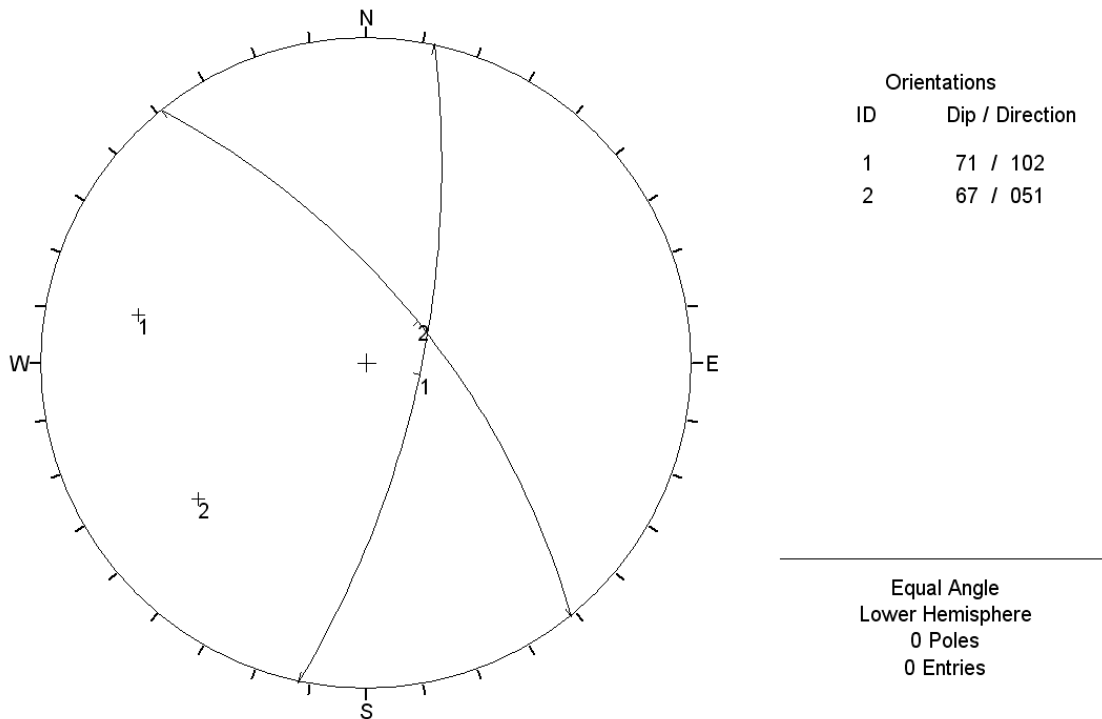


Figura 2.27.: Polos y planos de los sets estructurales al W del canal Cholgo.

Del mismo modo, se puede observar que las direcciones de los planos de foliación presentes en las unidades PP, y Pz, también son similares (Dip/Dir: 78°/082°; figuras 2.28., y 2.29.) a las disposiciones de la estructuras principales que existen tanto al E como al W del canal Cholgo. Por lo tanto, se pueden relacionar a los movimientos de las fallas. Al comparar el resultado obtenido con las mediciones presentes en Lange *et al.* 2008, se puede observar que las direcciones Dip/Dir de foliación son bastante similares; los rumbos de las foliaciones varían aproximadamente entre NNW- NS, y los manteos en general varían entre 70° y 80° al E (figura 2.30.). Sin embargo, entre las islas Pelada y Llancahué, los manteos reportados son menores, ya que varían entre 48°-56°.

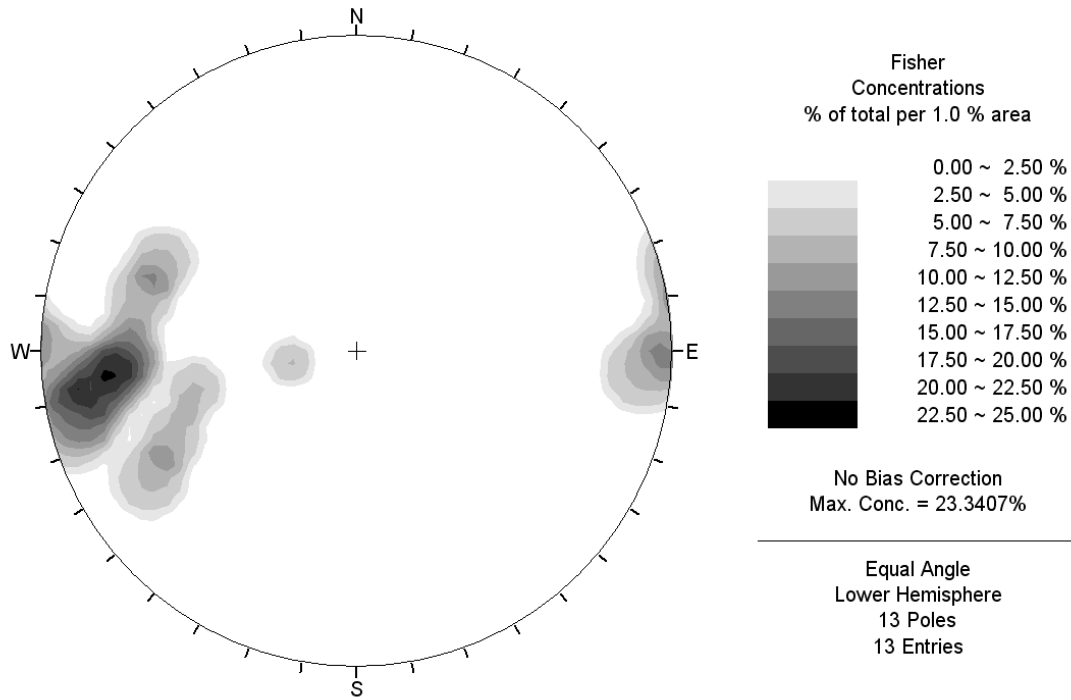


Figura 2.28.: Diagrama concentración de polos de la foliación en rocas paleozoicas.

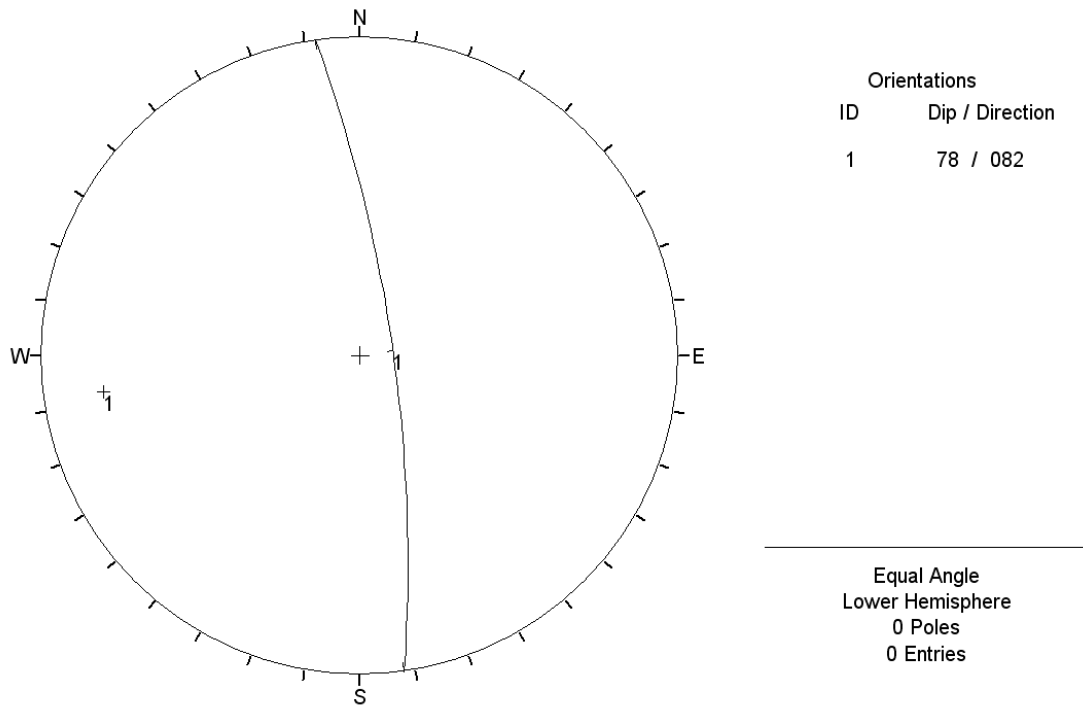


Figura 2.29.: Diagrama de polo y plano de la foliación principal en rocas paleozoicas.

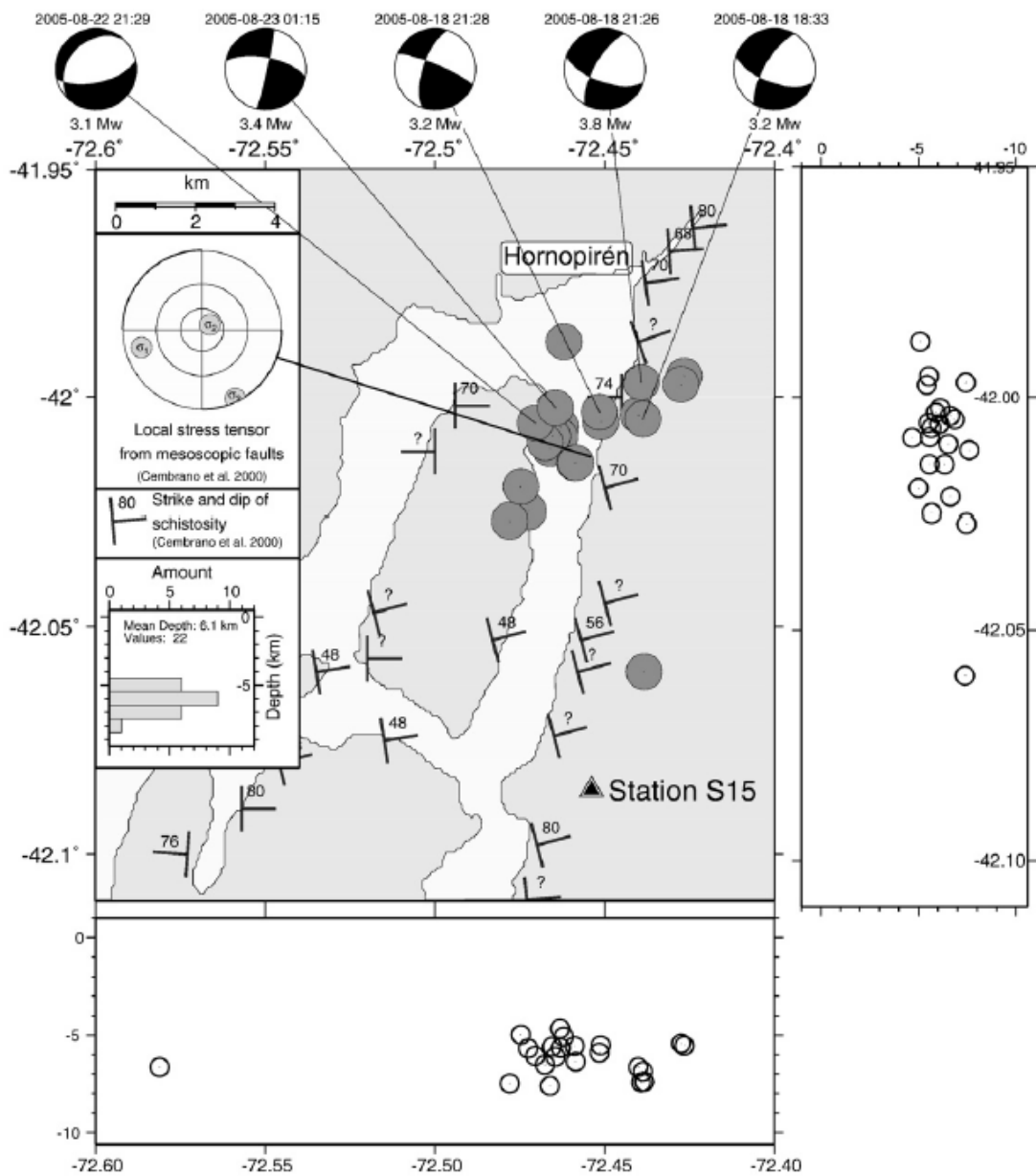


Figura 2.30.: Imagen obtenida de Lange *et al.* 2008, muestra de la sismicidad registrada en agosto del 2005, además de las mediciones de foliación registradas en Cembrano *et al.* 2000.

2.3.4. Sismicidad de la Zona de Estudio

La sismicidad observada en la zona de estudio está directamente relacionada con los movimientos que presenta la ZFLO. Debido a que los sismos son corticales, la profundidad de sus hipocentros no supera los 20 km.

Entre diciembre del 2004 y noviembre del 2005, se registraron 33 eventos con un M_w entre 2 y 3. Los hipocentros se localizaron aproximadamente 10 km. al sur de Hornopirén, y con una profundidad menor a los 10 km. (Lange *et al.* 2008).

En el año 2008, se obtuvo un registro de 84 eventos. Alrededor de un 74% de ellos, está concentrado en el mes de junio. La magnitud de la amplitud (M_L) de éstos varía entre 0 y 4. Sin embargo, durante el mes de mayo de este mismo año, se obtuvo un registro de M_L 5.4. La profundidad promedio de los eventos registrados es aproximadamente 7,8 km. A comienzos del 2009, especialmente durante el mes de enero, continuó el registro de sismos de condiciones parecidas.

Cabe destacar que la distribución de los sismos registrados entre los años 2005-2009 en la zona de estudio es dispersa (figura 2.31.).

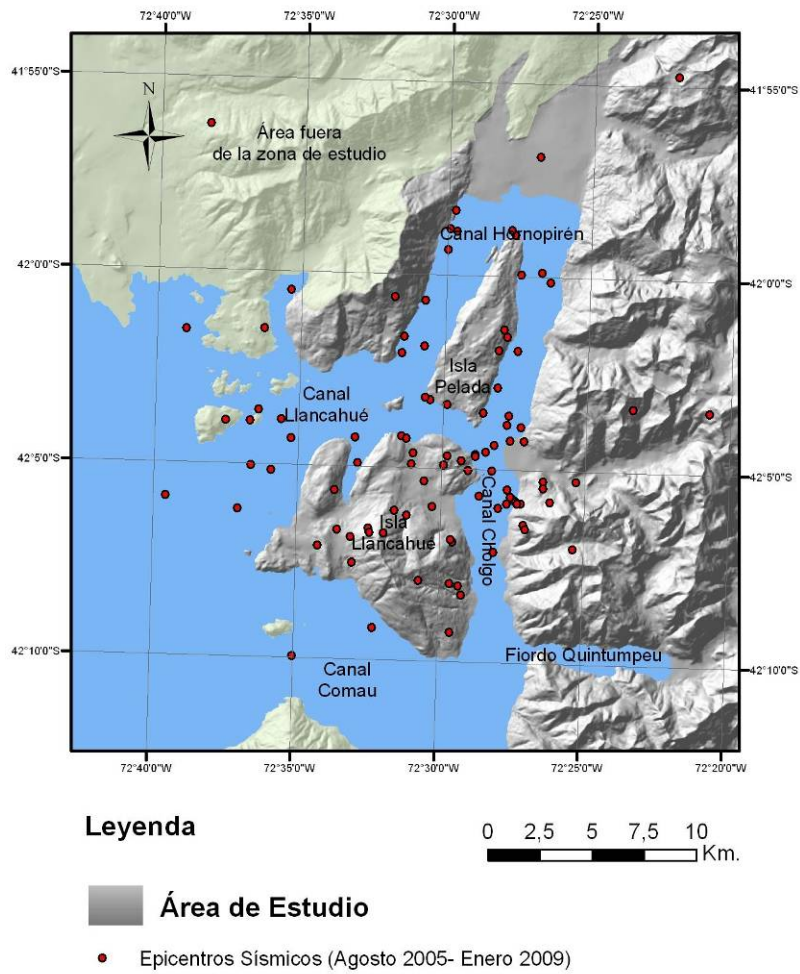


Figura 2.31.: Distribución de los epicentros sísmicos registrados por el Servicio Sicológico Nacional (SSN) entre Agosto 2005- Enero 2009.

3. METODOLOGÍA DE TRABAJO

3.1. Introducción

La ocurrencia de remociones en masa depende de una compleja interacción de varios factores interrelacionados. Los análisis de susceptibilidad de remociones en masa requieren la evaluación de las relaciones existentes entre las condiciones de terreno y las remociones acontecidas.

Para los análisis de estos estudios es común el uso de un sistema de información geográfica (GIS, Geographic Information System), el cual consiste en el manejo espacial de datos a través de un sistema computarizado. El término “geográfico” implica que la ubicación de los distintos datos es conocida, o puede ser calculada en términos de coordenadas geográficas (latitud, longitud). El manejo de mapas, imágenes digitales, y tablas de datos es posible con GIS, ya que está diseñado para juntar datos espaciales que provienen de distintas fuentes, y presentarlos juntos en una sola base de datos. Además, GIS permite la manipulación y el análisis individual de cada uno de los datos espaciales, y provee herramientas para estudiar y modelar las interrelaciones presentes entre ellos (Boham-Carter, 1996).

En un sentido muy general, un modelo GIS puede ser pensado como un proceso de combinaciones de los mapas de entrada por medio de una función que genera un mapa de salida (Boham-Carter, 1996):

$$\text{Mapa de salida} = f(2 \text{ o más mapas de entrada}).$$

La función “f” puede estar basada en fundamentos teóricos, como por ejemplo principios físicos o químicos. También puede ser empírica, basada en observaciones de los

datos. O sino simplemente una combinación entre lo teórico y lo empírico (Boham-Carter, 1996). Gracias a esto, GIS además de permitir el almacenamiento y la manipulación de la información concerniente a los distintos factores de terreno, representados por una determinada capa o “layer”, provee excelentes herramientas para la zonación de la susceptibilidad de las remociones en masa.

El término “zonación” se refiere a la división del terreno en dominios o áreas homogéneas según el grado de actual o potencial peligro que se puede provocar por la ocurrencia de remociones en masa (Varnes, 1984). La zonación requiere de un detallado conocimiento de los procesos y factores que están, o han sido activos, en un área donde existe una potencial susceptibilidad a las remociones en masa.

La predicción de la susceptibilidad de remociones en masa se basa en el asumir que los eventos ocurridos en el pasado entregan información predictiva sobre las condiciones necesarias para la ubicación de futuros eventos (Soeters & Van Westen, 1996). Por esta razón, el mapeo de las remociones en masa, y de los distintos factores que influyen a estos fenómenos es muy importante. Cada factor es representado por un mapa individual (“data layer map”) que contiene ciertos datos. Al emplear GIS es importante que cada “data layer map” esté compuesto por sólo un tipo de elemento de datos (por ejemplo: puntos, líneas, polígonos), y que posea una o varias tablas de atributos, donde se definen las características de cada dato.

Para realizar los análisis de susceptibilidad existe una serie de métodos: heurísticos, estadísticos, y determinísticos (Soeters & Van Westen, 1996). La primera aproximación a la zonación de la susceptibilidad de remociones en masa de un terreno se obtiene con el inventario de remociones en masa, ya que entrega una distribución espacial de los fenómenos.

En los métodos heurísticos, la zonación de un área se realiza mediante la observación geomorfológica directa de un experto, quien se basa principalmente en sus conocimientos y experiencia. Esta evaluación es subjetiva, ya que no sigue reglas que

puedan ser repetidas por otro evaluador. En algunos casos, el evaluador utiliza de ayuda una “lista de chequeo” donde ciertos parámetros poseen un peso, disminuyendo así la subjetividad.

En los métodos estadísticos, la combinación de factores que generaron remociones en masa en el pasado son determinados estadísticamente; además, de determinar una predicción cuantitativa en áreas libres de remociones en masa y de condiciones similares. Existen dos tipos de análisis estadísticos: bivariado, y multivariado; los cuales se describen a continuación con más detalle.

Los métodos determinísticos son un tipo de aproximación que envuelve análisis de sitios o pendientes específicas en términos ingenieriles (Aleotti & Chowdhury, 1999). Por lo tanto, son aplicables sólo cuando las condiciones geomorfológicas, y geológicas son homogéneas en toda el área de estudio, y los tipos de remociones en masa son simples. Corresponde a un análisis cuantitativo en el que se calcula el factor de seguridad de cada ladera. Usualmente, es aplicado en deslizamientos de tipo traslacional (Ward *et al.* 1982). Generalmente, este tipo de métodos requiere el uso de modelos de simulación de las napas subterráneas (Okimura & Kawatani, 1986).

3.2. Uso de Métodos Estadísticos en Análisis de Susceptibilidad de Remociones en Masa.

La asignación de un valor “peso” de manera subjetiva a los distintos, y variados factores que determinan la estabilidad de las laderas, representa la mayor limitación de las metodologías cualitativas. La solución a este problema puede ser adoptada por medio de aproximaciones estadísticas que comparan la distribución de las remociones en masa con los parámetros que han sido considerados. Los resultados pueden ser aplicados en áreas libres de remociones, pero donde las condiciones de susceptibilidad pueden existir para futuras inestabilidades (Aleotti & Chowdhury, 1999). La mayor dificultad consiste en

establecer los procesos que desestabilizan a las laderas, para poder de forma sistemática identificar, y evaluar los diferentes factores relacionados a la remoción (Carrara, 1988). El uso de GIS hace que estas operaciones se realicen con mayor facilidad, y en gran medida explican el aumento de la popularidad que han tenido las aproximaciones estadísticas, en paralelo a la mayor aplicación de técnicas GIS (Aleotti & Chowdhury, 1999).

Dentro de los métodos estadísticos, existen dos grupos significativos en la literatura de análisis de susceptibilidad de remociones en masa, los métodos bivariado y multivariado (Süzen & Doyuran, 2003). En los análisis estadísticos bivariados, cada mapa factor (por ejemplo, pendiente, geología, usos de la tierra) es combinado con el mapa de distribución de remociones en masa (inventario). Luego, valores de “peso” son calculados para cada parámetro de cada clase (por ejemplo, tipo de pendiente, unidades geológicas, tipos de usos de tierra) según la densidad de remociones. La ventaja de este método es su fácil aplicación. En los análisis estadísticos multivariados, los factores relevantes son muestreados simultáneamente en una grilla, o en unidades morfométricas. La presencia o ausencia de remociones en cada unidad es determinada, resultando así una matriz que luego es analizada utilizando análisis de regresión múltiples o análisis discriminantes. La ventaja de este método es que permite determinar las relaciones que presentan los distintos factores entre sí. Este tipo de análisis ha sido implementado recientemente en Chile Central por Schachter (2008) y Stumpf (2008).

El método bivariado y multivariado poseen en común la escala de trabajo recomendada. La escala recomendada para este tipo de análisis es una escala “media” (por ejemplo: 1: 25.000), ya que para trabajos de escala regional (1:50.000; 1:100.000) se recomiendan los métodos heurísticos, y para análisis a escala local (1:10.000) se prefieren los métodos determinísticos (Soeters & Van Westen, 1996).

Otro aspecto que poseen en común ambos métodos, son los datos (“layers”) requeridos para realizar un análisis, los cuales son geomorfológicos, topográficos, geológicos, el uso de la tierra, y relativos a la hidrología. Dentro de los datos geomorfológicos se encuentran la descripción de las unidades o subunidades

geomorfológicas de la zona, además de la clasificación y descripción de las remociones en masa recientes, lo que incluye determinar el tipo de remoción, sus profundidades, dimensiones, etc. De los datos topográficos necesarios se encuentra el modelo de elevación digital, el mapa de pendientes, el mapa de dirección de pendientes, largo de las pendientes, y la curvatura de las laderas. Dependiendo del método, los datos topográficos se pueden clasificar según ciertos rangos, para determinar distintas clases de cada uno de los factores (clases de altura, de pendientes, de dirección, etc.). Sin embargo, si el método no requiere esta clasificación, se utilizan como variables continuas. Los principales datos geológicos a considerar en un análisis estadístico, son la litología y la geología estructural. En la litología, además de los tipos de rocas, se debe incluir la resistencia de éstas, y el espaciamiento que presentan sus discontinuidades. En la geología estructural de la zona se determinan los tipos de fallas, y los ejes de pliegues de la zona, junto con sus largos, dirección, etc. Relacionado al uso de la tierra es importante tener información de las infraestructuras recientes presentes en el área de estudio, como también un mapa de los usos de la tierra, donde se determine el tipo de uso, densidad de vegetación, profundidad de raíces, etc. Por último, de los datos hidrológicos, es importante tener información del drenaje de la zona, con información de su orden, tipo, largo, entre otros. (Soeters & Van Westen, 1996).

El modelo más simple corresponde a un análisis estadístico bivariado, donde se determina el valor del umbral en el cual la inclinación o el ángulo de pendiente, es considerado inestable según la presencia de un determinado tipo litológico (Brabb *et al.* 1972; Nielsen *et al.* 1979; Pomeroy, 1979). El análisis estadístico bivariado es una aproximación comúnmente utilizada, y permite tomar en consideración numerosos parámetros: litología, ángulo de pendiente, altura de las pendientes, uso del terreno (Bortolami *et al.* 1994), distancias a las estructuras mayores, densidad de drenaje (Meherota *et al.* 1994), distancia a las líneas de drenaje (Choubey *et al.* 1992), morfologías del relieve (Sorriso Valvo *et al.* 1996), dirección de las pendientes, distancia al poblado, a las carreteras (Süzen & Doyuran, 2003).

A pesar de que los análisis estadísticos multivariados han sido exitosamente aplicados en distintas áreas geológicas como la exploración de petróleo, la aplicación de este método en análisis de susceptibilidad de remociones en masa fue más tardía (Neuland 1976; Carrara *et al.* 1978). El primer estudio de zonación de peligro de remociones en masa por medio de un análisis multivariado, fue publicado en Italia por Carrara *et al.* 1983. En este método los factores cualitativos son convertidos en mapas numéricos, para así ser combinados con el mapa de unidades, y crear una matriz en que el peso de cada factor indica una contribución relativa en el grado de susceptibilidad de la unidad.

3.3. Análisis Estadístico Bivariado

El análisis estadístico bivariado consiste en combinar cada uno de los mapas de factores, con el mapa de remociones en masa. Y para cada parámetro (rango de pendiente, tipo de roca, etc) se calcula la densidad de deslizamientos, y se le asigna un peso ponderado.

Las operaciones requeridas para este análisis son las siguientes (Aleotti & Chowdhury, 1999):

- a) Selección y mapeo de los factores significantes, y su categorización en un número relevante de clases.
- b) Mapeo de las remociones en masa.
- c) Cruzamiento del mapa de remociones con el mapa de cada parámetro.
- d) Determinación de la densidad de deslizamientos en cada clase de cada factor.
- e) Definición y asignación de los valores de peso para cada parámetro.
- f) Superposición final de los mapas y cálculo de la susceptibilidad para cada unidad definida en la zona.

El núcleo del análisis es obtener el peso de cada parámetro en base a la distribución y la densidad de los movimientos en masa dentro de cada mapa factor. A pesar de que el análisis estadístico bivariado es considerado una aproximación cuantitativa al evaluar

susceptibilidades de remociones en masa, existe un grado de subjetividad especialmente en la etapa de definición y asignación de los valores de peso para cada parámetro. Además, hay que tener presente que en muchas situaciones, los factores analizados no son independientes, y pueden poseer una alta o baja correlación entre sí (Leroi 1996).

Para determinar la densidad de remociones en masa dentro de cada mapa factor según sus distintas clases, se realiza un cálculo basado en la cantidad de píxeles que poseen determinada clase-factor, y la cantidad de píxeles que, además de tener esa clase-factor, presentan evidencias de remociones en masa. Luego, para obtener el peso de cada parámetro se compara la densidad calculada, con la densidad en toda la zona de estudio.

En resumen, los cálculos del análisis se realizan de la siguiente manera (Süzen & Doyuran, 2003):

$$D \text{ area} = 1000 \text{ Npix} (SXi) / \text{Npix} (Xi) ,$$

donde,

$D \text{ area}$ = densidad areal de píxeles con remociones en masa dentro de la variable clase Xi.

$\text{Npix} (Xi)$ = número de píxeles dentro de la variable clase Xi.

$\text{Npix} (SXi)$ = número de píxeles con remociones en masa dentro de la variable clase Xi.

Para evaluar la influencia de cada variable, el peso de cada factor se introduce por comparación de la densidad calculada con la densidad en toda el área de la zona de estudio. Es decir,

$$W \text{ area} = [1000 \text{ Npix} (SXi) / \text{Npix} (Xi)] - [1000 \sum \text{Npix}(SXi) / \sum \text{Npix}(Xi)].$$

Otra manera de calcular el peso de cada factor según su clase, es basándose en la siguiente fórmula (Yin & Yang, 1988; van Westen, 1993):

$$W_i = \ln [DensClas / DensMap] = \ln [(NpixXi / NpixNi) / (\sum NpixXi / \sum NpixNi)],$$

donde, W_i corresponde al valor de peso de la clase i , $DensClas$ es la densidad de remociones en masa en la clase i ; $DensMap$ es la densidad de remociones en toda la zona de estudio; $NpixXi$ es el número de píxeles que caen dentro de los polígonos que representan remociones en masa con clase i ; $NpixNi$ es el número de píxeles dentro de la clase i ; $\sum NpixXi$ es el número total de píxeles que caen dentro de los polígonos de remociones en masas en toda la zona de estudio; $\sum NpixNi$ es el número total de píxeles de toda la zona de estudio.

La densidad calculada corresponde al peso relativo de contribución de esa “clase-factor” a la susceptibilidad de remociones en masa. Al sumar todos estos valores, se obtiene un valor integrado de susceptibilidad para estos fenómenos:

$$Susceptibilidad\ de\ Remociones\ en\ Masa = \sum W_i.$$

La clasificación final en clases alta, media, y baja se realiza después de evaluar la proporción de remociones en masa que coincide con los valores mayores de susceptibilidad (en términos de número de píxeles coincidentes). Cualitativamente, una zona que presenta susceptibilidad alta corresponde a sectores en que las condiciones físicas del terreno hacen que éste sea más proclive a la generación de remociones en masa. Una zona de susceptibilidad media se encuentra en sectores en que, de acuerdo a los factores utilizados y al catastro de remociones en masa, la posibilidad de ocurrencia de remociones en masa es intermedia. Por último, sectores en que la generación de remociones en masa es menos probable, corresponden a zonas de susceptibilidad baja (Arenas *et al.* 2008). Es necesario hacer notar que baja susceptibilidad no implica que en estos sectores no puedan ocurrir estos fenómenos. Cuantitativamente, Van Westen (2002), propone realizar la clasificación según porcentajes de deslizamientos. Por ejemplo, se puede definir como alta

susceptibilidad, la clase donde se encuentra sobre un 80% de las remociones en masa; la clase de susceptibilidad moderada, donde se presentan entre un 79% y 19% de las remociones en masa, y la clase de baja susceptibilidad, donde existen menos de un 18% de evidencias. En Ayalew *et al.* (2005), para la determinación de las clases de susceptibilidad se hizo un pequeño análisis. Se observó que si la clasificación hubiera sido basada en porcentajes, se presentaba la desventaja de obtener un rango muy amplio, donde un gran número de valores distintos caían dentro de una misma clase. Lo mismo ocurría al hacer la división de las clases por intervalos iguales, ya que se enfatizaba una clase con respecto a las otras. Luego, al tratar de hacer una clasificación según quiebres naturales, se observó que es necesario que existan grandes saltos en los valores, para que esta clasificación sea buena. Finalmente, se realizó la clasificación con el método “desviación estándar”, en el cual se utilizan los promedios para generar clases de quiebres, sumando o restando la desviación estándar.

Debido a que numerosos parámetros pueden ser considerados para el análisis, las conclusiones obtenidas sólo pueden ser aplicables en un área particular, y no pueden ser extendidas a otras regiones, a menos de que se realice un riguroso análisis previo que permita la extrapolación del método (Aleotti & Chowdhury, 1999).

3.4. Metodología del Análisis

El análisis de susceptibilidad de este trabajo se realizó por medio de un método de análisis estadístico bivariado. En este método los factores que se consideran determinantes en la inestabilidad del terreno (por ejemplo pendientes, geología, etc.), se califican para poder indicar algún grado de contribución al desequilibrio, generando mapas de factores. Luego, se combina por separado, y de una a la vez, la información de variables intrínsecas del terreno (mapas de factores condicionantes) con el catastro de remociones en masa (mapa de evidencia). Los resultados de dicha combinación son, siguiendo la metodología antes descrita, finalmente sumados para obtener un mapa con un rango de pesos (o susceptibilidades) que es luego clasificado en grados de susceptibilidad. La susceptibilidad

representa más bien la posibilidad espacial de ocurrencia y no dice relación alguna con la frecuencia temporal de la ocurrencia de remociones en masa.

Se optó por este método debido a la rapidez y relativa facilidad con que puede ser implementado en un sistema de información geográfico (GIS). También, por lo apropiado que resulta para la escala de trabajo elegida, y por la información disponible, ya que se contaba con una muestra representativa de las remociones en masa de la zona, lo que permitió realizar el mapa de evidencias.

Las principales etapas metodológicas del análisis bivariado desarrollado se detallan a continuación:

a) Selección, mapeo y categorización de factores significantes.

Gracias a la información obtenida en terreno, más la rescatada de estudios anteriores, se definieron los siguientes factores como los determinantes de la susceptibilidad de remociones sismo-inducidas:

Los rangos de valores que definen las clases para cada variable se muestran en el anexo F.

- *Pendiente*: A medida que aumenta la pendiente crece la probabilidad de ocurrencia de fenómenos de remoción en masa. Las clases definidas para este factor son: plano, débil inclinado, muy inclinado, débil escarpado, escarpado, muy escarpado.
- *Aspecto*: Corresponde a la dirección hacia donde cae (buza) la pendiente. Puede ejercer un control climático, en las condiciones de humedad y vegetación presente en el suelo, como de amplificación del movimiento sísmico, dependiendo de la dirección de propagación y otras características de la onda sísmica. Las direcciones de buzamiento posibles son: norte (N), este (E), sur (S), y oeste (W).
- *Curvatura media*: Corresponde al tipo o variación de la pendiente media, entre el sentido horizontal y vertical. Para efectos de modelamiento se clasifica en cóncava, plana o convexa. La curvatura controla las zonas de acumulación o propagación de

agua, lo que influye directamente en el grado de humedad y/o saturación del suelo o sedimento.

- *Densidad de drenaje*: Concierne a una aproximación del grado de fracturamiento de la roca. Se mide en metros (de líneas de drenaje) por km². La densidad puede ser alta, media o baja.
- *Distancia y densidad de lineamientos y fallas*: El primero corresponde a la cercanía a lineamientos y fallas inferidas, y el segundo corresponde a otra estimación del grado de fracturamiento de la roca.
- *Geología*: corresponde a las distintas unidades geológicas, según litología, presentes en la zona de estudio. Las unidades fueron definidas en la geología local (Capítulo 2, 2.3.2).
- *Distancia normalizada a la cresta*: corresponde a la razón entre la distancia desde una remoción en masa y su cresta, y el largo total de la ladera. Este factor se relaciona a la amplificación topográfica que sufren las ondas sísmicas al acercarse a las crestas, y muestra ciertas tendencias en remociones en masa cosísmicas (Meunier *et al.* (2008), Sepúlveda *et al.* (2009)).

Los 3 primeros factores condicionantes fueron calculados a partir de un modelo de elevación digital (MED), obtenido por interpolación de las curvas de nivel y cotas de elevación de las cartas 1:50.000 del Instituto Geográfico Militar de Chile (IGM). El algoritmo utilizado corresponde al método ANUDEM implementado en el software ArcGis[®] 9.3, en la herramienta Topo_to_Raster del módulo 3D Analyst[®] Tools (Raster Interpolation). La incertidumbre (o error vertical) de la interpolación, fue calculado en 20 m (con 90% nivel de confianza determinado por el método del percentil 90^{avo}). Por otro lado, el MED fue validado visualmente, ya que en los mapas generados a partir de él (relieve sombreado, pendiente) no se observan artefactos evidentes (ver figuras 2.4. y 2.7.).

Los mapas de distancias y densidades fueron calculados, utilizando herramientas implementadas en el software ArcGis[®] 9.3, a partir de la misma cartografía topográfica a escala 1:50.000 del IGM y de mapas de lineamientos y fallas. Estos últimos fueron hechos en el software ArcGis[®] 9.3, creando archivos “shapes” de líneas, a partir de interpretación

de fotografías aéreas, revisión bibliográfica, y observaciones de terreno. Para el mapa de la geología local, se creó un “shape” de polígonos.

Para poder proceder con el análisis bivariado, los mapas de factores continuos, fueron convertidos en mapas de categoría discreta. Para determinar los límites de cada clase-factor, se utilizó el criterio visual, y literatura (ver anexo F). Las clases definidas en los factores “distancia a falla” y “densidad de drenaje”, son las mismas utilizadas para los factores distancia y densidad de lineamientos respectivamente.

b) Mapeo de las remociones en masa.

El catastro de remociones en masa fue realizado mediante el traspaso de la información del mapeo ejecutado en terreno a formato digital. La información recopilada en terreno corresponde principalmente a material fotográfico, la cual se digitalizó por medio del software ArcGis® 9.3.

La definición de los tipos de remociones en masa se realizó mediante la observación de los materiales transportados por el fenómeno. Según esto, se identificaron 4 tipos de remociones, que son:

- *Caída y/o deslizamiento de roca*
- *Deslizamiento de roca-suelo*
- *Deslizamiento de suelo*
- *Flujo de detritos*

Se pudo observar una mayor antigüedad en algunas remociones (caídas y/o deslizamientos de rocas antiguas; deslizamientos de roca-suelo antiguos), debido a que en ellas se lograba observar el desarrollo de vegetación, lo que no sería posible si se trataran de fenómenos jóvenes.

c) Cruzamiento del mapa de remociones con el mapa de cada parámetro.

Para poder generar el cruzamiento del catastro de remociones en masa con el mapa de cada parámetro, se utilizó el software ILWIS 3.3 Academic. Para ello fue necesario importar los distintos mapas (catastro, y factores) creados con el software ArcGis® 9.3, al formato de ILWIS 3.3 Academic. Debido a que este software trabaja con mapas en formato “raster”, el mapa de catastro fue transformado a éste formato con la herramienta “Poligono to Raster” que posee dicho programa.

Antes de generar el cruzamiento de los distintos mapas fue necesario crear un “mapa de atributos” para cada uno de los tipos de remociones en masa. Esto se realizó modificando el código del programa (script “Weightin”) utilizado en Arenas *et al.* 2008 (ver anexo G), según los tipos de remociones definidas.

El código comienza generando 6 columnas en la tabla de atributos asociada al mapa del catastro. Cada columna corresponde a un tipo de remoción en masa, y se asigna el valor “1” cuando el polígono en cuestión está clasificado según ese tipo de remoción, e indefinido (“?”) cuando es de otro tipo. Luego, a partir de estas columnas se crean los mapas de atributos de cada tipo de remoción (abarcando toda la zona de estudio) en formato raster, donde cada pixel obtiene el valor de “1” o “?”, según si existe o no determinado tipo de remoción. Debido a la mayor complejidad de trabajar con mapas que poseen zonas indefinidas, el siguiente paso del código es reemplazar los valores indefinidos por ceros (“0”), de forma tal que los mapas sólo tengan valores 1 ó 0.

Una vez obtenidos los mapas de evidencia de cada tipo de remoción, el script “Weighting” llama a otro script, el script “Weight” (también utilizado en Arenas *et al.* 2008, ver anexo G), el cual genera el cruzamiento de los mapas. Este script comienza generando tablas que muestran el cruce de las tablas asociadas a determinado tipo de remoción con un determinado factor. Estas tablas se denominan “s%1%2”, donde “%1” corresponde al mapa factor, y “%2” representa al mapa de evidencia (por ejemplo, “sAspectoSuelo”). Al hacer esto, se genera en las tablas creadas la columna “Npix”, la cual

indica el número de pixeles de poseen o no un determinado tipo de remoción, con una determinada clase del factor. Luego en las mismas tablas se calcula la columna “Npixact”, para indicar sólo los pixeles que presentan remociones en masa.

d) Determinación de la densidad de deslizamientos en cada clase de cada factor.

Este cálculo se realiza separadamente para cada tipo de remoción, debido a que los mecanismos de ruptura son diferentes; para ello, se continúa el uso del script “Weight”.

A diferencia de la etapa anterior, ahora el script genera las columnas, “nclass” y “nclass%2”, en las tablas de atributos de cada mapa factor, a partir de cálculos realizados con los datos presentes en las tablas “s%1%2” generadas en la etapa anterior. Así, cada tabla asociada a los mapas de factores posee una columna “nclass” donde se determina el número de pixeles en la clase, y columnas “nclass%2”, donde se muestra el número de pixeles con remociones en masa (del tipo %2) en cada clase.

e) Definición, y asignación de los valores de peso para cada parámetro.

La densidad calculada corresponde al peso relativo de contribución de esa “clase-factor” a la susceptibilidad de un determinado tipo de remoción en masa. Para determinar este peso relativo, el script “Weight” continúa agregando una nueva columna en las tablas de atributos de cada factor, denominada “W%2”, la que indica el peso que ejerce cada clase del factor “%1” en el tipo de remoción “%2”, con el siguiente valor:

$$W\%2 = (100*(n\text{class}\%2*100)/n\text{class}).$$

La multiplicación de “nclass%2*100” tiene como objetivo dejar todos los valores de peso en porcentaje, ya que de esta manera los pesos de los distintos factores son comparables. En cambio, la multiplicación de “100*(nclass%2*100)/nclass” sólo tiene como fin, obtener valores de peso en números mayores, por tanto de más fácil manejo.

Finalmente, el script “Weight” termina generando el primer resultado relevante de este análisis, que corresponde al peso de cada factor para cada tipo de remoción en masa. Para ello, crea mapas de atributos del peso que genera cada factor “%1” en cada tipo de remoción “%2”, denominados “W%1%2”.

Una vez completo el script “Weight”, el script “Weigthin” pasa a sumar todos los valores de W obtenidos para cada tipo de remoción, obteniendo así el segundo resultado importante de este análisis, un valor integrado de susceptibilidad para cada tipo específico de fenómeno. Por ejemplo:

$$WSuelo = WpendienteSuelo + WaspectoSuelo + WcurvaturaSuelo + \dots \text{ etc.}$$

Posteriormente, para mostrar los resultados de los pesos de cada tipo de remoción en masa, el script “Weigthin” genera los mapas de susceptibilidad de cada tipo de remoción en masa.

f) Superposición final de los mapas y cálculo de la susceptibilidad para cada unidad definida en la zona.

Gracias a la superposición de los mapas obtenidos en la etapa anterior; es decir, sumando los diferentes mapas de susceptibilidad para cada tipo de remoción en masa, se obtiene el mapa final.

Los valores de peso obtenidos en los distintos mapas de susceptibilidad son finalmente clasificados en susceptibilidad alta, media y baja, según el índice de éxito que posean éstos.

El índice de éxito se calcula ordenando los píxeles de los mapas de susceptibilidad en un número de clases, desde los altos hacia los bajos valores, basándose en la información de frecuencia que posean los histogramas de cada mapa. Una vez ordenados los píxeles, se genera una superposición entre los mapas de evidencias, y la clasificación

según la frecuencia. El índice de éxito indica qué porcentaje de remociones en masa coinciden con los altos valores de susceptibilidad, en los diferentes mapas calculados. Además de entregar una idea para la clasificación de la susceptibilidad, el índice de éxito chequea la capacidad que poseen los mapas obtenidos para predecir, considerando que lo esencial es que los distintos fenómenos ocurran en los sectores clasificados como alta susceptibilidad.

4. RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE SUSCEPTIBILIDAD DE REMOCIONES EN MASA

4.1. Introducción

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos con el análisis de susceptibilidad de remociones en masa en la zona de estudio. Primero, se muestran los datos y resultados conseguidos del trabajo en terreno. En seguida, se exhiben los mapas generados en la zona de estudio con los distintos factores considerados determinantes de la inestabilidad de las laderas, que fueron utilizados en el análisis. Finalmente, los resultados obtenidos en el análisis de susceptibilidad se presentan primero para cada tipo de remoción en masa, y luego para estos fenómenos en general.

4.2. Catastro de Remoción en Masa

En la zona de estudio se observaron decenas de remociones en masa, con las que se pudo realizar un mapa de distribución (figura 4.11.). El área abarcada por la unidad geológica “Qv” (ver capítulo 2, figura 2.10.) no fue incluida en la zona de mapeo.

Las remociones en masa se clasificaron en:

- Caídas y/o deslizamientos de roca: bloques individuales de roca o masas disgregadas de roca que descienden las laderas a través de superficies de cizalle definidas, o rebotando, rodando, o en caída libre (figura 4.1., 4.6.).

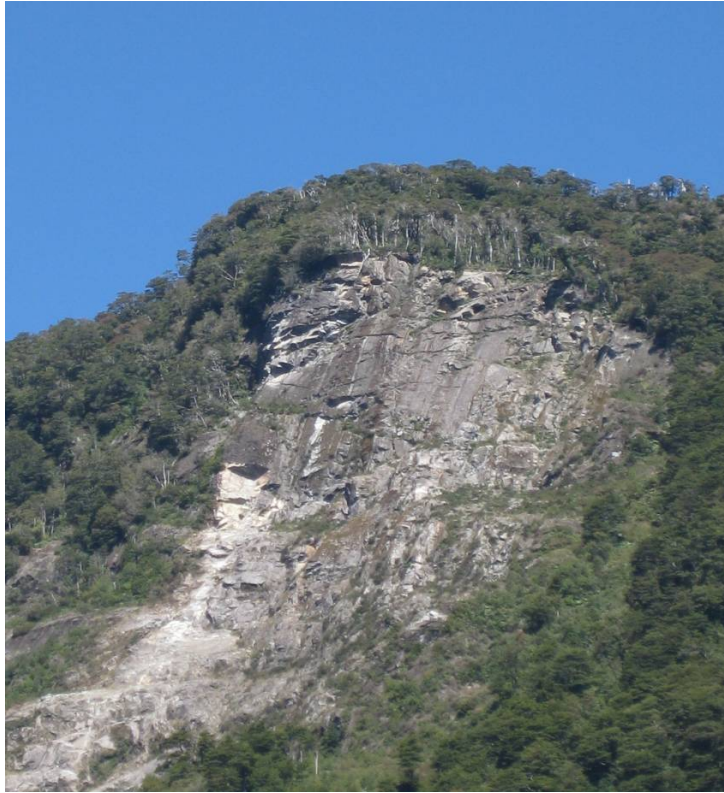


Figura 4.1.: Caída de roca.

- Flujos de detritos: material particulado grueso que posee un movimiento continuo descendente (figura 4.2., 4.3.).



Figura 4.2.: Flujo de detritos.



Figura 4.3.: Flujo de detritos.

- Deslizamientos de roca-suelo: masas de suelo y roca que se mueven ladera abajo a través de superficies de cizalle definidas (figuras 4.4.).



Figura 4.4.: Deslizamiento de roca-suelo.

- Deslizamientos de suelo: masas de suelo que descenden de las laderas a través de superficies de cizalle definidas (figuras 4.5.).



Figura 4.5.: Deslizamiento de suelo.

En algunas de las remociones en masa se pudo distinguir entre las zonas de arranque, y depósitos (figuras 4.6.).

De las 72 remociones en masa mapeadas en terreno, 39 son caídas y/o deslizamientos de rocas, 17 son deslizamientos de roca-suelo, 13 son deslizamientos de suelo, y 3 corresponden a flujos de detritos.

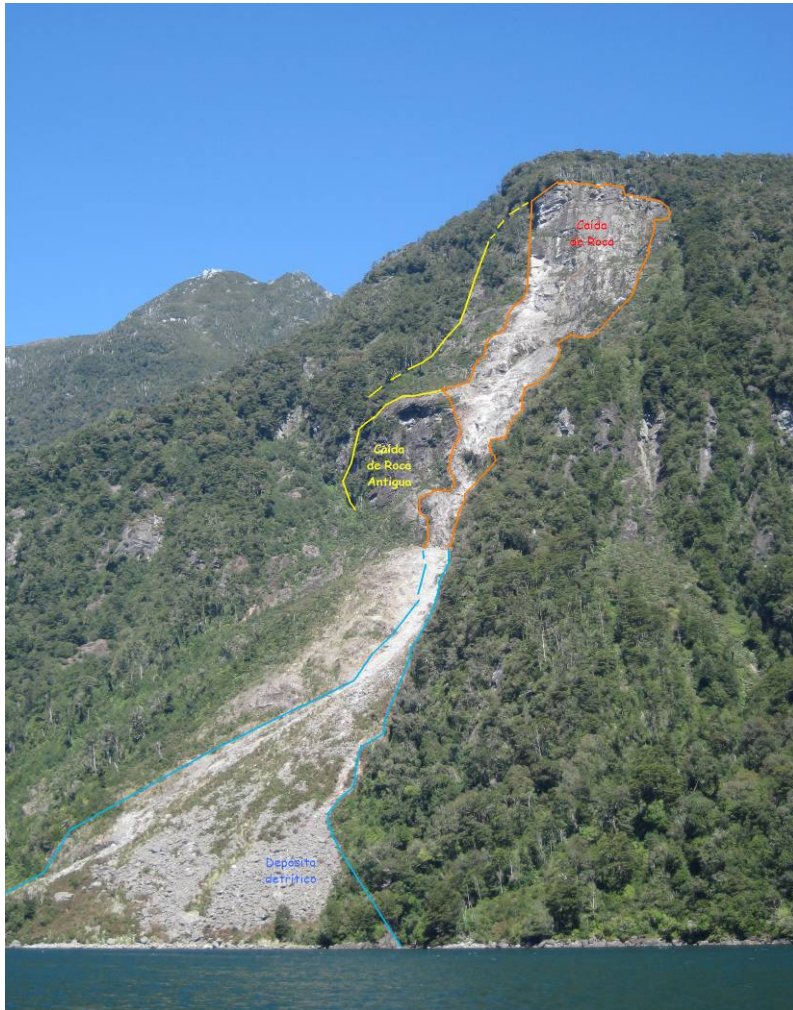


Figura 4.6.: Remociones en masa: en rojo caída de roca, en amarillo caída de roca antigua. En celeste, depósito detrítico.



Figura 4.7.: Depósito detrítico.

Una clasificación temporal de éstas no fue posible realizar. Sin embargo, sí fueron clasificadas (para el mapeo) de manera distinta las caídas y/o deslizamientos de rocas, y los deslizamientos de roca-suelo, donde era evidente su mayor antigüedad debido al desarrollo de vegetación en sus depósitos, o escarpes (figuras: 4.6., 4.8., 4.9.).



Figura 4.8.: Caída de roca antigua.



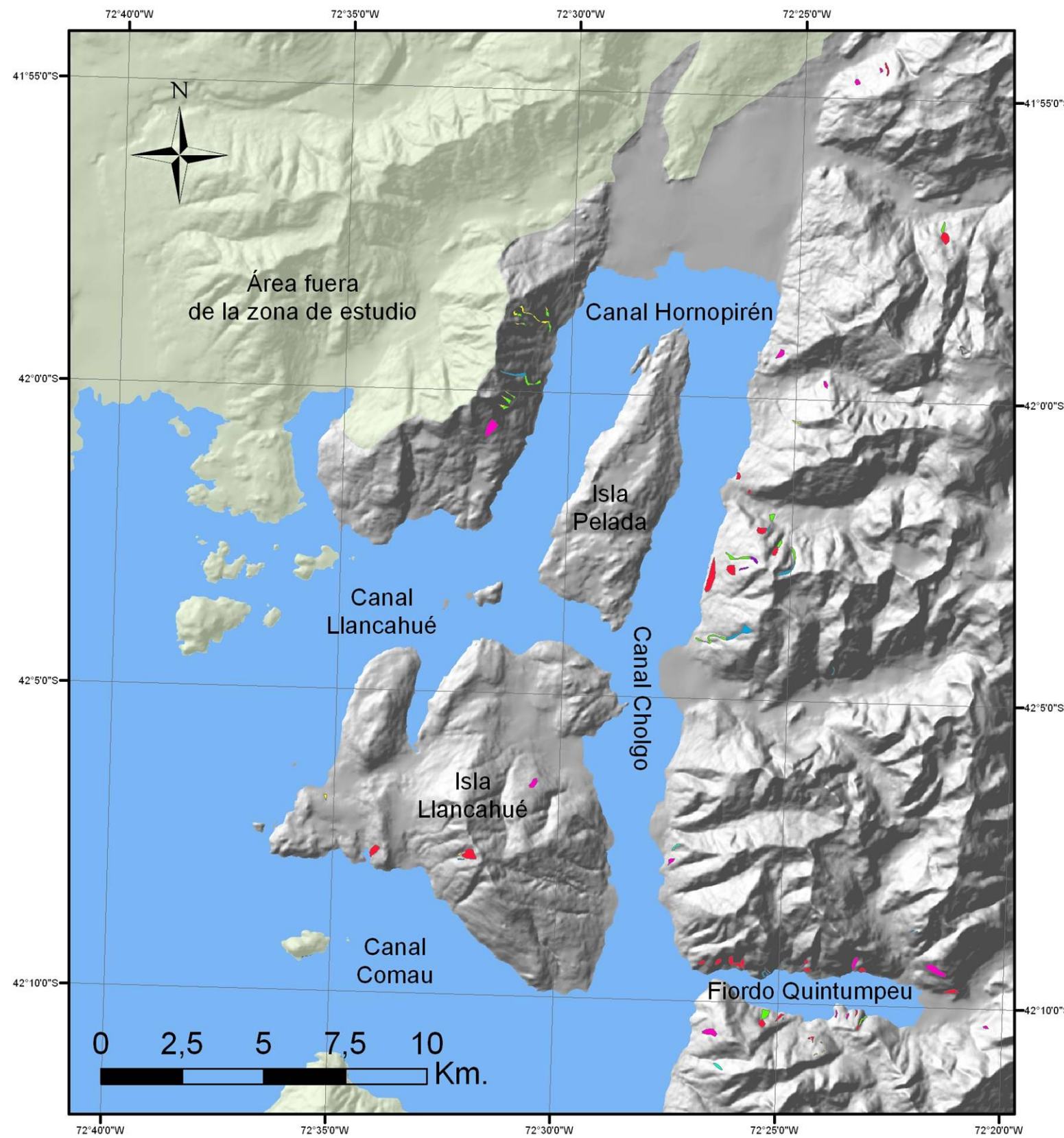
Figura 4.9.: Deslizamiento de roca-suelo antiguo.

Las áreas comprendidas por las distintas remociones en masa en general varían según su tipo. Las superficies abarcadas por las caídas y/o deslizamientos de rocas van entre 2.000 – 155.000 m², las de los deslizamientos de roca-suelo van entre 3.000 – 90.000 m², las de los deslizamientos de suelo van entre 1.000 – 45.000 m², y las superficies de los flujos de detritos van entre 6.000 – 25.000 m² aproximadamente.

Las remociones en masa de la zona de estudio se distribuyen principalmente en las costas más abruptas; es decir, donde las pendientes son mayores. Por esta razón, las zonas que presentan menores alturas, como es el caso de las islas Pelada y Llancahué, el número de remociones en masa es mucho menor. La mayor concentración de remociones se encuentra en el fiordo Quintumpeu, donde se mapearon alrededor de 30 remociones en masa, y el tipo principal de éstas es “caída y/o deslizamiento de roca”. En este fiordo, y la costa sur de la isla Llancahué, se constataron algunas remociones ocurridas por el sismo mayor del enjambre de mayo de 2008.



Figura 4.10.: Remociones en masa costa norte del fiordo Quintumpeu.



Catastro de Remociones en Masa

Leyenda

Tipo de Remoción en Masa

- Caída y/o Deslizamiento de Roca
- Flujo de Detritos
- Deslizamiento de Roca-Suelo Antiguo
- Caída y/o Deslizamiento de Roca Antigua
- Deslizamiento de Roca-Suelo
- Deslizamiento de Suelo
- Depósito de Detritos

Figura 4.11.: Catastro de remociones en masa en la zona de estudio, remociones clasificadas según tipo.

4.3. Mapas de Factores Determinantes en la Inestabilidad de Laderas.

Para la creación de los mapas de factores en la zona de estudio, el área abarcada por la unidad geológica “Qs” (ver capítulo 2, figura 2.10.) correspondiente principalmente a los depósitos fluviales, no fue considerada. Ésto se debe a que la pendiente poseída por dicha zona es menor a 10° , por lo tanto, prácticamente no es susceptible a remociones en masa.

Los mapas creados con los distintos factores considerados en este análisis como determinantes de la inestabilidad de laderas se muestran a continuación, junto con su respectiva tabla que muestra el criterio de clasificación.

- *Pendiente:*

La pendiente se clasificó según el porcentaje (%), utilizando el criterio utilizado por Arenas et al. 2008 (tabla 4.1).

Tabla 4.1: Clasificación del factor pendiente.

Pendiente (%)	Nombre de Clase
3, 4921	Plano
8,7489	Débil inclinado
26, 7949	Muy inclinado
46,6308	Débil escarpado
70,0208	Escarpado
500	Muy Escarpado

El mapa obtenido según esta clasificación es el siguiente:

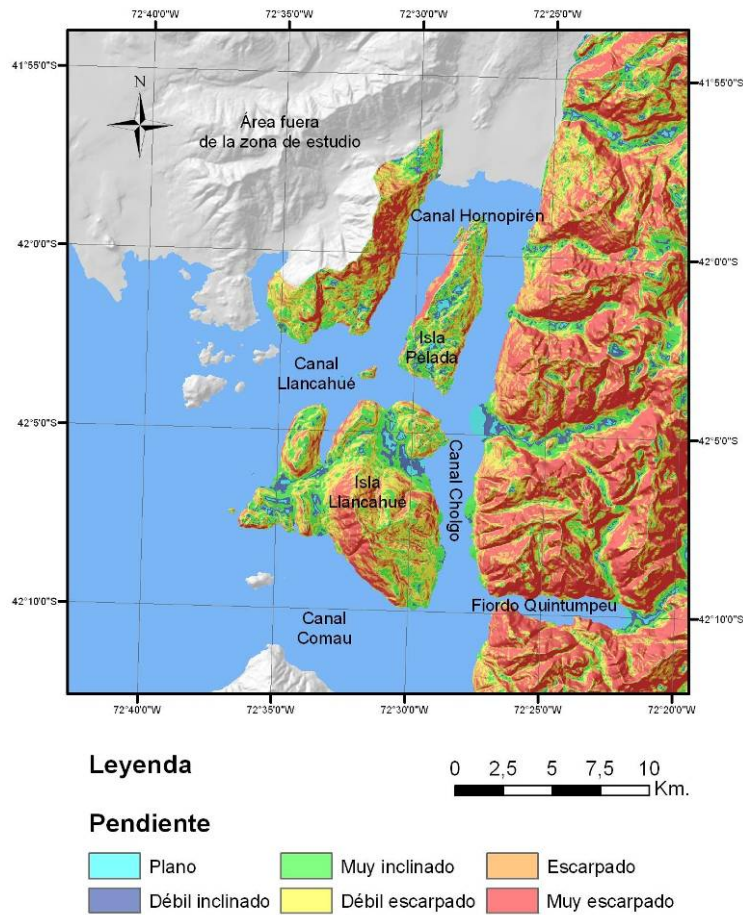


Figura 4.12.: Mapa clasificado del factor pendiente.

- *Aspecto:*

La dirección de pendiente se clasificó según los grados (°) con respecto al norte (N), donde el N corresponde a los “0” ó “360” grados (tabla 4.2.).

Tabla 4.2.: Clasificación del factor aspecto.

Aspecto (°)	Nombre de Clase
0 - 45	Norte (N1)
45 - 135	Este (E)
135 - 225	Sur (S)
225 - 315	Oeste (W)
315 - 360	Norte (N)

El mapa obtenido según esta clasificación es el siguiente:

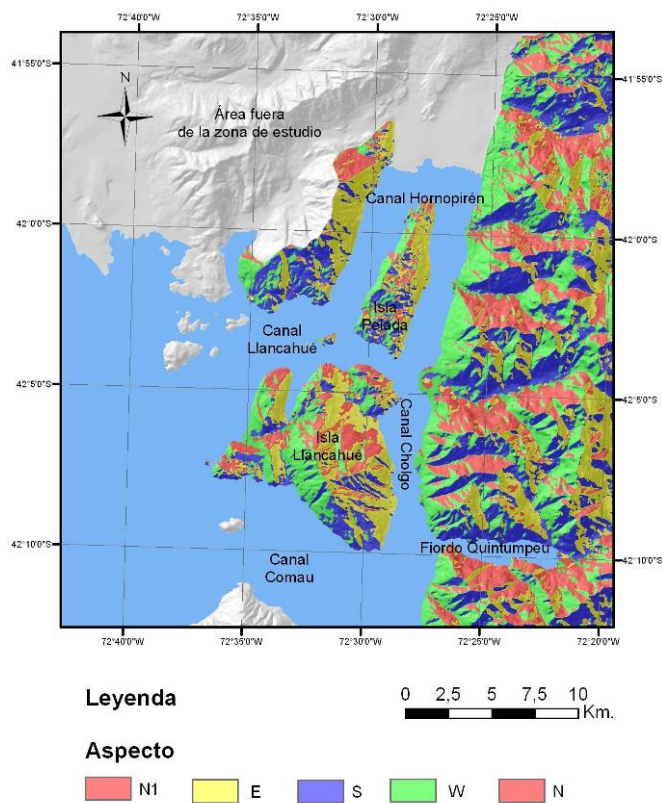


Figura 4.13.: Mapa clasificado del factor aspecto.

- *Curvatura media:*

La clasificación se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 4.3.: Clasificación del factor curvatura media.

Curvatura Media ($^{\circ}/m$)	Nombre de Clase
$< - 0, 206$	Cóncavo
$- 0, 206 - 0,19$	Plano
$0,19 - 10$	Convexo

El mapa obtenido según esta clasificación se muestra en la siguiente figura:

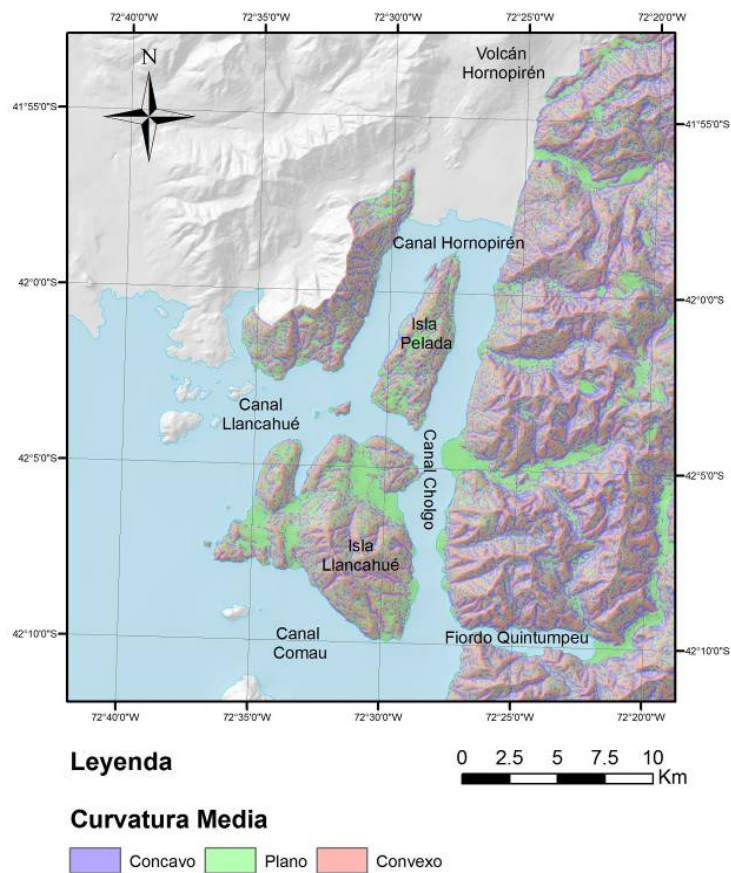


Figura 4.14.: Mapa clasificado del factor curvatura media.

- *Densidad de drenaje:*

La clasificación se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 4.4.: Clasificación del factor densidad de drenaje

Densidad de drenaje (m de línea de drenaje/ km ²)	Nombre de Clase
0	Muy baja
1	Baja
2	Media
4	Alta

El mapa obtenido según esta clasificación se muestra en la siguiente figura:

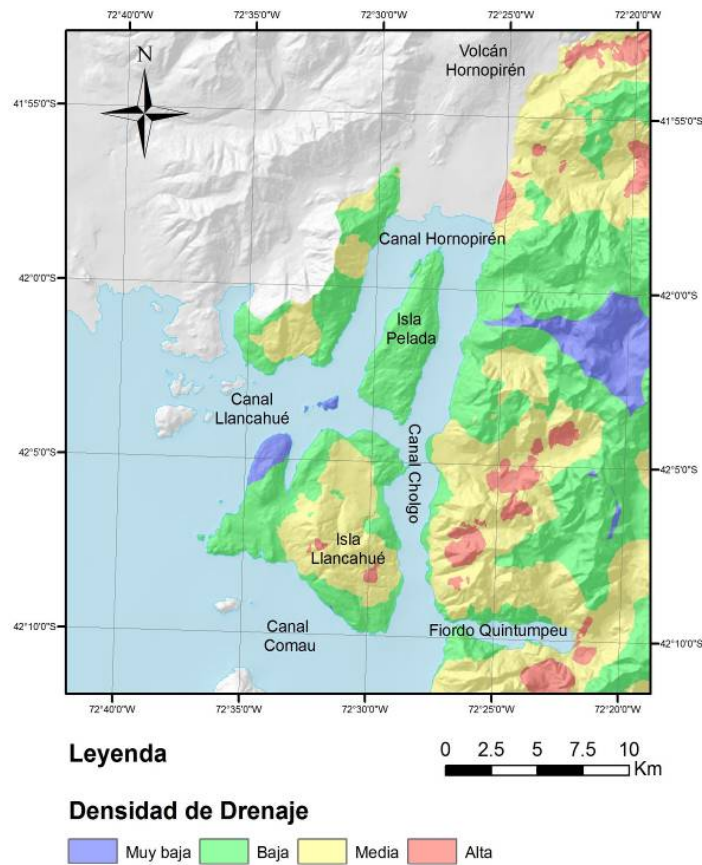


Figura 4.15.: Mapa clasificado del factor densidad de drenaje.

- *Distancia a lineamientos y fallas:*

La clasificación se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 4.5.: Clasificación del factor distancia a lineamientos y fallas.

Distancia (m)	Nombre de Clase
500	Muy cerca
1.000	Cerca
5.000	Lejos
10.000	Muy lejos

El mapa obtenido según esta clasificación se muestra en la siguiente figura:

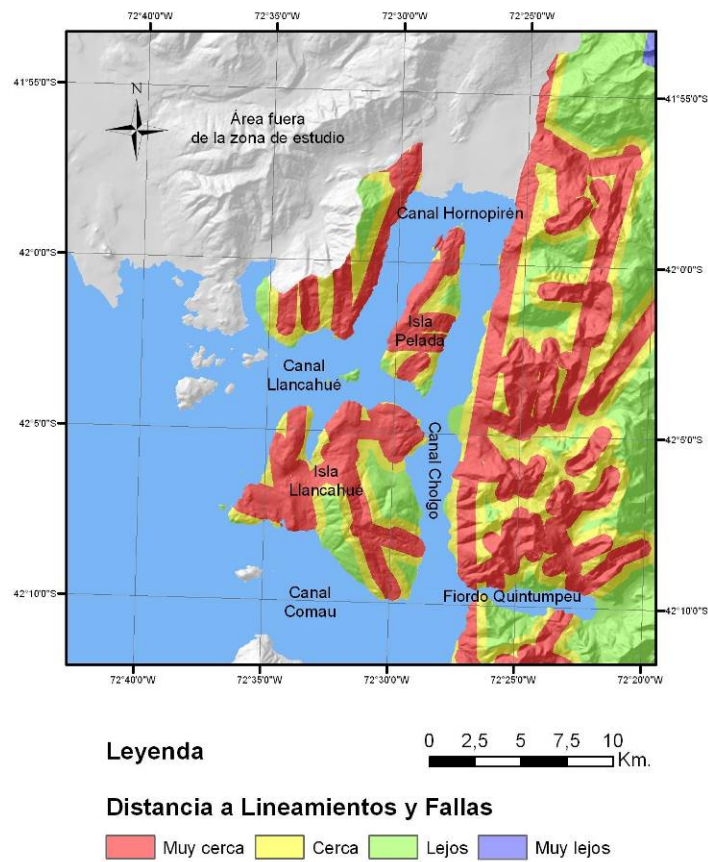


Figura 4.16.: Mapa clasificado del factor distancia a lineamientos y fallas.

- *Densidad de lineamientos y fallas:*

La clasificación se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 4.6.: Clasificación del factor densidad de lineamientos y fallas.

Densidad de lineamientos y fallas (m de lineamientos/km ²)	Nombre de Clase
0,5	Baja
1,5	Media
3	Alta

El mapa obtenido según esta clasificación se muestra en la siguiente figura:

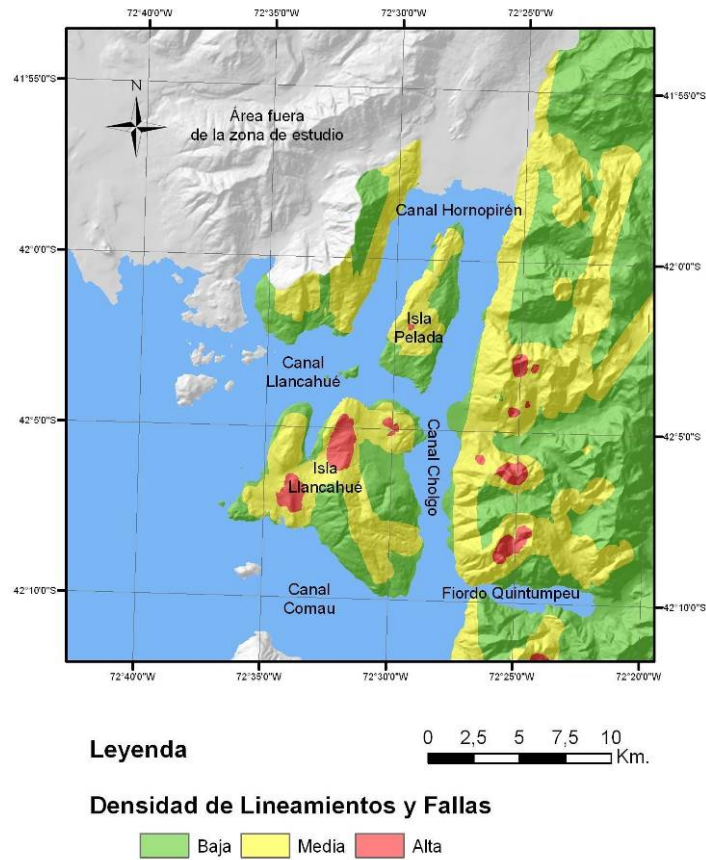


Figura 4.17.: Mapa clasificado del factor densidad de lineamientos y fallas.

- *Geología*: Mapa mostrado en el capítulo 2 (2.3 Geología local), figura 2.8.
- *Distancia normalizada a la cresta*:

La clasificación se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 4.7.: Clasificación del factor distancia normalizada a la cresta.

Distancia normalizada a la cresta	Nombre de Clase
0,2	Cima
0,5	Medio - alto
0,8	Medio
1	Base

El mapa obtenido según esta clasificación se muestra en la siguiente figura:

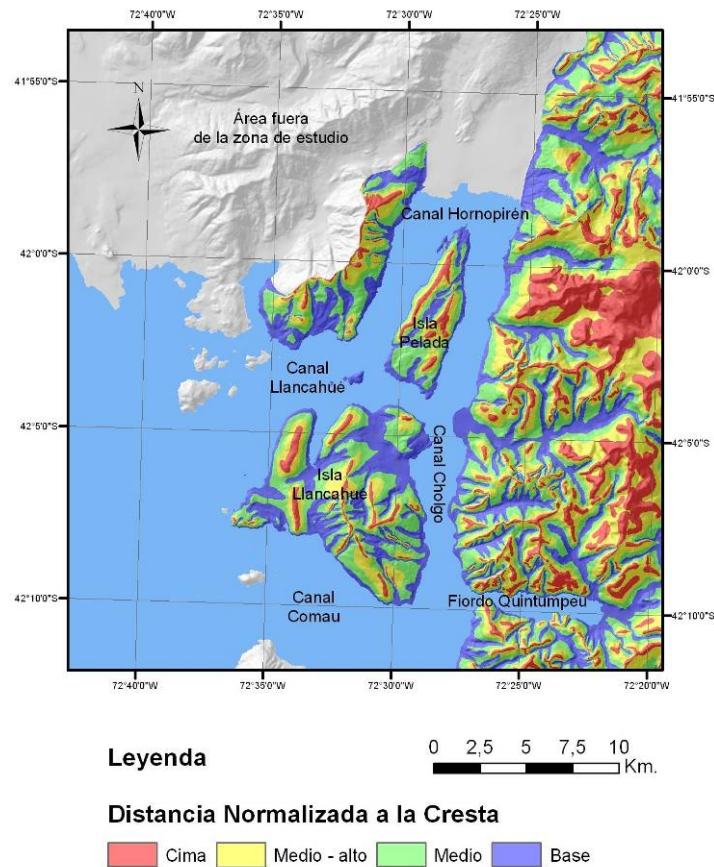


Figura 4.18.: Mapa clasificado del factor distancia normalizada a la cresta.

4.4. Resultados del Análisis de Susceptibilidad de Remociones en Masa.

Los resultados obtenidos al realizar el análisis de susceptibilidad se presentan a continuación.

Primero, se exhiben los resultados de cada tipo de remoción en masa. Para cada uno de éstos, se muestran los valores de peso obtenidos en cada clase-factor, y 1 mapa de susceptibilidad. Los mapas susceptibilidad corresponden a los mapas generados al sumar los distintos valores de peso de cada clase-factor para cada tipo de fenómeno. Los mapas presentados están clasificados en distintos niveles de susceptibilidad. Estos niveles están determinados por el índice de éxito; es decir, se evaluó la proporción de remociones en masa que coincide con los valores mayores de susceptibilidad (en términos de número de píxeles coincidentes). Las clases de susceptibilidad definidas según el índice de éxito obtenido en cada mapa son: alta, media, y baja.

Finalmente se presenta un mapa de susceptibilidad para remociones en masa en general. Este mapa final se clasificó de la misma manera en que se catalogaron los mapas de susceptibilidad de cada tipo de remoción en masa.

4.4.1. Resultados de cada tipo de remoción en masa.

Al hacer los análisis, las remociones en masa consideradas de mayor antigüedad se agruparon al grupo correspondiente de los fenómenos más jóvenes. Por esta razón, los tipos de remociones en masa analizados son 4: caída y/o deslizamiento de roca; flujo de detritos; deslizamiento de roca-suelo; deslizamiento de suelo.

4.4.1.1. Caída y/o Deslizamiento de Roca.

4.4.1.1.1. Pesos factores

Los pesos calculados para cada clase-factor, para las caídas y/o deslizamientos de rocas se muestran en la siguiente tabla (tabla 4.8.). En ella se encuentra destacado con amarillo el menor valor, y con naranja el mayor valor de peso entre las clases de cada factor.

Tabla 4.8.: Pesos clases-factores para caída y/ deslizamiento de roca, en amarillo se destaca el menor valor, y con naranja el mayor valor, de peso entre las clases de cada factor.

Factores	Pesos (W) por clases					
Aspecto	N1	E	S	W	N	
	29.551047	2.509274	24.06529	30.508034	16.723661	
Curvatura Media	Cóncavo	Plano	Convexo			
	23.948	16.03748	21.7442			
Densidad de Drenaje	Muy baja	Baja	Media	Alta		
	0	25.124095	20.01702	9.503564		
Distancia a Lineamientos y Fallas	Muy cerca	Cerca	Lejos	Muy lejos		
	21.966683	43.057183	12.17638	0		
Distancia Normalizada a la Cresta	Cima	Medio - alto	Medio	Base		
	16.41632	21.687343	25.1306	19.271392		
Geología	PP	PP y Pz	Tpd	Ttm		
	0	0	33.97028	21.152412		
Densidad de Lineamientos y Fallas	Baja	Media	Alta			
	16.129465	32.050307	0			
Pendiente	Plano	Débil inclinado	Muy inclinado	Débil escarpado	Escarpado	Muy escarpado
	0	0	0	9.372225	19.917743	37.758087

De la tabla anterior se puede observar lo siguiente de cada factor, para este tipo de remoción en masa:

- *Aspecto*: las direcciones de buzamiento de las laderas más susceptibles a sufrir una caída y/o deslizamiento de roca son (en orden de mayor a menor susceptibilidad): W, NE, S.
- *Curvatura media*: las zonas que presentan una curvatura cóncava, son las más susceptibles a este tipo de remoción, mientras que las zonas planas son las menos susceptibles.
- *Densidad de drenaje*: las zonas de baja densidad son las que presentan una mayor susceptibilidad. Sin embargo, si la densidad es muy baja, la susceptibilidad pasa a ser “0”.
- *Distancia a lineamientos y fallas*: los sectores que se encuentran cerca, y muy cerca de los lineamientos y fallas, son los que poseen una mayor susceptibilidad.
- *Distancia normalizada a la cresta*: las zonas cercanas a la cima son las que poseen una menor susceptibilidad, y las que están al medio son las que poseen una mayor.
- *Geología*: las unidades Tpd y Ttm, son las que tienen una susceptibilidad de caída y/o deslizamientos de roca, siendo la susceptibilidad de la unidad Tpd mayor.
- *Densidad de lineamientos y fallas*: para sectores con una densidad de lineamientos media, la susceptibilidad es alta; sin embargo, zonas con alta densidad poseen una baja susceptibilidad.
- *Pendiente*: los sectores ubicados en zonas muy escarpadas, son los más susceptibles a este tipo de remoción en masa.

Para poder observar de forma comparativa la influencia ejercida por los distintos factores se presentan los valores máximos y mínimos de peso de cada factor, en el siguiente gráfico (figura 4.19.).

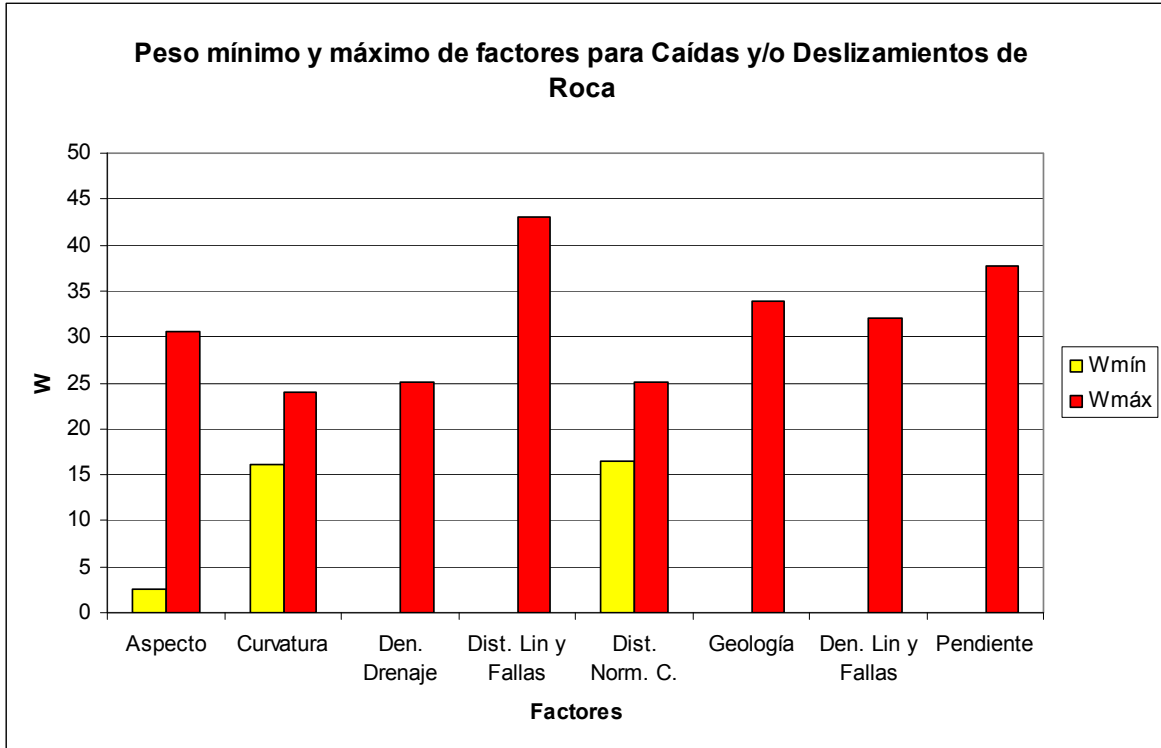


Figura 4.19.: Gráfico de peso máximo y mínimo de factores para la remoción en masa tipo “Caída y/o Deslizamiento de Roca”. Factores: aspecto, curvatura, densidad de drenaje, distancia a lineamientos y fallas, distancia normalizada a la cresta, geología, densidad de lineamientos y fallas, pendiente.

Del gráfico anterior, se puede observar que el factor distancia a lineamientos y fallas, es el que posee el mayor peso máximo ($W_{máx} \sim 43$). Sin embargo, existen otros parámetros, como pendiente, geología, densidad de lineamientos y fallas, y aspecto, que también poseen valores de peso máximos sobresalientes. Los valores de peso máximos de éstos varían entre 30 – 40.

Los valores mínimos de todos los factores son menores a 17. Sin embargo, cabe destacar que existen ciertos factores (densidad de drenaje, distancia a lineamientos y fallas, geología, densidad de lineamientos y fallas, y pendiente) que presentan clases con valor de peso “0”.

4.4.1.1.2. Índice de éxito y mapa de susceptibilidad.

El índice de éxito obtenido del mapa con los valores de peso (W) para caídas y/o deslizamientos de rocas se muestra a continuación (figura 4.20.):

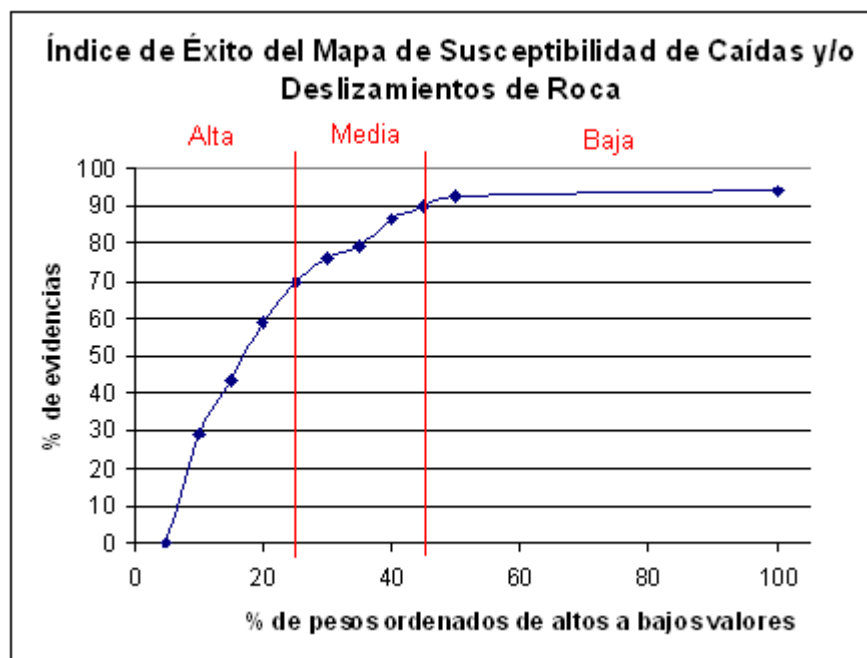


Figura 4.20.: Gráfico con los resultados del índice de éxito del mapa de susceptibilidad para la remoción tipo “Caída y/o Deslizamiento de Roca”.

Del gráfico anterior (figura 4.20.) se puede realizar la siguiente clasificación:

Susceptibilidad Alta: Estas zonas concuerdan con cerca del 70% del total de las remociones catastradas y corresponden al 25% de los valores más altos de susceptibilidad.

Susceptibilidad Media: Estas áreas incluyen cerca del 20% del total de las remociones catastradas y corresponden a los valores entre el 25% y el 45% más altos de susceptibilidad.

Susceptibilidad Baja: Estas zonas coinciden con cerca del 10% del total de las remociones catastradas y corresponden al 55% de los valores más bajos de susceptibilidad.

En término de número de píxeles (figura 4.21.), la clasificación anterior genera un mapa que posee según clases:

Susceptibilidad Alta: 397.454 píxeles.

Susceptibilidad Media: 317.962 píxeles.

Susceptibilidad Baja: 874.415 píxeles.

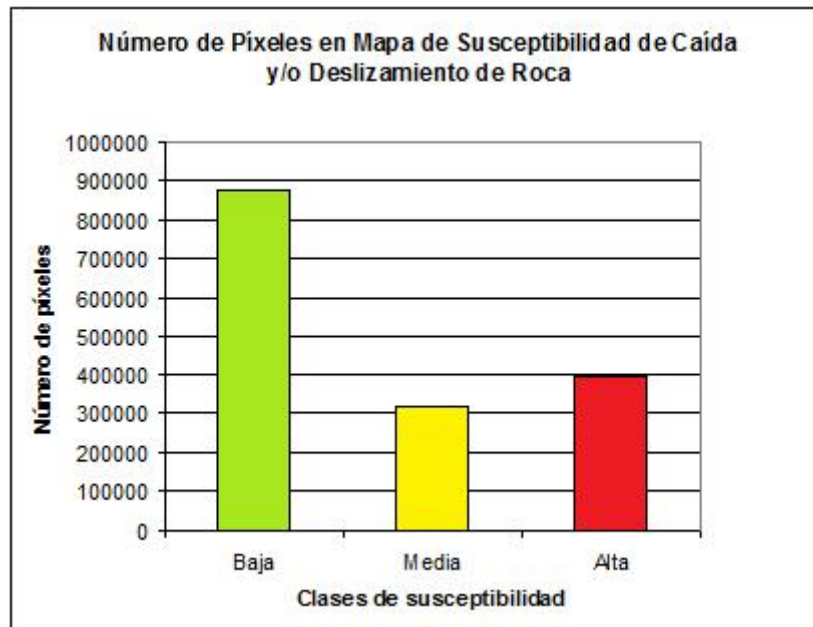
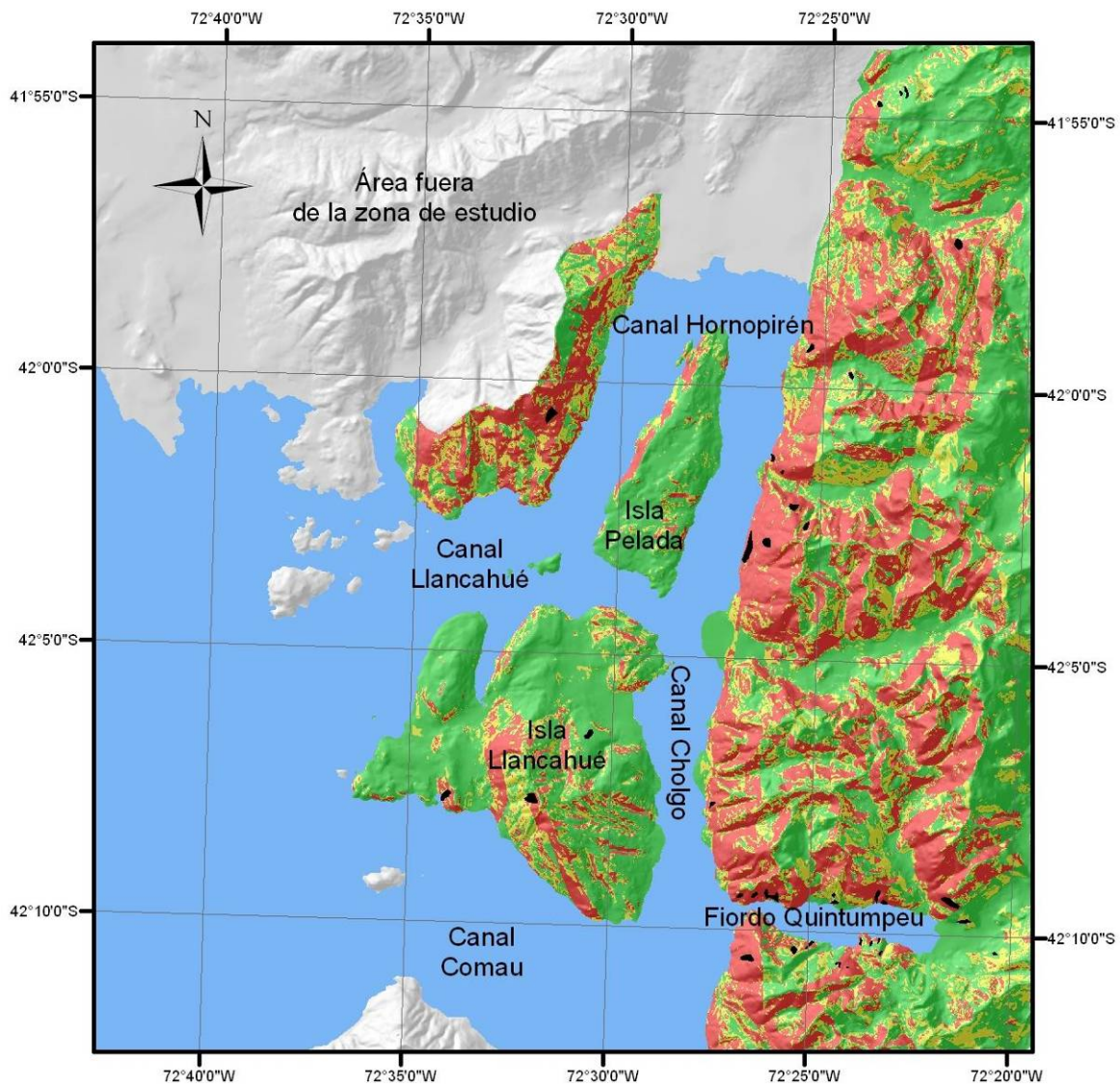


Figura 4.21.: Número de píxeles según clase de susceptibilidad en el mapa de susceptibilidad de caídas y/o deslizamientos de roca.

Finalmente, el mapa de susceptibilidad clasificado para las remociones en masa del tipo caída y/o deslizamiento de roca, se muestra en la siguiente figura:



Leyenda



 Caídas y/o Deslizamientos de Roca

Susceptibilidad de Caídas y /o Deslizamientos de Roca (W)

 Baja  Media  Alta

Figura 4.22.: Mapa de susceptibilidad para la remoción tipo “Caída y/o Deslizamiento de roca”.

En el mapa de susceptibilidad de caídas y/o deslizamientos de rocas se puede observar que la costa oriental del canal Cholgo está clasificada principalmente como una zona de alta susceptibilidad, lo que coincide con las áreas clasificadas como “cerca” y “muy cerca” del mapa correspondiente al parámetro distancia a lineamientos y fallas (figura 4.16.). Sin embargo, en la costa oeste del canal Hornopirén, se puede observar que las zonas clasificadas como “cerca” del mismo factor, poseen una mayor susceptibilidad que las clasificadas como “muy cerca”.

Hacia el interior del canal Cholgo, la influencia del parámetro distancia a lineamientos y falla ya no es tan notoria. La alta susceptibilidad coincide esencialmente con las laderas de fuerte pendiente, clasificadas como “muy escarpadas” (figura 4.12.), y las laderas que buzan principalmente al oeste (W).

Las áreas clasificadas con una susceptibilidad baja están ubicadas primordialmente en las islas Pelada y Llancahué, como también en los valles de las quebradas, donde las pendientes son menores a 15° . Sin embargo, tanto en la isla Pelada, como en la Llancahué existen zonas clasificadas con una susceptibilidad que varía entre media y alta. En la isla Pelada estas zonas de mayor susceptibilidad se sitúan en la costa occidental de la isla, donde el aspecto de las laderas es principalmente hacia el NW. En la isla Llancahué, la mayor susceptibilidad se observa en la costa norte del canal Comau, donde existe una mayor pendiente, y el aspecto es hacia el SW.

En general, se puede observar que el parámetro aspecto también genera una gran influencia, ya que las laderas que presentan un aspecto este (E) presentan una menor susceptibilidad, en comparación con las laderas que poseen otra dirección de pendiente.

4.4.1.2. Flujo de Detritos.

4.4.1.2.1. Pesos factores

Los pesos calculados de cada clase-factor, para los flujos de detritos se muestran en la siguiente tabla (tabla 4.9.). En ella se encuentra destacado con amarillo el menor valor, y con naranja el mayor valor de peso entre las clases de cada factor.

Tabla 4.9.: Pesos clases-factores para flujos de detritos, en amarillo se destaca el menor valor, y con naranja el mayor valor, de peso entre las clases de cada factor.

Factores	Pesos (W) por clases					
Aspecto	N1	E	S	W	N	
	0	0	0.13924	1.994839	1.12428	
Curvatura Media	Cóncavo	Plano	Convexo			
	1.398294	0.393177	0.421195			
Densidad de Drenaje	Muy baja	Baja	Media	Alta		
	0	1.618342	0	0		
Distancia a Lineamientos y Fallas	Muy cerca	Cerca	Lejos	Muy lejos		
	1.648831	0.430572	0.250887	0		
Distancia Normalizada a la Cresta	Cima	Medio - alto	Medio	Base		
	0	2.862535	0.087259	0		
Geología	PP	PP y Pz	Tpd	Ttm		
	0	0	0	0.835955		
Densidad de Lineamientos y Fallas	Baja	Media	Alta			
	0.143842	2.035242	0			
Pendiente	Plano	Débil inclinado	Muy inclinado	Débil escarpado	Escarpado	Muy escarpado
	0	0	0	0	0.298393	1.820863

De la tabla anterior se puede observar lo siguiente de cada factor, para este tipo de remoción en masa:

- *Aspecto*: la dirección de buzamiento de las laderas más susceptible a sufrir un flujo de detritos es hacia el W.
- *Curvatura media*: las zonas que presentan una curvatura cóncava, son las más susceptibles a este tipo de remoción, mientras que las zonas planas son las menos susceptibles.
- *Densidad de drenaje*: las zonas de baja densidad son las que presentan susceptibilidad a este tipo de remoción.
- *Distancia a lineamientos y fallas*: las áreas que se encuentran muy cerca de los lineamientos y fallas son las que poseen la mayor susceptibilidad, y las que están muy lejos la menor.
- *Distancia normalizada a la cresta*: las zonas ubicadas en las clases “medio-alto”, y “medio” son las que poseen susceptibilidad a este tipo de fenómeno. Sin embargo, la clase “medio-alto” presenta el mayor peso.
- *Geología*: las zonas pertenecientes a la unidad Ttm son las únicas que presentan una susceptibilidad a los flujos de detritos.
- *Densidad de lineamientos y fallas*: para sectores con una densidad de lineamientos media, la susceptibilidad es alta; sin embargo, en sectores con alta densidad la susceptibilidad tiende a “0”.
- *Pendiente*: los sectores ubicados en zonas muy escarpadas, son los más susceptibles a este tipo de remoción en masa.

Para comparar la influencia ejercida por los distintos factores se presentan los valores máximos y mínimos de peso de cada factor, en el siguiente gráfico (figura 4.23.).

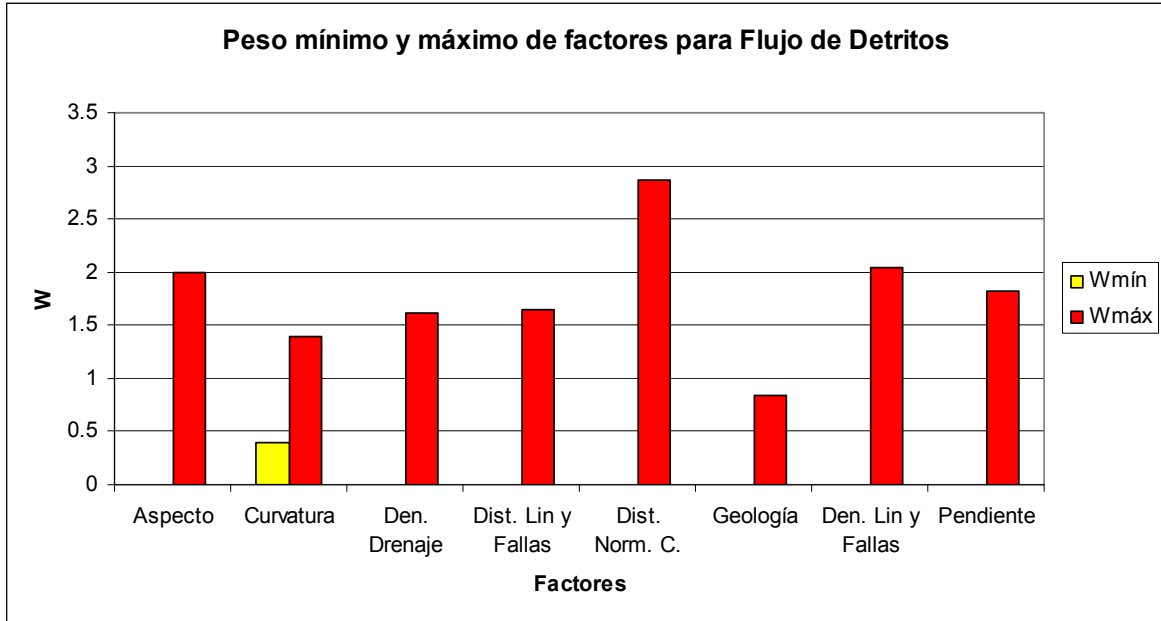


Figura 4.23.: Gráfico de peso máximo y mínimo de factores para la remoción en masa tipo “Flujo de Detritos”. Factores: aspecto, curvatura, densidad de drenaje, distancia a lineamientos y fallas, distancia normalizada a la cresta, geología, densidad de lineamientos y fallas, pendiente.

Del gráfico anterior, se observa el mayor peso que ejerce el factor distancia normalizada a la cresta, en comparación con el resto de los factores. El peso máximo que posee dicho factor es $\sim 2,8$. Los factores que le siguen ordenados de mayor a menor peso máximo son: densidad de lineamientos y fallas, aspecto, y pendiente, los cuales poseen valores que van entre 1,8 y 2 aproximadamente. Notablemente, el parámetro que presenta el menor valor de peso máximo corresponde a geología, el cual presenta un valor < 1 .

El único parámetro que presenta un valor de peso mínimo mayor a “0” es la curvatura; sin embargo, el valor obtenido es $< 0,5$.

4.4.1.2.2. Índice de éxito y mapa de susceptibilidad.

El índice de éxito obtenido del mapa con los valores de peso (W) para los flujos de detritos se muestra a continuación (figura 4.24.):

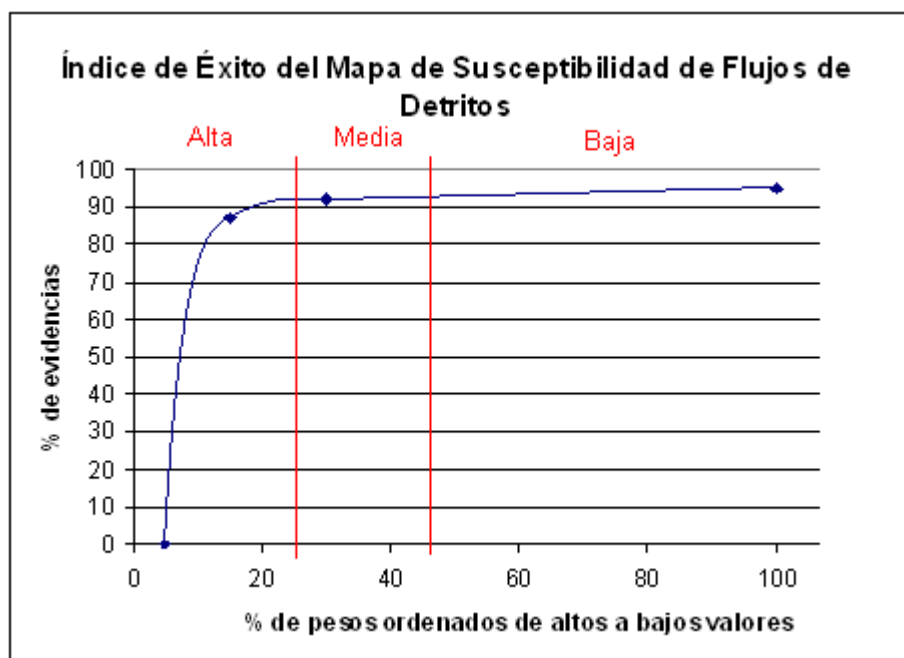


Figura 4.24.: Gráfico con los resultados del índice de éxito del mapa de susceptibilidad para la remoción tipo “Flujo de Detritos”.

Del gráfico anterior (figura 4.24.) se puede realizar la siguiente clasificación:

Susceptibilidad Alta: Estas zonas concuerdan con cerca del 92% del total de las remociones catastradas y corresponden al 25% de los valores más altos de susceptibilidad.

Susceptibilidad Media: Estas áreas incluyen cerca del 2% del total de las remociones catastradas y corresponden a los valores entre el 25% y el 45% más altos de susceptibilidad.

Susceptibilidad Baja: Estas zonas coinciden con cerca del 6% del total de las remociones catastradas y corresponden al 55% de los valores más bajos de susceptibilidad.

En término de número de píxeles (figura 4.25.), la clasificación anterior genera un mapa que posee según clases:

Susceptibilidad Alta: 397.686 píxeles.

Susceptibilidad Media: 317.891 píxeles.

Susceptibilidad Baja: 874.254 píxeles.

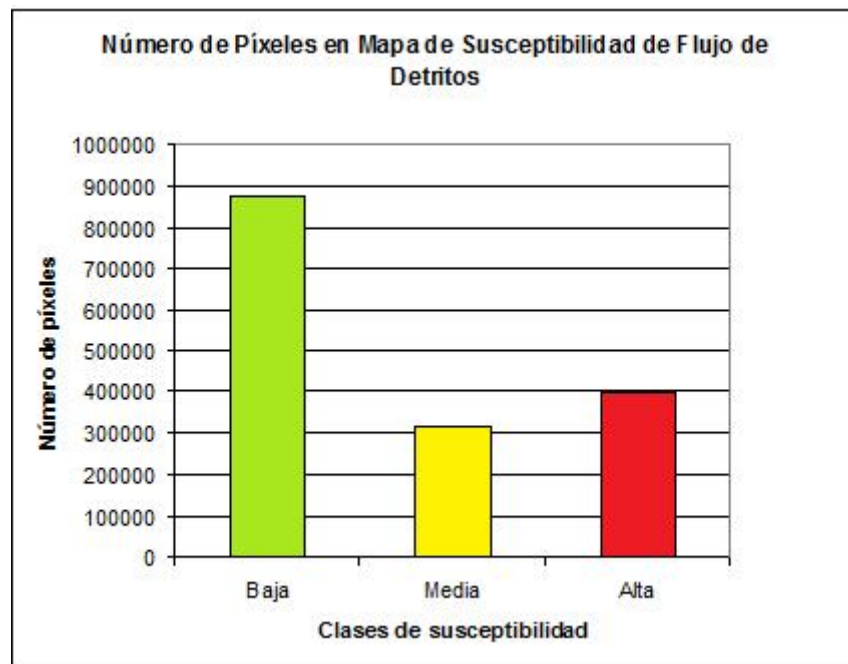
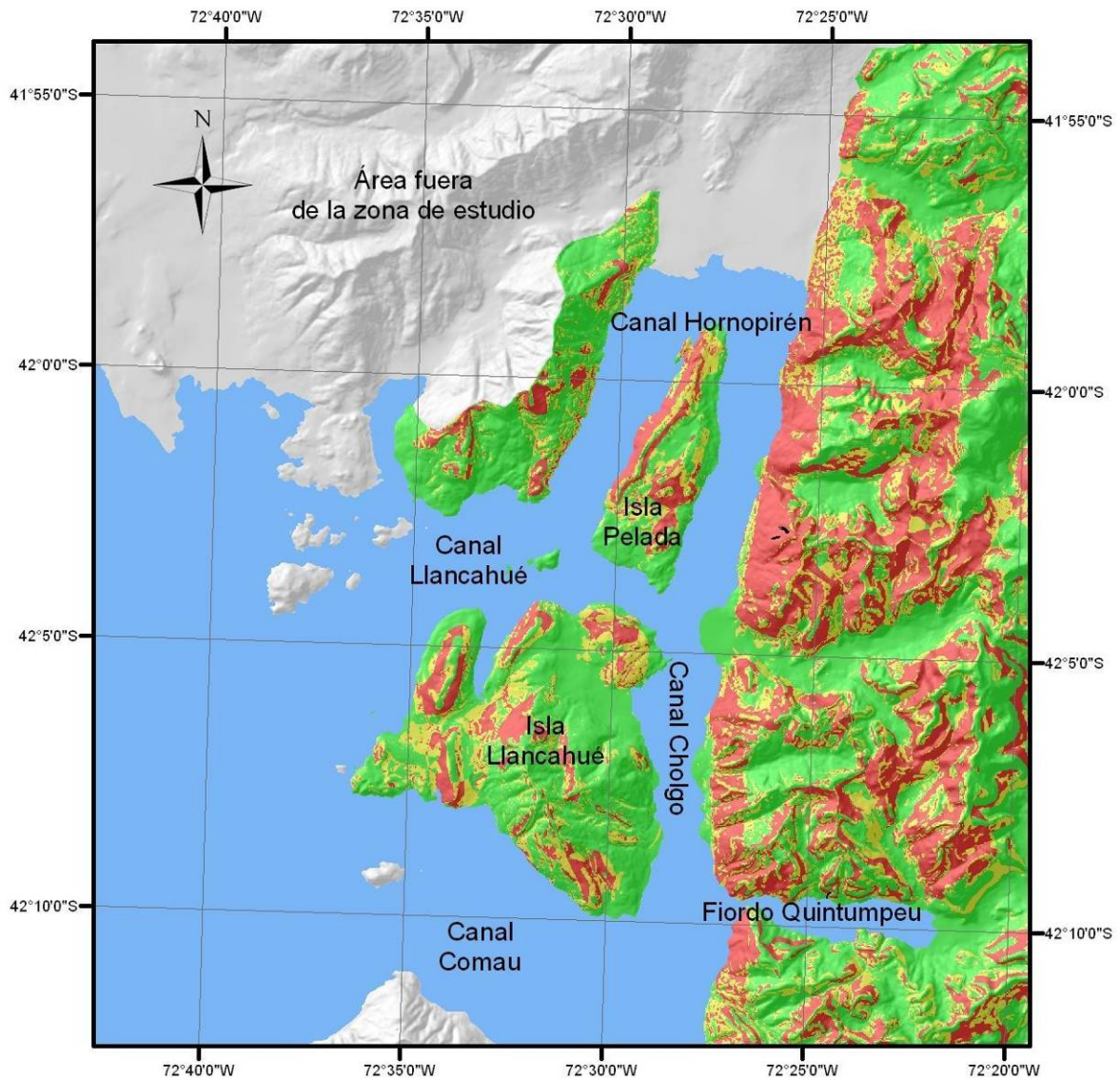
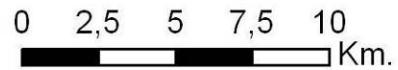



Figura 4.25.: Número de píxeles según clase de susceptibilidad en el mapa de susceptibilidad de flujos de detritos.

Finalmente, el mapa de susceptibilidad clasificado para las remociones en masa del tipo flujo de detritos, se muestra en la siguiente figura:



Leyenda



 Flujos de Detritos

Susceptibilidad de Flujos de Detritos (W)

 Baja  Media  Alta

Figuras 4.26.: Mapa de susceptibilidad para las remociones tipo “Flujo de Detritos”.

En el mapa de susceptibilidad de flujos de detritos, se puede observar que la costa oriental del canal Cholgo en general presenta una alta susceptibilidad. Sin embargo, existen sectores donde la susceptibilidad es alta de forma más constante, estos sectores corresponden a la entrada del fiordo Quintumpeu, y la costa frente a la isla Pelada. Tanto en la costa oriental del canal Cholgo, como hacia el interior, se puede observar que la mayoría de las zonas de alta susceptibilidad coinciden con las zonas clasificadas como “muy cerca” en el mapa del factor distancia a lineamientos y fallas.

La influencia del parámetro distancia normalizada a la cresta se puede apreciar en toda la zona de estudio. Sin embargo, tanto en las islas como en la costa occidental del canal Hornopirén, este dominio se hace más evidente. Las zonas que presentan una alta susceptibilidad coinciden con las áreas clasificadas como “medio-alto” según dicho factor (figura 4.18.). Otro parámetro que también se puede apreciar en estos sectores, es el factor densidad de lineamientos y fallas. A pesar de que su influencia es menos notoria, se observa que la distribución de las zonas de mayor susceptibilidad es similar a la distribución de las áreas que poseen una densidad media.

Las zonas clasificadas con una susceptibilidad baja están ubicadas principalmente en la isla Llancahué, en la superficie abarcada por la unidad geológica “Tpd” (figura 2.10.), y en los valles de las quebradas que desembocan al canal Cholgo. La distribución de las áreas de baja susceptibilidad coincide con las zonas de baja densidad de lineamientos y fallas, con las laderas de baja pendiente, y con los distintos lugares de la zona de estudio donde las pendientes buzan con una dirección E, NE, y SE.

4.4.1.3. Deslizamiento de Roca-Suelo.

4.4.1.3.1. Pesos factores

Los pesos calculados de cada clase-factor, para los deslizamientos de roca-suelo se muestran en la siguiente tabla (tabla 4.10.). En ella se encuentra destacado con amarillo el menor valor, y con naranja el mayor valor de peso entre las clases de cada factor.

Tabla 4.10: Pesos clases-factores para deslizamientos de roca-suelo, en amarillo se destaca el menor valor, y con naranja el mayor valor, de peso entre las clases de cada factor.

Factores	Pesos (W) por clases					
Aspecto	N1	E	S	W	N	
	4.08027	3.82094	6.196175	5.594224	2.435939	
Curvatura Media	Cóncavo	Plano	Convexo			
	8.000368	2.93848	3.211614			
Densidad de Drenaje	Muy baja	Baja	Media	Alta		
	0	6.698874	3.897373	0		
Distancia a Lineamientos y Fallas	Muy cerca	Cerca	Lejos	Muy lejos		
	4.130942	11.194868	1.137354	8.55223		
Distancia Normalizada a la Cresta	Cima	Medio - alto	Medio	Base		
	1.9889	5.506742	4.25388	7.025277		
Geología	PP	PP y Pz	Tpd	Ttm		
	0	0	12.738854	4.604607		
Densidad de Lineamientos y Fallas	Baja	Media	Alta			
	3.279594	6.543208	28.771065			
Pendiente	Plano	Débil inclinado	Muy inclinado	Débil escarpado	Escarpado	Muy escarpado
	0	0	1.313422	1.085205	6.092194	7.7635

De la tabla anterior se puede observar lo siguiente de cada factor, para este tipo de remoción en masa:

- *Aspecto*: las distintas direcciones de buzamiento de las laderas poseen una susceptibilidad bastante similar. Sin embargo se puede decir que cuando caen hacia el sur (S) la susceptibilidad es mayor, y cuando caen al NW la susceptibilidad es menor.
- *Curvatura media*: las zonas que presentan una curvatura cóncava, son las más susceptibles a este tipo de remoción, mientras que las zonas planas son las menos susceptibles.
- *Densidad de drenaje*: las zonas que presentan una baja densidad de drenaje son las que presentan una mayor susceptibilidad. Si la densidad es muy baja o alta, la susceptibilidad pasa a ser “0”.
- *Distancia a lineamientos y fallas*: las áreas que se encuentran cerca de los lineamientos y fallas son las que poseen la mayor susceptibilidad, y las que están lejos la menor.
- *Distancia normalizada a la cresta*: las zonas cercanas a la cima son las que poseen una menor susceptibilidad, y las que están en la base son las que poseen una mayor.
- *Geología*: las unidades “Tpd” y “Ttm”, son las que tienen una susceptibilidad de deslizamiento de roca-suelo, siendo la susceptibilidad de la unidad “Tpd” mayor.
- *Densidad de lineamientos y fallas*: para sectores con una densidad de lineamientos alta, la susceptibilidad es la mayor. Y los sectores con densidad baja poseen la menor susceptibilidad.
- *Pendiente*: los sectores ubicados en zonas muy escarpadas, son los más susceptibles a este tipo de remoción en masa.

Para observar de forma comparativa la influencia ejercida por los distintos factores se presentan los valores máximos y mínimos de peso de cada factor, en el siguiente gráfico (figura 4.27.).

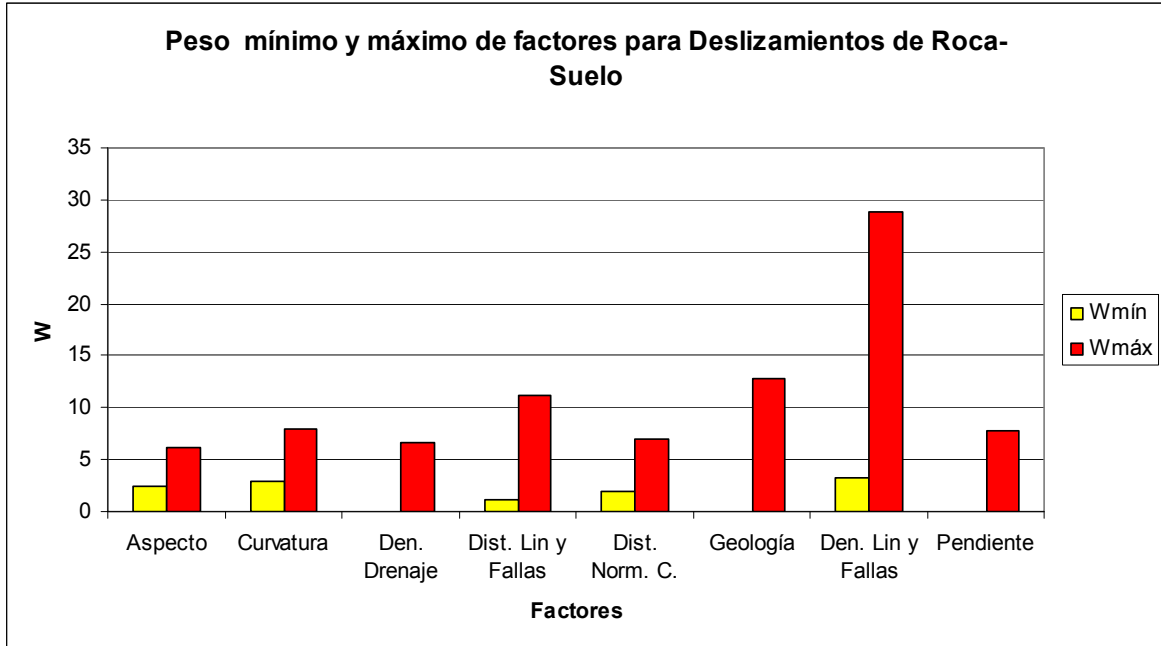


Figura 4.27.: Gráfico de peso máximo y mínimo de factores para la remoción en masa tipo “Deslizamiento de Roca-Suelo”. Factores: aspecto, curvatura, densidad de drenaje, distancia a lineamientos y fallas, distancia normalizada a la cresta, geología, densidad de lineamientos y fallas, pendiente.

Del gráfico anterior, se observa la gran influencia que ejerce el factor densidad de lineamientos y fallas. El peso máximo que posee dicho factor (~30), es más del doble de los pesos máximos presentados por los otros factores, los van entre 6 y 12 aproximadamente. Los parámetros que le siguen al factor densidad de lineamientos y fallas, son geología y distancia a lineamientos y fallas, los cuales poseen valores de peso máximos > 10.

Los valores de peso mínimos de todos los factores son menores a 3. Los parámetros que presentan clases con valor de peso “0” son: densidad de drenaje, geología, y pendiente.

4.4.1.3.2. Índice de éxito y mapa de susceptibilidad.

El índice de éxito obtenido del mapa con los valores de peso (W) para los deslizamientos de roca-suelo se muestra a continuación (figura 4.28.):

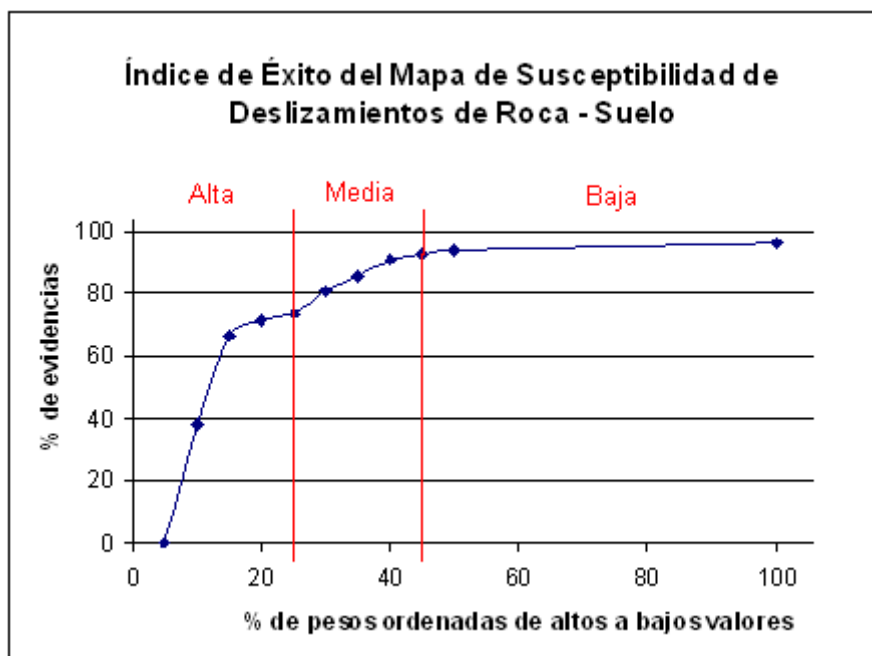


Figura 4.28.: Gráfico con los resultados del índice de éxito del mapa de susceptibilidad para la remoción tipo “Deslizamientos de Roca-Suelo”.

Del gráfico anterior (figura 4.28.) se puede realizar la siguiente clasificación:

Susceptibilidad Alta: Estas zonas concuerdan con cerca del 73% del total de las remociones catastradas y corresponden al 25% de los valores más altos de susceptibilidad.

Susceptibilidad Media: Estas áreas incluyen cerca del 19% del total de las remociones catastradas y corresponden a los valores entre el 25% y el 45% más altos de susceptibilidad.

Susceptibilidad Baja: Estas zonas coinciden con cerca del 8% del total de las remociones catastradas y corresponden al 55% de los valores más bajos de susceptibilidad.

En término de número de píxeles (figura 4.29.), la clasificación anterior genera un mapa que posee según clases:

Susceptibilidad Alta: 397.530 píxeles.

Susceptibilidad Media: 318.009 píxeles.

Susceptibilidad Baja: 874.292 píxeles.

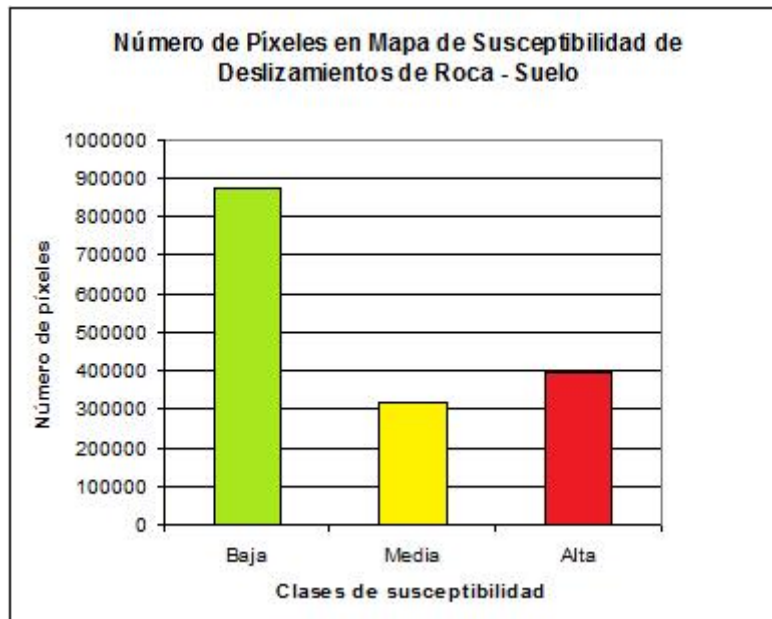
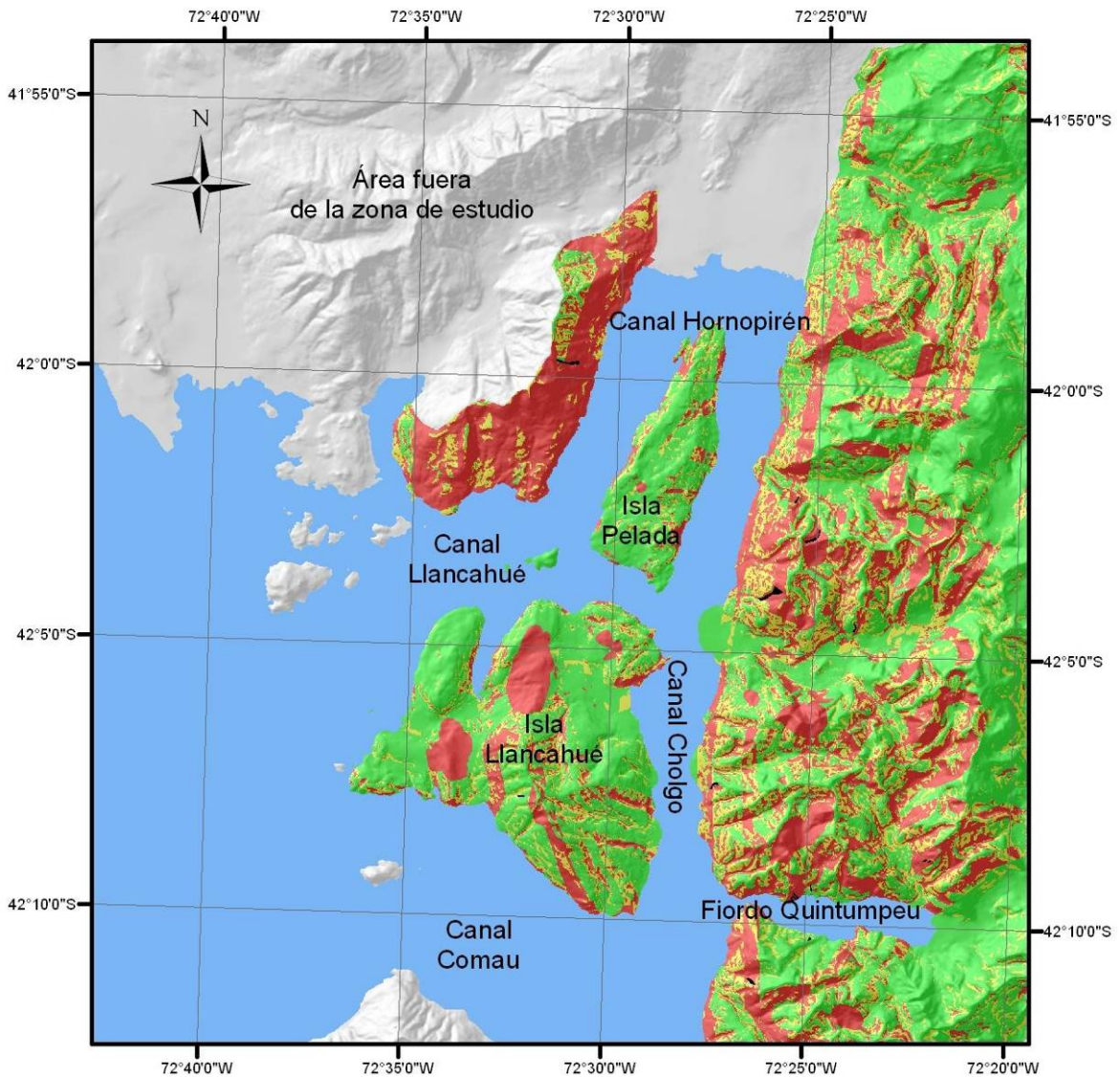
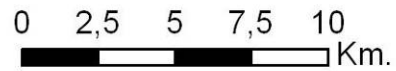


Figura 4.29.: Número de píxeles según clase de susceptibilidad en el mapa de susceptibilidad de deslizamientos de roca-suelo.

Finalmente, el mapa de susceptibilidad clasificado para las remociones en masa del tipo deslizamientos de roca-suelo, se muestra en la siguiente figura:



Leyenda



 Deslizamientos de Roca - Suelo

Susceptibilidad de Deslizamientos de Roca - Suelo (W)

 Baja  Media  Alta

Figuras 4.30.: Mapa de susceptibilidad para las remociones tipo “Deslizamiento de Roca-Suelo”.

En el mapa de susceptibilidad de deslizamientos de roca-suelo, se puede observar que para toda la zona de estudio la alta susceptibilidad esta controlada principalmente por tres parámetros: densidad de lineamientos y fallas, geología, y distancia a lineamientos y fallas. El 100% de las áreas clasificadas con una alta densidad de lineamientos y fallas (figura 4.17.), poseen una alta susceptibilidad, lo que se observa claramente en la isla Llancahué. En la superficie abarcada por la unidad geológica “Tpd” (figura 2.10) se puede observar que fundamentalmente esta unidad posee una susceptibilidad mayor al resto de la zona de estudio. Finalmente, tanto en la isla Llancahué, como en la costa oriental del canal Cholgo, y hacia el interior, las zonas de alta susceptibilidad coinciden con los sectores ubicados “cerca” a las estructuras (figura 4.16.).

Las áreas clasificadas con una susceptibilidad baja están ubicadas principalmente en las islas Pelada y Llancahué, como también en los valles de las quebradas. Sin embargo, la superficie abarcada por la unidad geológica “Tpd” también posee algunas zonas de baja susceptibilidad, las cuales presentan una distribución muy similar a las zonas clasificadas como “lejos” según el factor distancia a lineamientos y fallas (figura 4.16.). Lo mismo ocurre en la costa sur del fiordo Quintumpeu, donde también se observa que las zonas clasificadas como “lejos” coinciden con las de baja susceptibilidad. No obstante, en la costa sur del fiordo Quintumpeu, la baja susceptibilidad también esta relacionada a la dirección en que buzan las laderas, ya que en general las pendientes que caen al NW poseen una menor susceptibilidad.

4.4.1.4. Deslizamiento de Suelo.

4.4.1.4.1. Pesos factores

Los pesos calculados de cada clase-factor, para los deslizamientos de suelo se muestran en la siguiente tabla (tabla 4.11). En ella se encuentra destacado con amarillo el menor valor, y con naranja el mayor valor de peso entre las clases de cada factor.

Tabla 4.11: Pesos clases-factores para deslizamientos de suelo, en amarillo se destaca el menor valor, y con naranja el mayor valor, de peso entre las clases de cada factor.

Factores	Pesos (W) por clases					
Aspecto	N1	E	S	W	N	
	1.421912	2.594818	2.808004	0.889005	0.421605	
Curvatura Media	Cóncavo	Plano	Convexo			
	2.000092	1.634788	1.632132			
Densidad de Drenaje	Muy baja	Baja	Media	Alta		
	0	1.578547	2.378544	0		
Distancia a Lineamientos y Fallas	Muy cerca	Cerca	Lejos	Muy lejos		
	0.868739	3.567595	2.007095	0		
Distancia Normalizada a la Cresta	Cima	Medio - alto	Medio	Base		
	0.915525	2.231807	2.225107	1.491668		
Geología	PP	PP y Pz	Tpd	Ttm		
	0	4.627895	24.749773	0.411126		
Densidad de Lineamientos y Fallas	Baja	Media	Alta			
	2.004196	1.445592	0			
Pendiente	Plano	Débil inclinado	Muy inclinado	Débil escarpado	Escarpado	Muy escarpado
	0	0	0.131342	0.624815	1.740627	3.194788

De la tabla anterior se puede observar lo siguiente de cada factor, para este tipo de remoción en masa:

- *Aspecto*: las distintas direcciones de buzamiento de las laderas poseen una susceptibilidad bastante similar. Sin embargo se puede decir que cuando caen hacia el sur (S) la susceptibilidad es mayor, y cuando caen al NW la susceptibilidad es menor.
- *Curvatura media*: las zonas que presentan una curvatura cóncava, son las más susceptibles a este tipo de remoción, mientras que las zonas convexas son las menos susceptibles.
- *Densidad de drenaje*: las zonas que presentan una densidad de drenaje media son las que presentan una mayor susceptibilidad. En zonas donde la densidad es muy baja o alta, la susceptibilidad pasa a ser “0”.
- *Distancia a lineamientos y fallas*: las áreas que se encuentran cerca de los lineamientos y fallas son las que poseen la mayor susceptibilidad, y las que están muy lejos la menor.
- *Distancia normalizada a la cresta*: las zonas cercanas a la cima son las que poseen una menor susceptibilidad, y las que están en la zona media-alta son las que poseen la mayor.
- *Geología*: las unidades “PP y Pz”, “Tpd”, y “Ttm”, son las que tienen una susceptibilidad de deslizamiento de suelo, siendo la susceptibilidad de la unidad “Tpd” la mayor.
- *Densidad de lineamientos y fallas*: para sectores con una densidad de lineamientos baja, la susceptibilidad es la mayor. Y los sectores con una densidad alta poseen la menor susceptibilidad.
- *Pendiente*: Igual que en los otros tipos de remoción en masa, los sectores ubicados en zonas muy escarpadas poseen la mayor susceptibilidad.

Para observar de forma comparativa la influencia ejercida por los distintos factores se presentan los valores máximos y mínimos de peso de cada factor, en el siguiente gráfico (figura 4.31.).

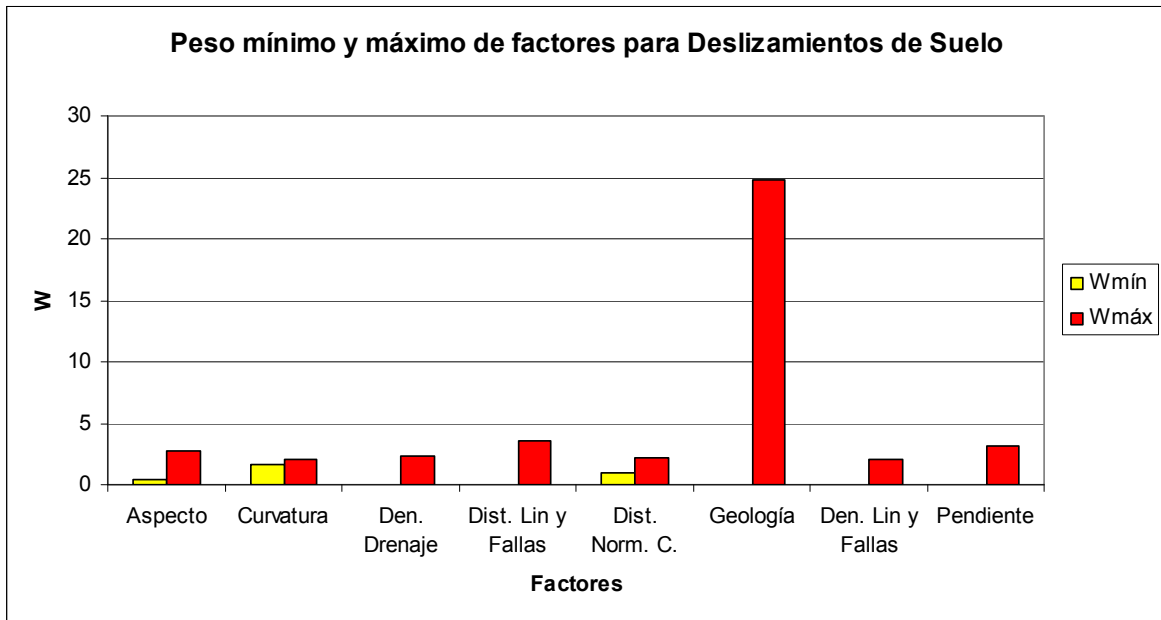


Figura 4.31.: Gráfico de peso máximo y mínimo de factores para la remoción en masa tipo “Deslizamiento de Suelo”. Factores: aspecto, curvatura, densidad de drenaje, distancia a lineamientos y fallas, distancia normalizada a la cresta, geología, densidad de lineamientos y fallas, pendiente.

Del gráfico anterior, se observa claramente que para este tipo de remoción en masa el parámetro “geología” es el que genera el mayor peso (~25). Los valores de pesos máximos obtenidos para el resto de los parámetros son muy similares, y oscilan entre 2 y 4.

Los valores de peso mínimos de todos los factores son menores a 2. Los parámetros que presentan clases con valor de peso “0” son: densidad de drenaje, distancia a lineamientos y fallas, geología, densidad de lineamientos y fallas, y pendiente.

4.4.1.4.2. Índice de éxito y mapa de susceptibilidad.

El índice de éxito obtenido del mapa con los valores de peso (W) para los deslizamientos de suelo se muestra a continuación (figura 4.32.):

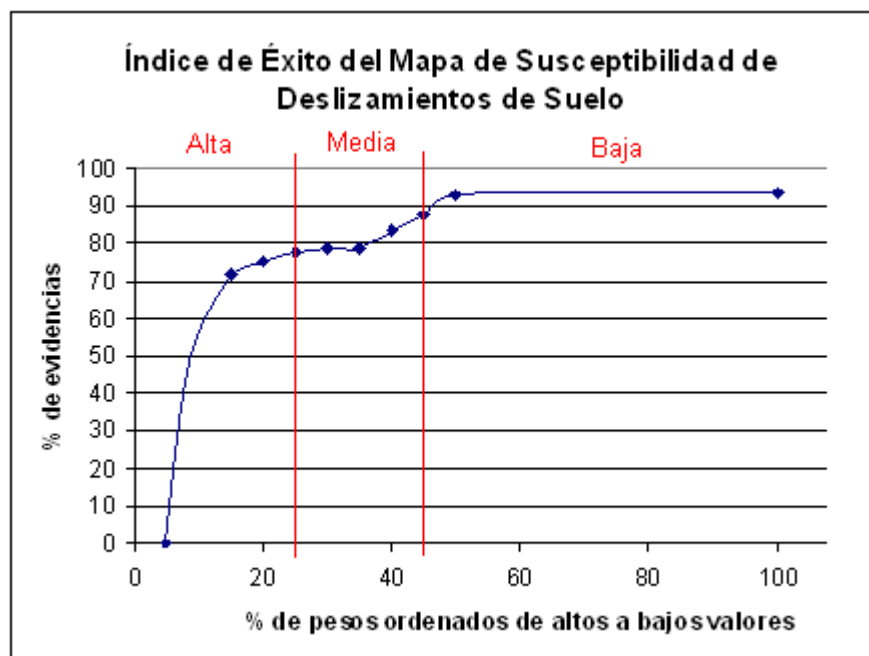


Figura 4.32.: Gráfico con los resultados del índice de éxito del mapa de susceptibilidad para la remoción tipo “Deslizamientos de Suelo”.

Del gráfico anterior (figura 4.32.) se puede realizar la siguiente clasificación:

Susceptibilidad Alta: Estas zonas concuerdan con cerca del 78% del total de las remociones catastradas y corresponden al 25% de los valores más altos de susceptibilidad.

Susceptibilidad Media: Estas áreas incluyen cerca del 10% del total de las remociones catastradas y corresponden a los valores entre el 25% y el 45% más altos de susceptibilidad.

Susceptibilidad Baja: Estas zonas coinciden con cerca del 12% del total de las remociones catastradas y corresponden al 55% de los valores más bajos de susceptibilidad.

En término de número de píxeles (figura 4.33.), la clasificación anterior genera un mapa que posee según clases:

Susceptibilidad Alta: 398.208 píxeles.

Susceptibilidad Media: 317.142 píxeles.

Susceptibilidad Baja: 874.481 píxeles.

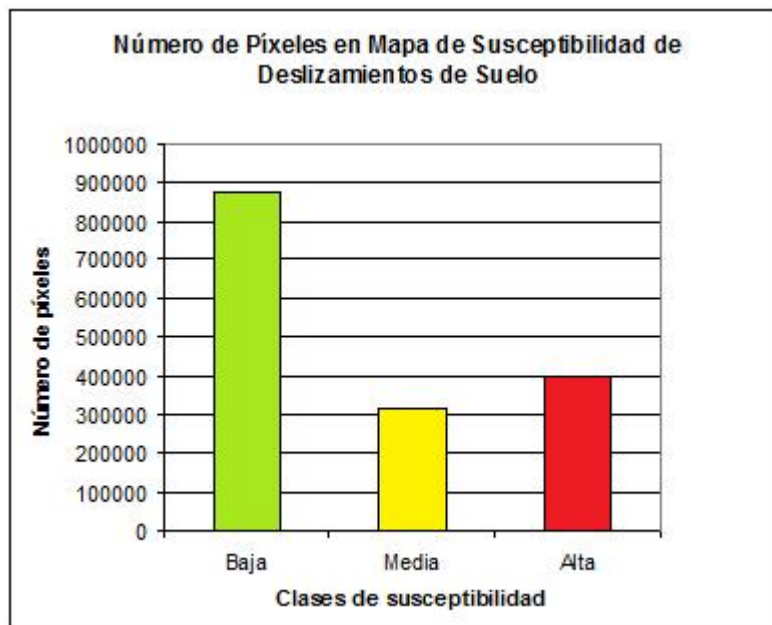
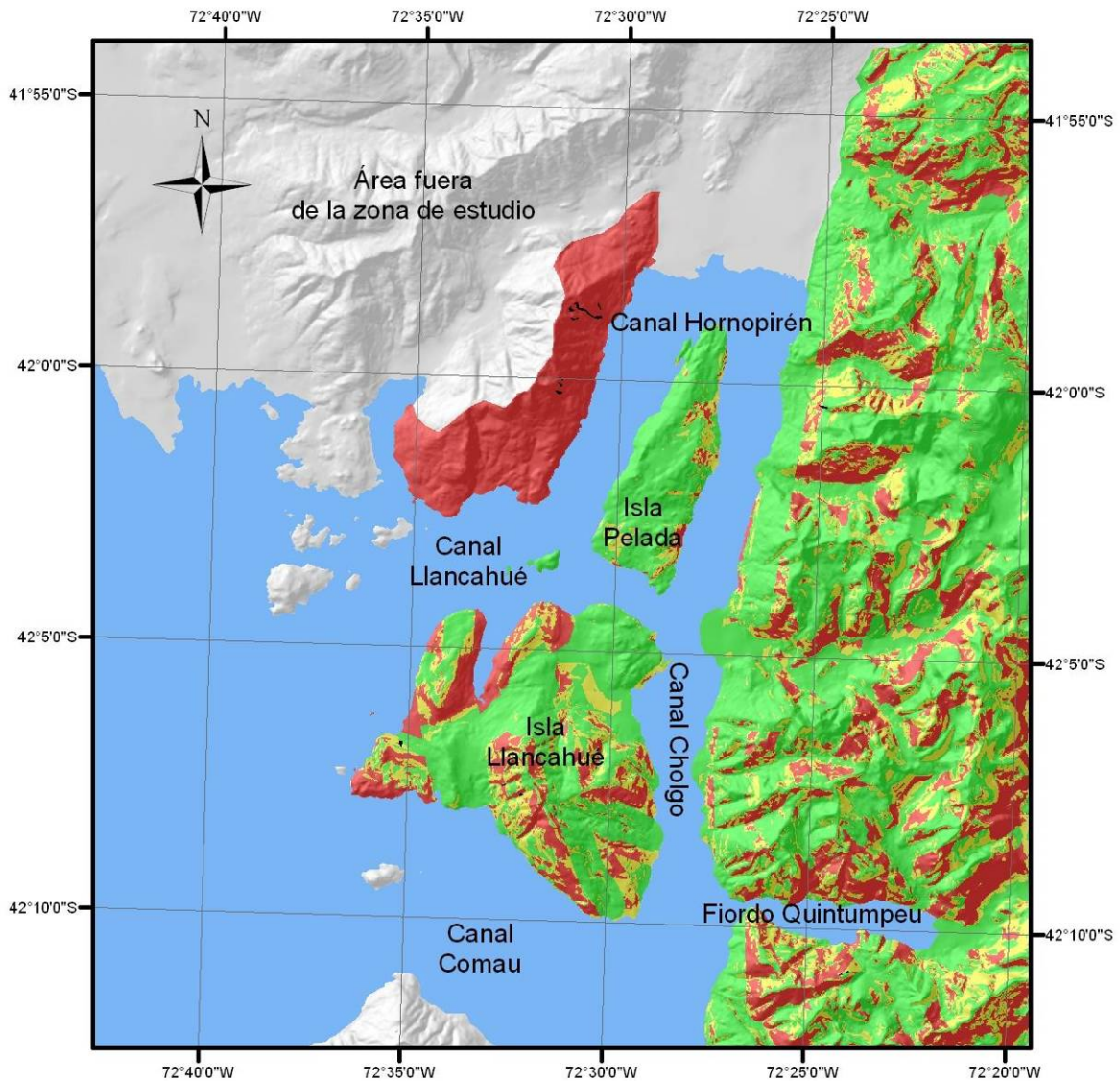
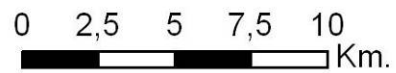



Figura 4.33.: Número de píxeles según clase de susceptibilidad en el mapa de susceptibilidad de deslizamientos de suelo.

Finalmente, el mapa de susceptibilidad clasificado para las remociones en masa del tipo deslizamientos de suelo, se muestra en la siguiente figura:



Leyenda



 Deslizamientos de Suelo

Susceptibilidad de Deslizamientos de Suelo (W)

 Baja  Media  Alta

Figuras 4.34.: Mapa de susceptibilidad para las remociones tipo “Deslizamiento de Suelo”.

En el mapa de susceptibilidad de deslizamientos de suelo, se puede observar que gran parte de las zonas que poseen una alta susceptibilidad coinciden con la unidad geológica “Tpd” (ver capítulo 2, figura 2.10), y en el resto de la zona de estudio, con las áreas clasificadas como “cerca” según el parámetro distancia a lineamientos y fallas. Otras zonas de alta susceptibilidad se presentan en las laderas norte de las quebradas que desembocan en el canal Cholgo, las cuales poseen una dirección de pendiente S. También se observan áreas de alta susceptibilidad en la costa NW de isla Llancahué, las que prácticamente coinciden con la unidad geológica “PP y Pz” (ver capítulo 2, figura 2.10).

Las superficies de baja susceptibilidad abarcan una parte considerable de la zona de estudio, ya que se ubican tanto en las islas Pelada y Llancahué, como también en la costa oriental del canal Cholgo, y hacia el interior. La distribución de estas zonas prácticamente coincide con las áreas que poseen una densidad media de lineamientos y fallas.

4.4.2. Resultados para remociones en masa en general.

El mapa final de susceptibilidad se obtuvo gracias a la superposición de los mapas de susceptibilidad de cada tipo de remoción en masa, y se clasificó según el índice de éxito.

Para este mapa de susceptibilidad final, los resultados del cálculo del índice de éxito se muestran en la siguiente figura:

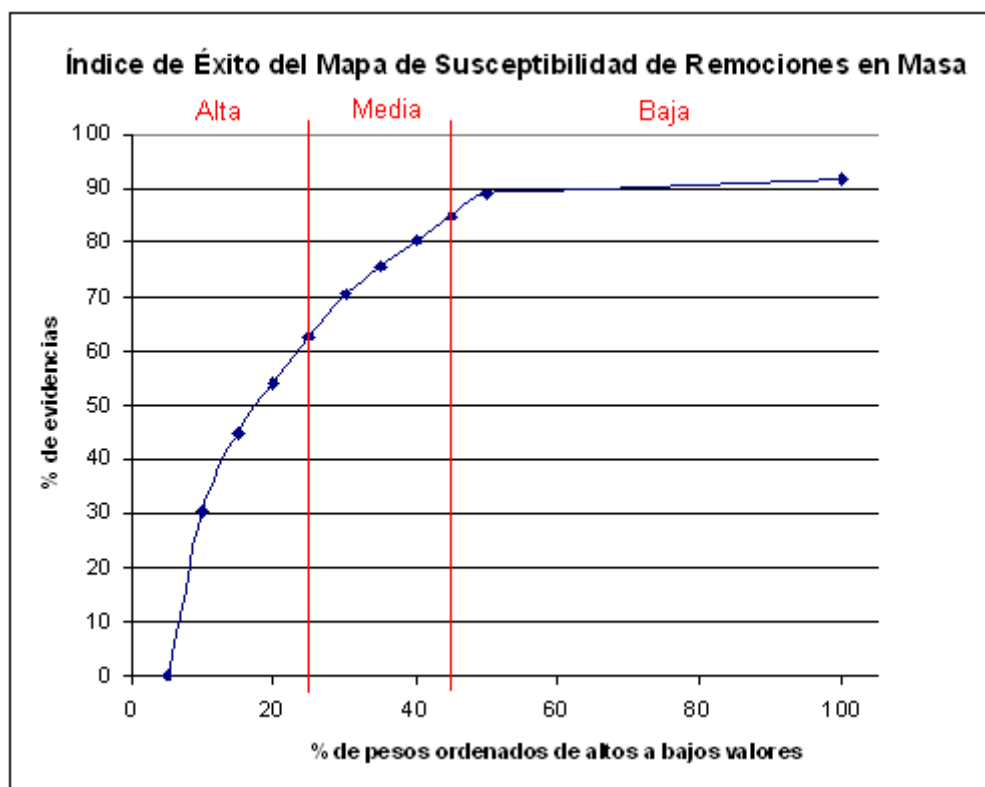


Figura 4.35.: Gráfico con los resultados del índice de éxito del mapa de susceptibilidad de remociones en masa.

De la figura 4.35. se puede realizar la siguiente clasificación:

Susceptibilidad Alta: Estas zonas concuerdan con cerca del 63% del total de las remociones catastradas y corresponden al 25% de los valores más altos de susceptibilidad.

Susceptibilidad Media: Estas áreas incluyen cerca del 22% del total de las remociones catastradas y corresponden a los valores entre el 25% y el 45% más altos de susceptibilidad.

Susceptibilidad Baja: Estas zonas coinciden con cerca del 15% del total de las remociones catastradas y corresponden al 55% de los valores más bajos de susceptibilidad.

En término de número de píxeles (figura 4.36.), la clasificación anterior genera un mapa que posee según clases:

Susceptibilidad Alta: 397.419 píxeles.

Susceptibilidad Media: 318.556 píxeles.

Susceptibilidad Baja: 873.856 píxeles.

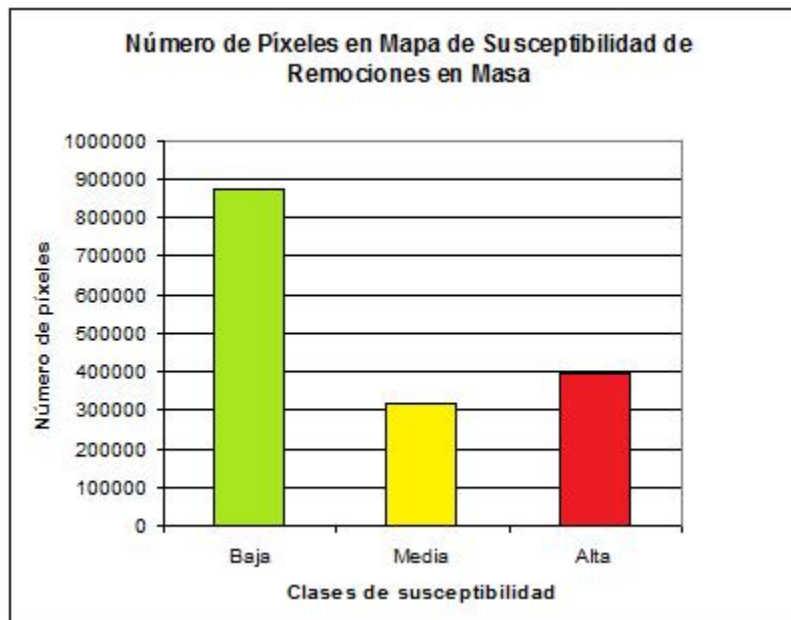
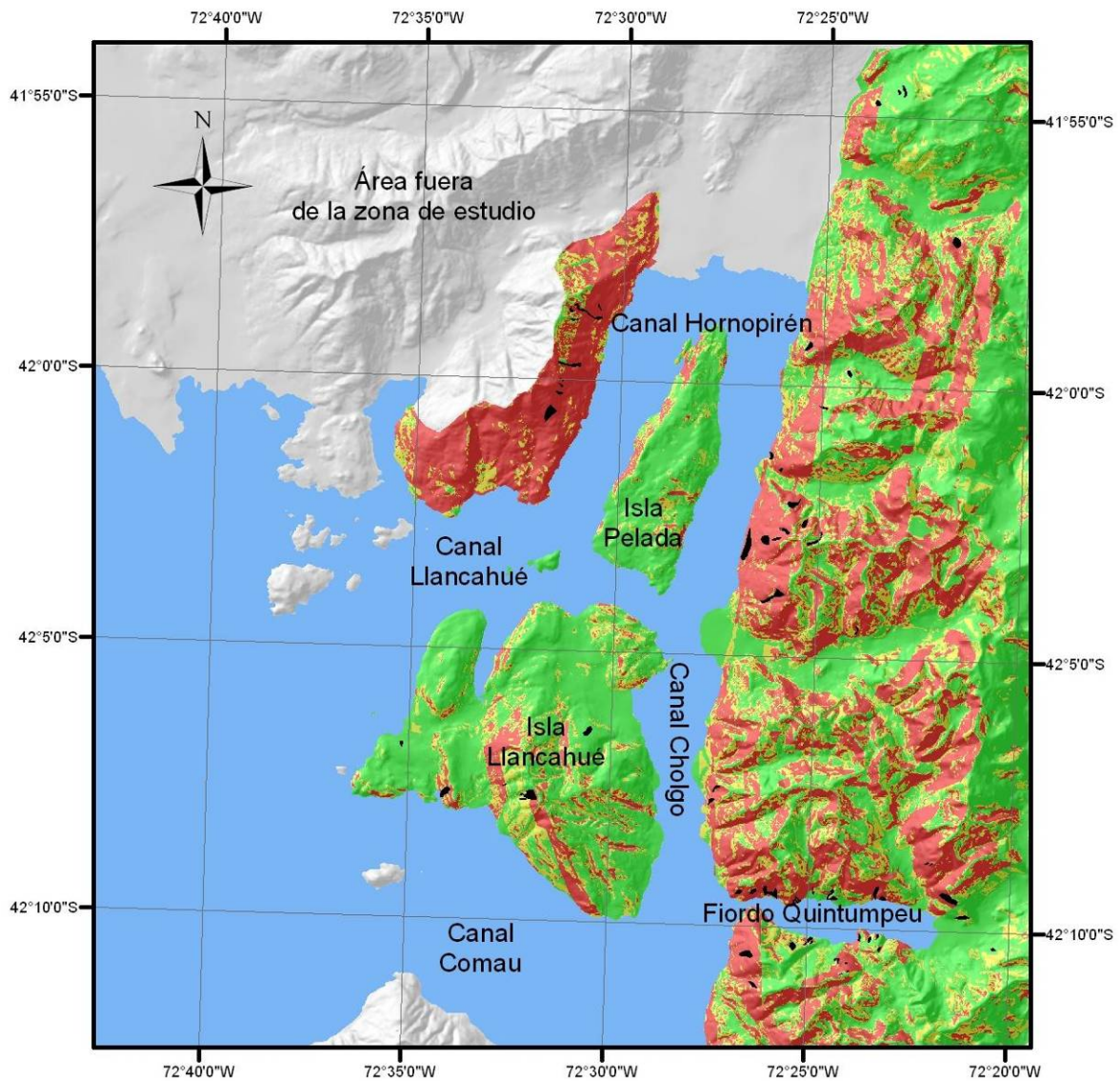
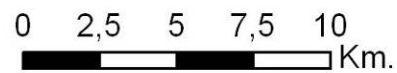



Figura 4.36.: Número de píxeles según clase de susceptibilidad en el mapa de susceptibilidad de remociones en masa.

Finalmente, el mapa de susceptibilidad clasificado para las remociones en masa del tipo deslizamientos de suelo, se muestra en la siguiente figura:



Leyenda



 Remociones en Masa

Susceptibilidad de Remociones en Masa (W)

 Baja  Media  Alta

Figura 4.37.: Mapa de susceptibilidad de remociones en masa final, clasificado según el índice de éxito.

En el mapa de susceptibilidad de remociones en masa se observa que existe una concentración de zonas de alta susceptibilidad en la superficie abarcada por la unidad geológica “Tpd” (ver capítulo 2, figura 2.10). Esta categorización está determinada especialmente por el alto peso que le asigna al factor “geología” el análisis de susceptibilidad obtenido tanto para las remociones tipo “Deslizamiento de Suelo”, como “Deslizamiento de Roca-Suelo”. Sin embargo, en esta unidad geológica la susceptibilidad varía entre media y baja en las zonas ubicadas “lejos” de los lineamientos y fallas, al igual que en el mapa de susceptibilidad de deslizamientos de roca-suelo (figura 4.30).

En la costa oriental del canal Cholgo, las zonas de alta susceptibilidad prácticamente abarcan toda la costa, y coinciden con las zonas de alta susceptibilidad presentadas en el mapa de susceptibilidad de caída y/o deslizamiento de roca (figura 4.22.).

Hacia el interior de la costa oriental del canal Cholgo, las zonas de alta susceptibilidad corresponden principalmente a lugares escarpados, o muy escarpados, y con una dirección de pendiente que varía entre sur (S) y oeste (W). Un ejemplo de esto es la costa norte del fiordo Quintumpeu. También se pueden ver zonas de alta susceptibilidad que coinciden con la distribución de los sectores ubicados “cerca” de los lineamientos y fallas. Las zonas de baja susceptibilidad, en general corresponden a las superficies que poseen una baja pendiente, con dirección de buzamiento E, y una curvatura plana; lo que se observa claramente en los valles de las quebradas.

La susceptibilidad obtenida en las islas Pelada y Llancahué, también presenta una distribución muy similar a la mostrada en el mapa de susceptibilidad de caídas y/o deslizamientos de rocas (figura 4.22.). En general, las islas presentan una baja susceptibilidad. Sin embargo, en la costa oeste de isla Pelada se puede observar una pequeña área en que la pendiente posee una dirección de caída NW, donde la susceptibilidad varía entre media y alta. Lo mismo ocurre en la isla Llancahué, las zonas de mayor susceptibilidad están concentradas en su mayoría en la costa NE del canal Comau, donde las laderas poseen una mayor pendiente, y el aspecto es SW.

5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

5.1. Introducción

En este capítulo se presentan las discusiones generadas a partir de los resultados obtenidos en los distintos análisis de susceptibilidad de remociones en masa. Las discusiones están ordenadas de la misma forma en que se presentaron los resultados.

5.2. Discusión de los Resultados de los Análisis de Susceptibilidad de Remociones en Masa

El núcleo del análisis es obtener el peso de cada parámetro en base a la distribución y la densidad de las remociones en masa dentro de cada mapa factor. Para determinar la densidad de remociones en masa dentro de cada mapa factor según sus distintas clases, se realizó un cálculo basado en la cantidad de píxeles que poseen determinada clase-factor, y la cantidad de píxeles que, además de tener esa clase-factor, presentan evidencias de remociones en masa. Luego, para obtener el peso de cada parámetro se comparó la densidad calculada, con la densidad en toda la zona de estudio.

5.2.1. Catastro de remociones en masa

Del catastro de remociones en masa se puede observar que las caídas y/o deslizamientos de rocas son el tipo de remoción más común de la zona de estudio. Ésto se deduce al comparar el número de muestras existentes de éste y los otros tipos de remociones en masa; ya que para estos últimos, la cantidad de muestras es menor a la mitad

de la cantidad de muestras existentes de caídas y/o deslizamientos de roca. Entre los deslizamientos de roca-suelo, los deslizamientos de suelo, y los flujos de detritos, por una considerable diferencia, los flujos de detritos son los menos abundantes.

Por otro lado, existe una gran diferencia en el tamaño de las superficies abarcadas por los distintos tipos de remociones en masa. Nuevamente, las caídas y/o deslizamientos de rocas poseen las mayores dimensiones, y los flujos de detritos las menores.

Dado lo anterior, y considerando que el análisis realizado es un análisis estadístico, se podría decir que los resultados obtenidos para las caídas y/o deslizamientos de rocas son mejores que los obtenidos para los otros tipo de remociones en masa (por tanto los resultados obtenidos para los flujos de detritos son los más cuestionables), ya que a medida que aumenta el tamaño de la muestra, crece la posibilidad de obtener un resultado de mayor precisión.

5.2.2. Mapas de factores determinantes en la inestabilidad de laderas

En la creación de los mapas de factores se utilizó tanto la literatura, como el criterio visual para determinar las distintas clases de factores. En general, los mapas obtenidos concuerdan con lo esperado.

Sin embargo, en los parámetros que se involucra una distancia, las clases no quedaron definidas de una manera convincente. Otra forma en la que se podrían definir las clases de estos factores (distancia a lineamientos y fallas; distancia normalizada a la cresta), sería haciendo un cálculo estadístico a partir de las muestras, definiendo las clases según las distancias que éstas posean a la morfología en cuestión.

5.2.3. Valores de peso de las clases-factores.

Los valores de peso obtenidos en cada clase-factor, están directamente relacionados a la cantidad, y al tamaño de las evidencias de cada tipo de remoción en masa.

Debido a lo anterior, existe una gran diferencia en el rango de los valores de peso obtenidos para cada factor entre los distintos tipos de remociones en masa. Los valores de pesos máximos obtenidos para los factores en las caídas y/o deslizamientos de rocas van aproximadamente entre 20 – 45; en los deslizamientos de roca-suelo van entre 5 – 30; en los deslizamientos de suelo van entre 2 – 25; y en los flujos de detritos van entre 0,5 – 3.

Los pesos varían su magnitud relativa según el tipo de remoción en masa. Sin embargo, existen 5 parámetros que en general presentan un mayor valor de peso; razón por la cual, se podría decir que son los más influyentes en la susceptibilidad de remociones. Estos factores son: distancia a lineamientos y fallas, geología, densidad de lineamientos y fallas, pendiente, y aspecto.

Al comparar las clases de los factores, se puede ver que existen ciertas clases-factor con un mayor peso que se repiten entre los distintos tipos de remociones en masa. Según el factor, estas clases son:

- *Aspecto*: Oeste (W) y Sur (S)
- *Curvatura media*: Cóncavo
- *Densidad de drenaje*: Baja
- *Distancia a lineamientos y fallas*: Cerca
- *Distancia normalizada a la cresta*: Media-alta
- *Geología*: Tpd
- *Densidad de lineamientos*: Media
- *Pendiente*: Muy escarpado.

Un parámetro en que no concuerda su clase de mayor peso, con la esperada, es en el factor “densidad de drenaje”. La densidad de drenaje se relaciona con el nivel de fracturamiento de la roca, a medida que éste aumenta, mayor es la susceptibilidad. Por esta razón la clase esperada podría variar entre “media y alta”, pero la clase de mayor peso resultó ser “baja”. Posiblemente, ésto se debe a la escala de trabajo.

Cabe destacar también, que en el factor distancia normalizada a la cresta, la clase que posee de forma repetida un mayor peso es la clase “media-alta”. Sin embargo, esta clase sólo obtuvo el mayor peso en dos tipos de remociones en masa: flujos de detritos; deslizamientos de suelo. En el análisis de susceptibilidad de caídas y/o deslizamientos de roca, la clase que adquirió el mayor peso es la clase “media”; y en el de deslizamientos de roca – suelo, la clase de mayor peso es la clase “base”. Estos resultados no concuerdan con lo esperado, ya que lo supuesto era que la mayor susceptibilidad se encontrara en las zonas cercanas a la cima. Sin embargo, esto podría arreglarse, como se dijo en el subcapítulo anterior (5.2.2. Mapas de factores determinantes en la inestabilidad de laderas), al definir las clases de este parámetros de una manera diferente.

Dado que la unidad geológica “Tpd” es la que presenta una mayor susceptibilidad entre las distintas unidades geológicas, y considerando que por el difícil acceso que genera la vegetación, la geología sólo se trabajó en los afloramientos de la costa, es recomendable realizar una mayor cantidad de estudios en esta unidad.

Además, hay que tener presente que probablemente, los factores analizados no son independientes, y pueden poseer una alta o baja correlación entre sí.

5.2.4. Discusión de los mapas de susceptibilidad obtenidos según tipo de remoción en masa.

Para cada tipo de remoción en masa se hizo un análisis de susceptibilidad. De cada análisis se obtuvo un mapa de susceptibilidad con los valores de peso. Estos mapas se clasificaron en 3 clases de susceptibilidad (alta, media, y baja) según el índice de éxito calculado para cada mapa.

5.2.4.1. Índice de éxito de los mapas de susceptibilidad.

En general, a partir de los índices de éxitos calculados se puede decir que los mapas de susceptibilidad obtenidos para cada tipo de remoción en masa poseen un índice bueno; ya que al menos el 25% de los valores de pesos más altos de susceptibilidad de cada mapa coincide con un 70% de las evidencias. Sin embargo, los índices de éxito varían según el tipo de remoción en masa. Al comparar los índices de éxito, según el 25% de los valores más altos de susceptibilidad, las remociones tipos que poseen el mejor y el peor índice son los flujos de detritos, y las caídas y/o deslizamientos de rocas respectivamente. En el mapa para los flujos de detritos el 25% de los valores más altos de susceptibilidad coincide aproximadamente con un 92% de las evidencias; en cambio en el mapa para las caídas y/o deslizamientos de rocas, el 25% de los valores más altos de susceptibilidad coincide aproximadamente con un 70% de las evidencias. Cabe destacar nuevamente, la directa relación que hay entre estos resultados y el número de evidencias existentes de cada tipo de remoción en masa.

De la clasificación de susceptibilidad realizada en cada mapa según los índices de éxitos, en términos de números de píxeles por clase, se puede decir que los mapas presentan cantidades similares de píxeles por clase de susceptibilidad. En todos los mapas, la clase “baja” es la que presentan el mayor número de píxeles, luego le sigue la clase “alta”, y por último la “media”. Sin embargo, en el mapa de susceptibilidad de deslizamientos de suelo, la clase “alta” posee un mayor número de píxeles en comparación con los mapas de los

otros tipos de remociones en masa. Ésto se debe a que en dicho mapa la unidad geológica “Tpd” está clasificada por completo como una zona de alta susceptibilidad.

5.2.4.2. Mapas de susceptibilidad.

Morfológicamente, la distribución de las distintas clases de susceptibilidades depende directamente del peso asignado a las distintas clases-factores en cada tipo de remoción en masa.

Una similitud presente en todos los mapas generados, es la distribución general de las zonas de mayor o menor susceptibilidad. Ya que las zonas de baja susceptibilidad están ubicadas principalmente en las islas, y en los valles de las quebradas.

En el mapa de susceptibilidad de caídas y/o deslizamientos de rocas, las zonas de mayor susceptibilidad coinciden con los sectores de alta pendiente, y cercanos a los lineamientos y fallas. También es posible observar la influencia que ejerce el factor “aspecto” tanto en las islas, como hacia el interior de la costa oriental del canal Cholgo, ya que las laderas que caen al oeste (W) presentan una mayor susceptibilidad.

En el mapa de susceptibilidad de flujos de detritos, las zonas de mayor susceptibilidad se hacen evidentes en los sectores de alta pendiente, ubicados “muy cerca” de los lineamientos y fallas. En las islas Pelada y Llancahué, es posible observar la influencia que ejerce el factor “distancia normalizada a la cresta”, donde las zonas clasificadas como “medio-alto” presentan una mayor susceptibilidad.

En el mapa de susceptibilidad de deslizamientos de roca-suelo, el parámetro “densidad de lineamientos y fallas” se manifiesta incuestionablemente, ya que todos los sectores que poseen una alta densidad están clasificados con una alta susceptibilidad. Otro factor que se observa evidentemente es “geología”, ya que la superficie abarcada por la unidad geológica “Tpd” en general posee una mayor susceptibilidad en comparación con el

resto de la zona de estudio. Las otras zonas de mayor susceptibilidad coinciden con los sectores que ubicados “cerca” de los lineamientos y fallas, y laderas de aspecto sur (S).

En el mapa de susceptibilidad de deslizamientos de suelo, el principal parámetro que determina las zonas de mayor susceptibilidad es el factor “geología”, ya que la superficie abarcada por la unidad geológica “Tpd” está clasificada por completo como una zona de susceptibilidad alta. También se observa en la isla Llancahué, cómo la unidad geológica “PP y Pz” también presenta una mayor susceptibilidad. En el resto de la isla Llancahué, y hacia el interior del canal Cholgo los sectores de alta susceptibilidad se presentan en las zonas clasificadas como “cerca” de los lineamientos y fallas. Sin embargo, en las laderas norte de las quebradas que desembocan en el canal Cholgo, también existen áreas de alta susceptibilidad, las cuales corresponden a pendientes muy escarpadas con dirección de buzamiento sur (S).

Dado que en el mapa de susceptibilidad de deslizamientos de roca-suelo, y en el de deslizamientos de suelo, la mayor susceptibilidad de la unidad geológica “Tpd” es más evidente que en los otros mapas, es recomendable realizar estudios geotécnicos en la superficie abarcada por dicha unidad.

5.2.5. Discusión del mapa de susceptibilidad de remociones en masa.

El mapa final de susceptibilidad se obtuvo gracias a la superposición de los mapas de susceptibilidad de cada tipo de remoción en masa. Este mapa, nuevamente se clasificó en 3 clases de susceptibilidad según el índice de éxito calculado.

5.2.5.1. Índice de éxito del mapa de susceptibilidad.

A partir del índice de éxito calculado se puede decir que el mapa de susceptibilidad de remociones en masa posee un índice regular a bueno, ya que al menos el 25% de los valores de pesos más altos de susceptibilidad coinciden aproximadamente con un 63% de las evidencias.

De la clasificación de susceptibilidad realizada según el índice de éxito, en términos de números de píxeles por clase, se puede decir que el mapa final presenta cantidades similares de píxeles por clase al compararlo con los mapas de susceptibilidad de los distintos tipos de remociones en masa. Sin embargo, en el mapa final, la clase “media” posee un mayor número de píxeles, lo que probablemente está controlado por la metodología utilizada para crear este mapa (superposición de los mapas de susceptibilidad de cada tipo de remoción en masa).

5.2.5.2. Mapa de susceptibilidad de remociones en masa.

En general, al observar el mapa de susceptibilidad de remociones en masa, se puede decir que la zona de estudio es susceptible a remociones en masa.

Las zonas de alta susceptibilidad se observan esencialmente en la superficie abarcada por la unidad geológica “Tpd”; y en el resto de la zona de estudio, coinciden con los sectores de mayor altura, alta pendiente, y con una dirección de pendiente que varía entre oeste (W) y sur (S). Ejemplos de lo anterior son: la costa oriental del canal Cholgo, y la costa norte del fiordo Quintumpeu. Hacia el interior del canal Cholgo, las zonas cercanas a los lineamientos y fallas, también poseen una alta susceptibilidad. Las áreas de susceptibilidad media en la mayoría de los casos rodean a las zonas de alta susceptibilidad. Las zonas de baja susceptibilidad están ubicadas principalmente en las islas Pelada, y Llancahué, como también en los valles de las quebradas.

Cabe destacar que al comparar el mapa de susceptibilidad de remociones en masa con los mapas obtenidos para cada tipo de remoción, se puede observar una mayor o menor semejanza en la distribución de las clases de susceptibilidad. El mapa final presenta para la superficie abarcada por la unidad geológica “Tpd” una distribución muy similar a la mostrada por el mapa de susceptibilidad de deslizamientos de roca-suelo. Para el resto de la zona de estudio, la distribución se parece bastante a la expuesta por el mapa de susceptibilidad de caídas y/o deslizamientos de rocas. Ésto está directamente relacionado a los valores de peso calculados para los distintos factores según el tipo de remoción, ya que

los mayores rangos de valores de peso se obtuvieron en los tipos de fenómenos recientemente nombrados.

A pesar de que el método estadístico bivariado, no entrega información sobre las correlaciones entre los factores, morfológicamente y gracias a los mapas obtenidos, se puede observar una relación entre los parámetros “curvatura media” y “pendiente”. Ya que por lo general, las zonas que presentan una curvatura cóncava, a la vez poseen una pendiente muy escarpada, lo que las hace ser zonas más susceptibles a las remociones en masa. Debido a esto, probablemente el parámetro “curvatura media”, podría no ser considerado en el análisis, ya que estaría siendo implícitamente apreciado por el factor “pendiente”. Por lo tanto, quizás convendría observar primero las posibles correlaciones entre los parámetros con otros métodos (como por ejemplo, el método estadístico multivariado), para luego hacer los análisis sólo con factores fundamentales.

5.2.6. Posibilidad de tsunami.

Al comparar la zona de estudio, con las costas del fiordo Aysén, se pueden observar varias semejanzas. Ambos lugares presentan una geomorfología glacial, donde la geología corresponde principalmente a rocas intrusivas graníticas. Por otro lado, poseen el mismo control estructural dado por la Zona de Falla Liquiñe-Ofqui (ZFLO).

Considerando los recientes registros sísmicos de la zona, así como el sismo ocurrido en el mes de abril del año 2007 en la costa del fiordo Aysén, se puede decir que la ZFLO es una zona de falla activa, por lo tanto existe una gran posibilidad de que ocurra algún sismo de similar magnitud en la zona de estudio.

Según lo expuesto anteriormente, y considerando que el tipo de remoción en masa más común de la zona de estudio corresponde a las caídas y/o deslizamientos de rocas, la posibilidad de la generación de un tsunami, ante un evento sísmico similar al ocurrido en Aysén, es alta. Es importante recordar que, si bien los volúmenes de las remociones en masa dependen de la magnitud del sismo, el tipo de remoción más significativa en la

generación de tsunamis corresponde a los deslizamientos de roca, puesto que rápidamente se transforman en avalanchas de roca (Sepúlveda & Serey, 2009).

Por la ubicación que posee la localidad de Hornopirén es factible que ésta se vea afectada por la ola de un tsunami. Sin embargo, como la mayor parte de Hornopirén se encuentra a una altura cercana a los 15-25 m., las zonas próximas al embarcadero son las que están en mayor riesgo. Finalmente, es recomendable realizar estudios más detallados para este peligro en particular, que incluya un modelamiento de las olas que podrían ser generadas y la inundación resultante en las costas de los fiordos, en particular en el pueblo de Hornopirén.

6. CONCLUSIONES

A pesar de que el índice de éxito del mapa final es regular a bueno, puede determinarse que la zona de estudio es susceptible a remociones en masa. Debido a las similitudes que presenta la zona de estudio con las costas del fiordo Aysén, y la no baja posibilidad que posee la zona de sufrir un evento sísmico de magnitudes mayores a las que se han registrado hasta el momento, la localidad de Hornopirén factiblemente puede verse afectada por un tsunami, razón por la cual es recomendable realizar estudios más detallados para este peligro.

En general, a partir de los mapas de susceptibilidad de remociones en masa generados para la zona de estudio, se puede decir que:

- las zonas de alta susceptibilidad se observan esencialmente en la superficie abarcada por la unidad geológica “Tpd”; la costa oriental del canal Cholgo; y la costa norte del fiordo Quintumpeu; y en el resto de la zona de estudio, coinciden con los sectores de mayor altura, alta pendiente, y con una dirección de pendiente que varía entre oeste (W) y sur (S).
- las zonas de baja susceptibilidad están ubicadas principalmente en las islas Pelada, y Llancahué, como también en los valles de las quebradas.

Dado que en el mapa de susceptibilidad de deslizamientos de roca-suelo, y en el de deslizamientos de suelo, la mayor susceptibilidad de la unidad geológica “Tpd” es más evidente que en los otros mapas, es recomendable realizar estudios geotécnicos en la superficie abarcada por dicha unidad.

De los factores considerados como determinantes en la inestabilidad de las laderas para la zona de estudio, existen 5 parámetros en común entre los distintos tipos de remociones en masa, que son los más influyentes en la susceptibilidad. Estos factores son: distancia a lineamientos y fallas, geología, densidad de lineamientos y fallas, pendiente, y aspecto.

Los resultados obtenidos con los análisis de susceptibilidad de remociones en masa a través del método estadístico bivariado, dependen directamente de la cantidad, y el tamaño de las evidencias muestreadas.

Debido a que el método estadístico bivariado, no entrega información sobre las correlaciones entre los factores, podría ser conveniente observar primero con otros métodos (como por ejemplo, el método estadístico multivariado) las posibles correlaciones entre los parámetros, para luego realizar los análisis sólo con los factores fundamentales.

7. REFERENCIAS

- Aleotti, P., Chowdhury, R., 1999. Landslide hazard assessment: summary review and new perspectives. *Bull Eng Geol Env No. 58*, p.21- 44.
- Arenas, M.; Naranjo, J.; Clavero, J.; Lara, L., 2008. Earthquake-induced landslides: susceptibility mapping for crisis management. *Congreso Geológico Argentino, N° 17, Actas 1:255*. Salvador de Jujuy.
- Ayalew, L., Yamagishi, H., 2005. The application of GIS-based logistic regression for landslide susceptibility mapping in the Kakuda-Yahiko Mountains, Central Japan. *Geomorphology No.65*, p. 15-31.
- Brabb, E.E., Pampeyan, E.H., Bonilla, M.G., 1972. Landslide susceptibility in San Mateo County, California. Misc Field Studies Map MF360. *US Geological Survey*, Reston.
- Boham-Carter, Graeme, F., 1994. Geographic Information Systems for Geoscientists: Modelling with GIS. Pergamon Press Edition, Toronto.
- Bortolami, G.C., De Luca, D.A., Masciocco, L., 1994. Studio sulla realizzazione di carte della franosità a scala regionale. *In: Proc of IV Geoeng Int Congr "Soil and Groundwater Protection"*, Torino.

- Carrara, A., Catalano, E., Sorriso-Valvo, M., Reali, C., Ossi, I., 1978. Digital Terrain Analysis for land evaluation. *Geologia Applicata e Idrogeologia*, No. 13, p. 69–127.
- Carrara, A., 1983. Multivariate methods for landslide hazard evaluation. *Mathematical Geol*, No. 15, p. 403–426.
- Carrara, A., 1988. Landslide hazard mapping by statistical methods: a black box model approach. In: *Proc of the Workshop on Natural Disaster in European Mediterranean Countries*. Perugia, Italy. Consiglio Nazionale delle Ricerche.
- Cembrano, J., Beck, M.E. Jr, Burmester, R.F., Rojas, C., García, A., Hervé, F., 1992. Paleomagnetism of Lower Cretaceous Rocks from East of the Liquiñe-Ofqui fault zone, southern Chile: evidence of small in-situ clockwise rotations. *Earth and Planetary Science Letters*, 113, p. 539-551.
- Cembrano, J., Hervé, F., 1993. The Liquiñe Ofqui Fault Zone: a major Cenozoic strike slip duplex in the Southern Andes. Second ISAG, Oxford (UK), 21-23, p. 175-178.
- Cembrano, J., Moreno H., 1994. Geometría y naturaleza contrastante del volcanismo Cuaternario entre los 38° S y 46° S: ¿Dominios compresionales y tensionales en un régimen transcurrente?. *VII Congreso Geológico Chileno*, Actas Vol. I., p. 240 – 244.

- Cembrano J., Lavenu A., Reynolds P., Arancibia G., López G., Sanhueza A., 2002. Late Cenozoic transpressional ductile deformation north of the Nazca–South America–Antarctica triple junction. *Tectonophysics No.354*, p. 289–31.
- Choubey, V.D., Chaudhari, S., Litoria, P.K., 1992. Landslide hazard zonation in Uttarkashi and Tehri districts, UP Himalaya, India. *In: Proc of the Sixth Int Symp Landslides*, Christchurch, New Zealand, No. 2, p. 911–917.
- Cruden, D., 1991. A simple definition of a Landslide. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*. No. 43, p. 27-29.
- Cruden, D., Varnes, D., 1996. Landslide types and processes. *In Turner A.K. & Schuster R.L., 1996. Landslides: Investigation and Mitigation. Special Report 247. Transportation Research Board, National Research Council. National Academy Press, Washington D.C. 675 p.*
- Drake, R., Hervé, F., Munizaga, F., M. Beck, 1992. Magmatism and the Liquiñe-Ofqui Fault Zone, southern Chile (40° - 46° S. Lat.). *Comunicaciones N° 42 (Vth International Circumpacific Terrane Conference)*, p. 69-74.
- García, A., Beck, M.E. Jr, Burmester, R.F., Hervé, F., Munizaga, F., 1988. Paleomagnetic reconnaissance of the Region de los Lagos, southern Chile, and its tectonic implications. *Revista Geológica de Chile No. 15*, p. 13-30.

- González De Vallejo, L.I., Ferrer, M., Ortuño, L., Oteo, C., 2002. *Ingeniería Geológica*. Editorial Prentice Hall. 715 p.
- Goodman, R.E., 1989. Introduction to Rock Mechanics. *New York: Wiley & Sons*, 2nd Edition.
- Hauser, A., 1993. Remociones en masa en Chile. Servicio Nacional de Geología y Minería, Santiago. *Boletín No. 45*, p. 7-29.
- Hervé, F., 1976. Estudio geológico de la falla Liquiñe-Reloncaví en el área de Liquiñe; antecedentes de un movimiento transcurrente (Provincia de Valdivia). *Actas I Congreso Geológico Chileno*, B39- B56.
- Hervé, F., Araya, E., Fuenzalida, F.J., Solano, A., 1978. Nuevos antecedentes acerca de la geología de la costa de Chiloé Continental, X región, Chile. VII Congreso Geológico Argentino, Actas, I: 629 – 638.
- Lange, D.; Cembrano, J.; Rietbrock, A.; Haberland, C.; Dahm, T.; Bataille, K., 2008. First seismic record for intra-arc strike-slip tectonics along the Liquiñe- Ofqui fault zone at the obliquely convergent plate margin of the Southern Andes. *Tectonophysics*, doi:10.1016/j.tecto.2008.04.014.

- Lara, M., 2007. Metodología de evaluación de peligro de remoción en masa Chile Central, con aplicación en la quebrada San Ramón, Santiago Oriente. Tesis de Magíster en Ciencias, mención Geología. Departamento de Geología, Universidad de Chile.
- Lavenu, A., Cembrano, J., 1994. Neotectónica de rumbo dextral en la Zona de Falla Liquiñe-Ofqui: geometría, cinemática, y tensor de esfuerzos. *Congreso Geológico Chileno N°7, Actas Volumen I*, p. 81-85.
- Leroi, E., 1996. Landslide hazard – Risk maps at different scales: objectives, tools and developments. *In: Proc VII Int Symp Landslides, Trondheim, No. 1*, p. 35–52.
- Levi, B.; Aguilar, A.; Fuenzalida, R., 1966. Reconocimiento geológico en las provincias de Llanquihue y Chiloé. *Boletín N°19*.
- Liao, H.W. & Lee, C.T., 2000. Landslides triggered by the Chi-Chi earthquake. *In: 21st Asian Conference on Remote Sensing, Diciembre 2000, Taipei*. GIS Development. Con acceso desde el 7 de Mayo de 2002. Disponible en la Web: <<http://www.gisdevelopment.net/aars/acrs/2000/ts8/hami0007.htm>>.
- Meherota, G.S., Dharmaraju, R., Kanungo, D.P., 1994. Landslide hazard zonation – a tool for environmental development and protection of hilly terrain. *In: “Man and Mountain 94”: primo convegno internazionale per la protezione e lo sviluppo dell’ambiente montano*, p. 101–113.

- Meunier, P., Hovius N., Haines J.A., 2008. Topographic site effects and the location of earthquake induced landslides. *Earth and Planetary Science Letters No. 275*, p. 221-232.
- Naranjo, J.A. & Varela, J., 1996. Flujos de detritos y barro que afectaron el sector oriente de Santiago el 3 de mayo de 1993. Servicio Nacional de Geología y Minería, *Boletín No.47*.
- Naranjo, J.A., Clavero, J., Arenas, M., Lara, M., Moreno, M., 2007. Efectos de la crisis sísmica de Aisén 2007. In: *Congreso Nacional, No. 28 y Congreso Internacional de Geografía, No. 13*. Universidad de Chile, Facultad de Arquitectura, Urbanismo y Geografía, Resúmenes: 116 p. Santiago.
- Naranjo, J.A., Arenas, M., Clavero, J., Muñoz, O., 2009. Mass movement-induced tsunamis: main effects during the Patagonian Fjordland seismic crisis in Aisén (45°25'S), Chile. *Andean Geology No. 36 (1)*, p. 137-145.
- Neuland, H., 1976. A prediction model of landslips. *Catena, No. 3*, p. 215–230.
- Nielsen, T.H., Wrigth, R.H., Vlastic, T.C., Spangle, W.E., 1979. Relative slope stability and land-use planning in the San Francisco Bay region, California. US *Geological Survey Professional Paper 944*.

- Niemeyer, H., Skarmeta J., Fuenzalida, R., Espinosa, W., 1984. Carta geológica de Chile, escala 1:500.000. Hojas Península de Taitao y Puerto Aysén. No. 60-61. Servicio Nacional de Geología y Minería.
- Okimura, T., Kawatani, T., 1986. Mapping of the potential surface-failure sites on granite mountain slopes. *In International Geomorphology* (J. Gardiner, ed.), John Wiley and Sons, New York, Part 1, pp. 121-138.
- Pavez, A., Sepúlveda, S.A., Aguilera, R., 2007. Remote sensing analysis of landslides and coastal changes after the 2007 Aysén Mw 6.2 earthquake. *In Geosur 2007*: 120. Santiago.
- Plafker, G. & Ericksen, G. E., 1978. Nevados Hauascaran avalanches, Peru. *In Voight, B. (ed.), Rockslides and Avalanches 1: Natural Phenomena*. Developments in Geotechnical Engineering. Oxford: Elsevier, 14A, p. 377-314.
- Pomeroy, J.S., 1979. Map showing landslides and areas susceptible to sliding in Beaver County, Pennsylvania. *US Geological Survey Miscellaneous Investigation Map I-1160*.
- Rodriguez, C.E., Bommer, J.J. & Chandler, R.J., 1999. Earthquake-induced landslides: 1980-1997. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 18, p.325-346.

- Schachter, P., 2008. Evaluación de la susceptibilidad de remociones en masa en el sector nororiente de la cuenca de Santiago mediante métodos estadísticos multivariados. Memoria de Título de Geólogo, Universidad de Chile.
- Scott, K.M., Macías, J.M., Naranjo, J.A., Rodríguez, S., McGeehin, J.P., 2001. Catastrophic Debris Flows Transformed from Landslides in Volcanic Terrains: Mobility, Hazard Assessment and Mitigation Strategies. *U.S. Geological Survey Professional Paper 1630*.
- Seed, H.B. & Idriss, I.M., 1968. Soil moduli and damping factors for dynamic analyses earthquake engineering research center, University of California, Berkeley, Report EERC 70-10.
- Sepúlveda, S.A., Murphy, W., Petley, D.N., 2004. The Role of Topographic Amplification Effects on the Generation of Earthquake-Induced Rock Slope Failures. *In: Landslides, Evaluation and Stabilization*. Lacerda, W.A., Ehrlich, M., Fontoura, S.A.B. and Sayao, S.F. (eds.), Balkema, vol.1, 311-315.
- Sepúlveda, S.A., Murphy, W., Jibson, R.W., Petley, D.N., 2005. Seismically induced rock slope failures resulting from topographic amplification of strong ground motions: The case of Pacoima Canyon, California. *Engineering Geology No.80*, p. 336-348.

- Sepúlveda, S.A., Serey, A., Pavez, A., Barrientos, S., Lara, M. 2008. Analysis of earthquake-induced landslides during the 2007 Aysén Fjord seismic swarm, Chilean Patagonia (45.5°S). *In 33rd International Geological Congress*, Proceedings, paper GHZ04203L. Oslo.
- Sepúlveda, S.A., Serey, A., 2009. Tsunamigenic, earthquake-triggered rock slope failures during the 21st of April 2007 Aysén earthquake, southern Chile (45.5°S). *Andean Geology*, 36 (1), p. 131-136.
- SERNAGEOMIN, 2003. Mapa Geológico de Chile: versión digital. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica 75, escala 1: 1.000.000.
- Sitar, N., Bardet, J.P., Lin, M.L., Hu, J.J., Khazai, B., Kramer, S.L., Perkins, W.J., Wright, R.H., 2001. Chi-Chi earthquake reconnaissance report, Capítulo 5: Landslides. *Earthquake Spectra*, 17, p. 61 – 76.
- Soeters, R., Van Westen, C.J., 1996. Slope instability recognition, analysis and zonation. *In: Turner, AK. and Schuster, RL. (eds.), Landslides investigation and mitigation, transportation*. Research Board, National Academy Press, p. 129-177.

- Sorriso-Valvo, M., Tansi, C., Antronico, L., 1996. Relazione tra frane, forme del rilievo e strutture tettoniche nella media valle del Fiume Crati (Calabria). *Geogr Fis Dinam Quat No. 19*, p. 107–117.
- Stumpf, A., 2008. Landslide susceptibility assessment in Central Chile. Application of a probabilistic, GIS-based method at Eastern Santiago and the bordering Andes. Tesis de Diploma en Geografía, Universidad Técnica de Dresden.
- Süzen, M.L., Doyuran, V., 2003. A comparison of the GIS based landslide susceptibility assessment method: multivariate versus bivariate. *Environmental Geology No.45*, p.665-679.
- Van Westen, C.J., 2002. Remote sensing and geographic information systems for natural disaster management. *In: Environmental modelling with GIS and remote sensing / A. Skidmore (ed.)*. London etc.: Taylor & Francis, 2002. ISBN 0-415-24170-7 pp. 200-226
- Varnes, D.J., 1978. Slope movement types and processes. *In Landslides, Analysis and Control, Special Report N°176*. Schuster, R.L., Krizek, R.J., edits. Transportation Research Board, National Academy of Sciences, Washington D.C., p.11-33
- Varnes, D.J., 1984. Landslide Hazard Zonation: A review of principles and practice. *Natural Hazards 3*, UNESCO, 63 p.

- Ward T.J., Ruh-Ming L., Simons D.B., 1982. Mapping landslide hazard in forest watershed. *J Geotechn Eng Div*, ASCE, 108 (GT2), p. 319–324.
- Wilson, R.C. & Keefer, D.K., 1985. Predicting areal limits of earthquake-induced landsliding. *In: Ziony, J.I. (ed.), Evaluating Earthquake Hazards in Los Angeles Region – An Earth Science Perspective, U.S. Geological Survey Professional Paper 1360.*
- Wright, C. & Mella, A., 1963. Modifications to the soil pattern of south-central Chile resulting from seismic and associated phenomena during the period May to August 1960. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 53 (6), p. 1367 – 1402.

ANEXOS

A. CORDENADAS UTM DE LOS PUNTOS DE TERRENO

Tanto las muestras, como las distintas mediciones, fueron nombradas según los puntos de terreno.

Punto	Coordenada S	Coordenada W
321	707144	5349411
322	706950	5348021
323	706560	5347006
324	706144	5346081
325	705768	5346081
326	704797	5344053
327	702767	5343112
328	701954	5338980
329	700094	5337676
330	698733	5334762
331	700835	5332032
332	700551	5332527
333	699271	5332574
334	703460	5338635
335	703874	5340623
336	706396	5342805
337	709349	5348307
338	710564	5348393
339	710574	5347716
340	713103	5348808
341	710283	5344228
342	709329	5342360
343	708774	5340213

Punto	Coordenada S	Coordenada W
344	708300	5339406
345	708556	5337070
346	707426	5335664
347	708236	5333079
348	707364	5328349
349	704783	5329279
350	709713	5323853
351	710415	5326858
352	710491	5327282
353	711687	5328766
354	712801	5328441
355	713449	5328312
356	715069	5328238
358	716087	5327946
359	712608	5327904
360	709643	5331917
361	709665	5332561
362	709680	5338902
363	711954	5345915
364	712356	5347735
365	710376	5336720
366	710884	5340685
367	712040	5344369

B. DESCRIPCIÓN DE MUESTRAS DE MANO

- Muestra 321:

Unidad: Tpd

Roca holocristalina, equigranular, afanítica, con tamaño de grano fino a muy fino. Presenta una estructura homogénea, fábrica isótropa. Su color es gris verdoso.

Nombre de roca: Diorita



Figura B.1.: Muestra N° 321

- Muestra 321 A:

Unidad: Tpd

Roca holocristalina, inequigranular, porfírica, hipidiomórfica, con tamaño de grano medio.

Presenta fenocristales de plagioclasas de largo menor a 5 mm. Además, posee fenocristales de anfíbolos en menor cantidad y tamaño. La masa fundamental es de color gris verdoso.

Su estructura es homogénea, y la fábrica es isótropa.

Nombre de roca: Andesita



Figura B.2.: Muestra N° 321A

- Muestra 325:

Unidad: Tpd

Roca holocristalina, equigranular, afanítica, con tamaño de grano fino. Su estructura es homogénea, y su fábrica isotrópica. Su color es verde grisáceo. En algunas zonas se observan pequeños cristales máficos (menores a 1 mm). Presenta finas vetillas de cuarzo, las cuales poseen un ancho menor a 1 mm.

Nombre de roca: Diorita



Figura B.3.: Muestra N° 325

- Muestra 326:

Unidad: Tpd

Roca holocristalina, equigranular, afanítica, con tamaño de grano fino. Presenta pequeñas zonas con textura fanerítica, donde se pueden observar cristales subhedrales de anfíbolos, cuarzo, y plagioclasas. Su estructura es homogénea, y su fábrica isótropa. Su color es gris oscuro verdoso.

Posee mineralización diseminada y en vetillas de calcopirita.

Nombre de roca: Diorita



Figura B.4.: Muestra N° 326

- Muestra 327:

Unidad: Tpd

Roca holocristalina, equigranular, fanerítica, alotromórfica, con tamaño de grano fino.

Presenta una estructura homogénea, fábrica isotropa, y un índice de color leucocrático.

Contiene:

25% de minerales máficos

55% de plagioclasas

20% de cuarzo

Nombre de roca: Monzodiorita.



Figura B.5.: Muestra N° 327

- Muestra 328:

Unidad: Pz

Roca holohialina, afanítica de color gris, y estructura masiva.

Nombre de roca: Andesita



Figura B.6.: Muestra N° 328

- Muestra 330:

Unidad: Pz

Roca holocristalina, inequigranular, porfírica, de grano fino. Presenta fenocristales máficos de largo menor a 3 mm. Posee una estructura homogénea, y una fábrica isotrópica. Es de color gris verdoso.

Nombre de roca: Andesita



Figura B.7.: Muestra N° 330.

- Muestra 332:

Unidad: Ttm

Roca holocristalina, equigranular, fanerítica, hipidiomórfica, de grano fino. Presenta una estructura homogénea, fábrica isótropa, y un índice de color leucocrático. Es de color gris.

Contiene:

10% de minerales máficos

Nombre de roca: Granitoide



Figura B.8.: Muestra N° 332

- Muestra 333:

Unidad: PP

Roca holocristalina, equigranular, fanerítica, alotromórfica, de grano muy fino. Su estructura es homogénea?, y su fábrica isótropa. Es de color gris oscuro.

Nombre de roca: ¿?



Figura B.9.: Muestra N° 333

- Muestra 334:

Unidad: PP

Roca lepidoblástica, de fábrica planar, y estructura homogénea. Es de color verde y posee un brillo sedoso. Presenta una esquistosidad gruesa.

Nombre de roca: Esquisto verde micáceo



Figura B.10.: Muestra N° 334

- Muestra 335:

Unidad: PP

Roca lepidoblástica, de fábrica planar, y estructura homogénea. Es de color verde y posee un brillo sedoso. Presenta una esquistosidad gruesa y variada, existen sectores con mayor o menor esquistocidad.

Nombre de roca: Esquisto verde micáceo



Figura B.11.: Muestra N° 335

- Muestra 337:

Unidad: Ttm

Roca holocristalina, equigranular, fanerítica, hipidiomórfica, con tamaño de grano fino a medio. Posee una estructura homogénea, fábrica isótropa, y un índice de color leucocrático.

Contiene:

25% de minerales máficos (15% anfíbolos, 5% piroxenos, 5% anfíbolos biotitizados).

40% de cuarzo

30% de plagioclasas

5% de feldespato alcalino

Nombre de roca: Granito de anfíbola.



Figura B.12.: Muestra N° 337

- Muestra 340:

Unidad: Ttm

Roca holocristalina, equigranular, afanítica, hipidiomórfica, de grano muy fino. Posee estructura homogénea, y fábrica isótropa. Es de color verde grisáceo, y se encuentra levemente foliada.

Nombre de roca: Metabasita?



Figura B.13.: Muestra N° 340

- Muestra 359:

Unidad: Ttm

Roca holocristalina, inequigranular, fanerítica, alotromórfica, con tamaño de grano fino a medio. Presenta una estructura homogénea, fábrica isótropa, y un índice de color leucocrático.

Contiene:

35% de minerales máficos (20% anfíbolos, 15% piroxenos)

15% de cuarzo

50% de plagioclasas

Nombre de roca: Cuarzo Monzodiorita de anfíbolos.



Figura B.14.: Muestra N° 359

- Muestra 365:

Unidad: Ttm

Roca holocristalina, inequigranular, fanerítica, hipidiomórfica, con tamaño de grano medio a grueso. Posee una estructura bandeada, fábrica plano-linear, y un índice de color mesocrático.

Contiene:

40% de minerales máficos (anfíbolas, biotitas, y anfíbolas biotitizadas).

40% de cuarzo

20% de plagioclasas

Nombre de roca: Tonalita de anfíbola.



Figura B.15.: Muestra N° 365

C. DESCRIPCIÓN DE CORTES TRASPARENTES

- Corte 340

Textura: Granoporfidonematoblástica.

Composición:

- Cuarzo: 45%; tamaño de grano < 0,3 mm.; se presenta en mosaico.

Características diagnósticas: gris de primer orden, relieve bajo, extinción ondulosa.

- Clastos andesíticos: 25%; tamaño de grano < 2 mm.

Se encuentran alterados, y frecuentemente con reemplazo de epidota, cuarzo, y anfíbulas al interior de ellos. Los minerales de reemplazo poseen un mayor tamaño de grano en comparación a como se presentan en el resto del corte.

- Anfíbola: 17%; largo del grano < 0,15 mm.

Características diagnósticas: hábito tabular, color pardo-verdoso a nícoles paralelos, exfoliación 56°-124°.

- Epidota: 10%; tamaño de grano < 0,6 mm.

Características diagnósticas: color verde-amarillo a nícoles paralelos, manto de Arlequín a nícoles cruzados.

- Minerales opacos: 3%.

Presentan un hábito cuadrado, por lo que se podría decir que corresponden a pirita.

Paragénesis: Epidota-Cuarzo-Anfíbola

Protolito: Basalto.

Grado metamórfico: Facie Anfibolita → Presión aprox.: 2-10 kbar

Temperatura aprox.: 500-600 °C

Nombre de la roca: Metabasita.

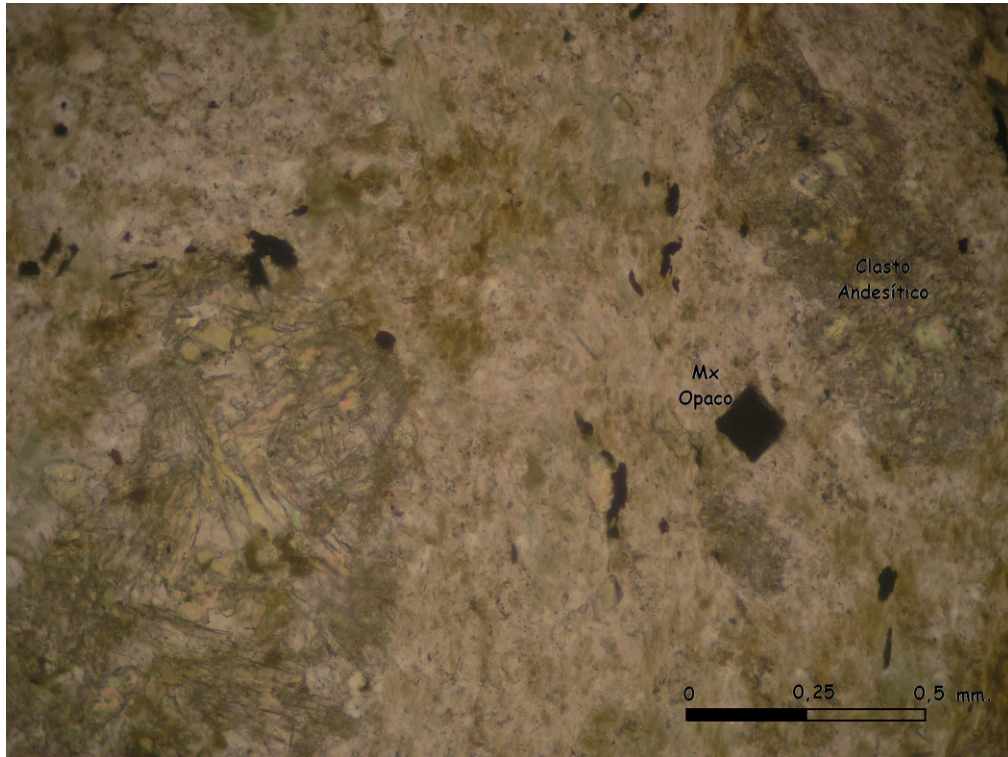


Figura C.1.: Corte 340 a nicoles paralelos.

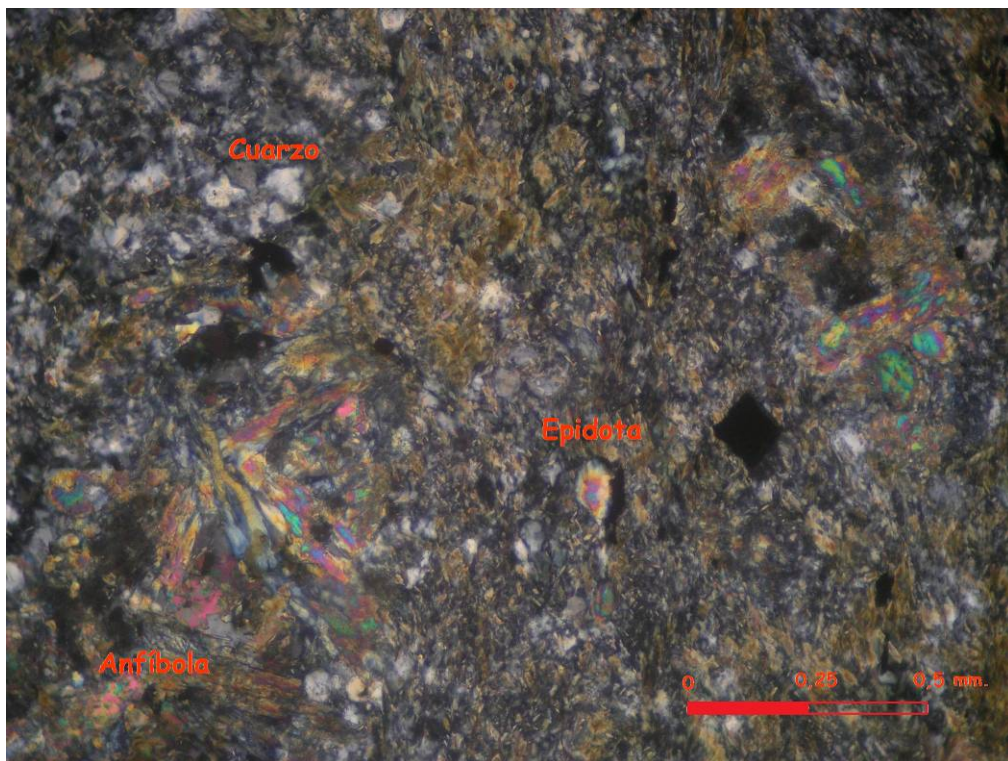


Figura C.2.: Corte 340 a nicoles cruzados.

- Corte 333

Textura: Granolepidoblástica.

Composición:

- Cuarzo: 50%; tamaño de grano < 0,5 mm.; se presenta en mosaico; algunas zonas poseen cúmulos de cuarzo.

Características diagnósticas: gris de primer orden, relieve bajo, extinción ondulosa.

- Arcillas: 30%; tamaño de grano no observable al microscopio; se presenta en bandas, y como alteración en feldespatos.

Características diagnósticas: masa de color café- negrusco.

- Plagioclasas: 10%; largo del grano < 0,3 mm; se presenta con alteración de Sericita.

Características diagnósticas de la Plagioclasa: hábito tabular, gris de primer orden, macla polisintética.

Características diagnósticas de la Sericita: color amarillo-grisáceo a nícoles cruzados, se presenta como “challa” sobre los minerales que altera.

- Muscovita: 7%; largo del grano < 0.5 mm.; se presenta con alteración de Epidota.

Características diagnósticas de la Muscovita: pleocroismo, altos colores de birrefringencia, extinción a puntitos.

Características diagnósticas de la Epidota: color verde-amarillo a nícoles paralelos, manto de Arlequín a nícoles cruzados.

- Ortoclasa: 3%; tamaño de grano < 0,3 mm.

Características diagnósticas: gris de primer orden, aspecto sucio, anhedral.

Paragénesis: Cuarzo-Muscovita

Protolito: Pelita

Grado metamórfico: Facie Esquistos Verdes de bajo grado

→ Presión aprox.: 2-6 kbar

Temperatura aprox.: 350-380 °C

Nombre de la roca: Metapelita

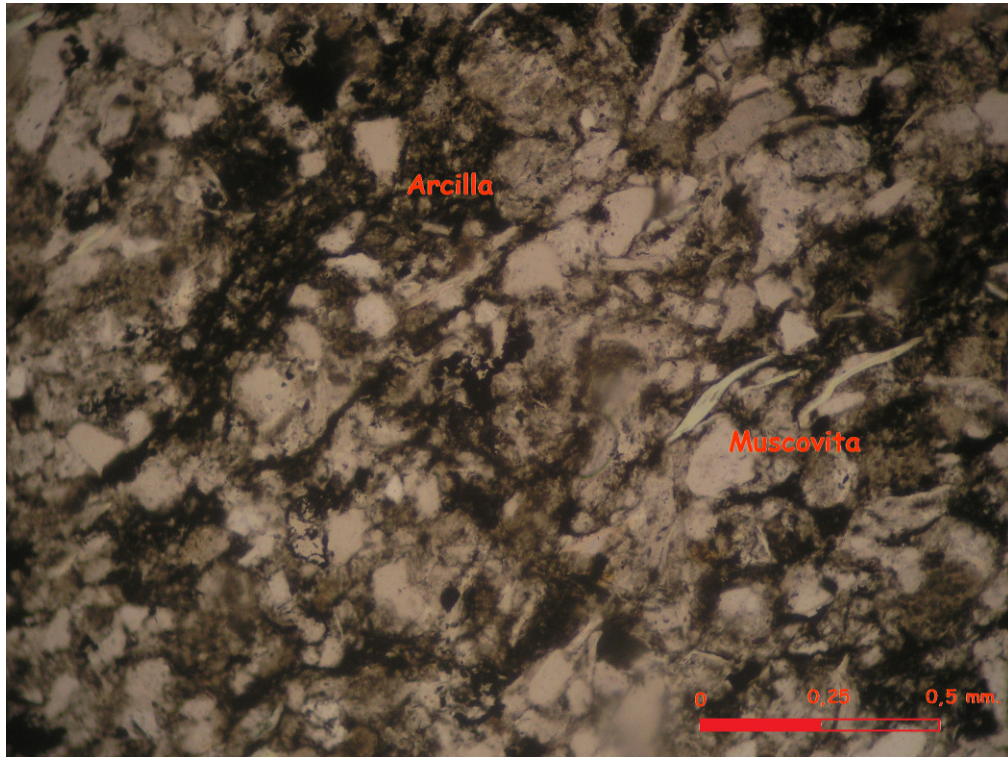


Figura C.3.: Corte 333 a nicoles paralelos.

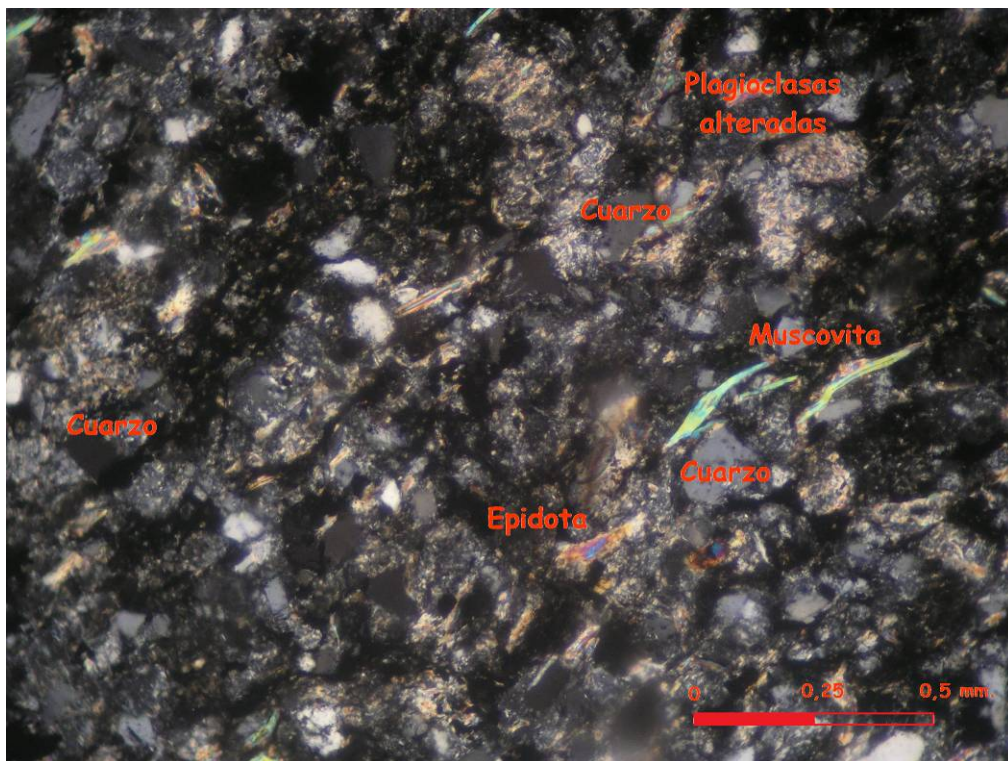


Figura C.4.: Corte 333 a nicoles cruzados.

- Corte 330

Textura: Nematolepidoblástica.

Composición:

- Anfíbola: 40%; largo cristales < 1 mm.

Características diagnósticas: hábito alargado, color amarillo-verdoso a nícoles paralelos, exfoliación 56°-124°.

- Arcilla: 30%; tamaño de grano no distinguible al microscopio.

Características diagnósticas: masa de color café-negrusco.

- Clorita: 10%; tamaño de grano < 1 mm. ; se presenta rellenando espacios y en cúmulos.

Características diagnósticas: verde a nícoles paralelos, pleocroismo débil a moderado, colores anómalos a nícoles cruzados (café, violeta, azul berlín).

- Plagioclasa: 20%; largo cristales < 0,5 mm. ; algunos cristales han sufrido cloritización.

Características diagnósticas: hábito tabular, gris de primer orden, macla polisintética.

Paragénesis: no se observan contactos entre cristales debido a la presencia de arcilla entre ellos.

Protolito: Basalto

Facie Metamórfica: Anfíbolita → Presión aprox.: 2 - 10 kbar

Temperatura aprox.: 500- 600 °C

Nombre de la Roca: Metabasita.

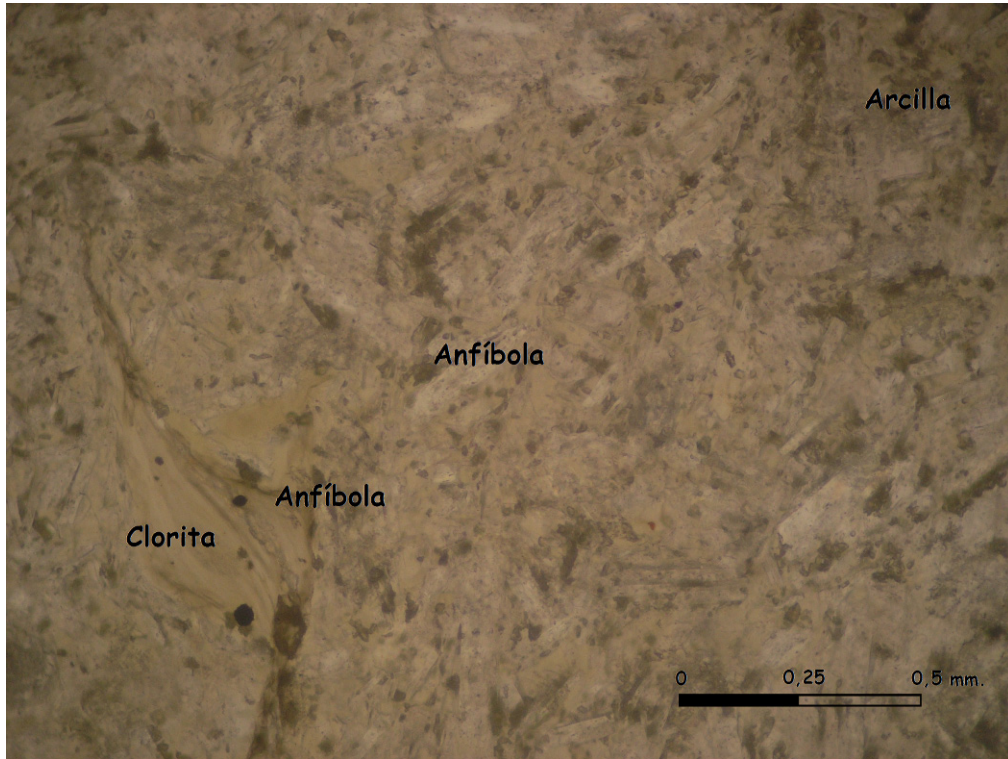


Figura C.5.: Corte 330 a nicoles paralelos.

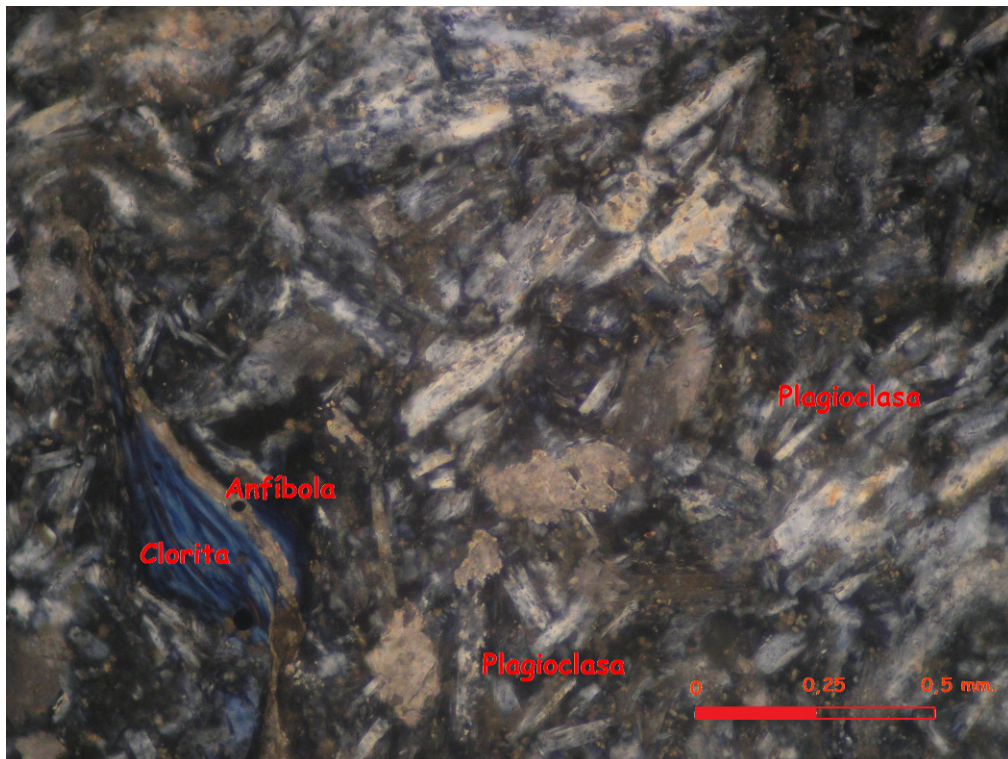


Figura C.6.: Corte 330 a nicoles cruzados.

- Corte 326

Textura: holocristalina, hipidiomórfica, inequigranular, porfídica.

Composición:

- Plagioclasa: 35%; largo cristales < 2 mm.; se presentan con un fuerte alteración de sericita.

Características diagnósticas de la Plagioclasa: hábito tabular, gris de primer orden, macla polisintética.

Características diagnósticas de la Sericita: color amarillo-grisáceo a nícoles cruzados, se presenta como “challa” sobre los minerales que altera.

- Anfíbola: 25%; largo cristales < 3 mm.; se presentan alteradas a clorita - epidota.

Características diagnósticas de la Anfíbola: hábito alargado, color amarillo-verdoso a nícoles paralelos, exfoliación 56°-124°.

Características diagnósticas de la Clorita: verde a nícoles paralelos; pleocroismo débil a moderado, colores anómalos a nícoles cruzados (café, violeta, azul berlín).

Características diagnósticas de la Epidota: color verde-amarillo a nícoles paralelos, manto de Arlequín a nícoles cruzados.

- Ortopiroxeno: 15%; tamaño de grano < 3 mm. ; se presenta fuertemente alterado a clorita-epidota.

Características diagnósticas: hábito prismático corto, colores de birrefringencia bajos (amarillo-pardo), pleocroismo verde-rojizo.

- Masa fundamental: 15%.
- Cuarzo: 8%; tamaño de grano < 1 mm. ; se presenta en cristales sub-hedrales y anhedrales, siendo éstos últimos probablemente generados por una alteración posterior.

Características diagnósticas: gris de primer orden, relieve bajo, extinción ondulosa.

- Minerales opacos: 2%.

Nombre de la Roca: Diorita

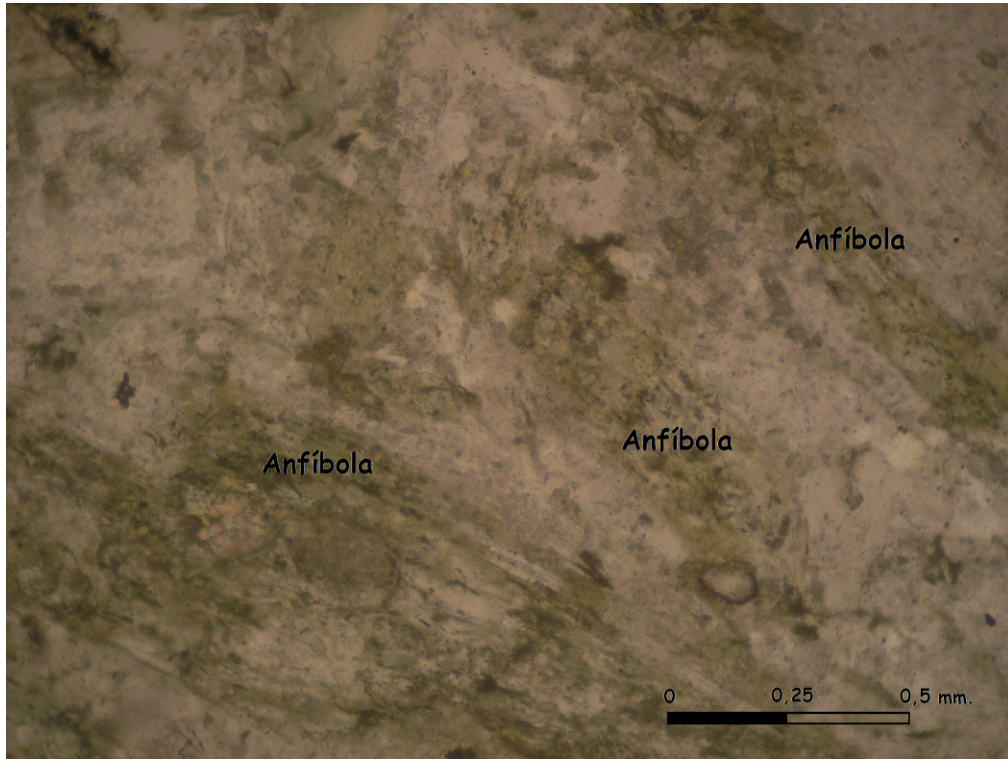


Figura C.7.: Corte 326 a nicoles paralelos.

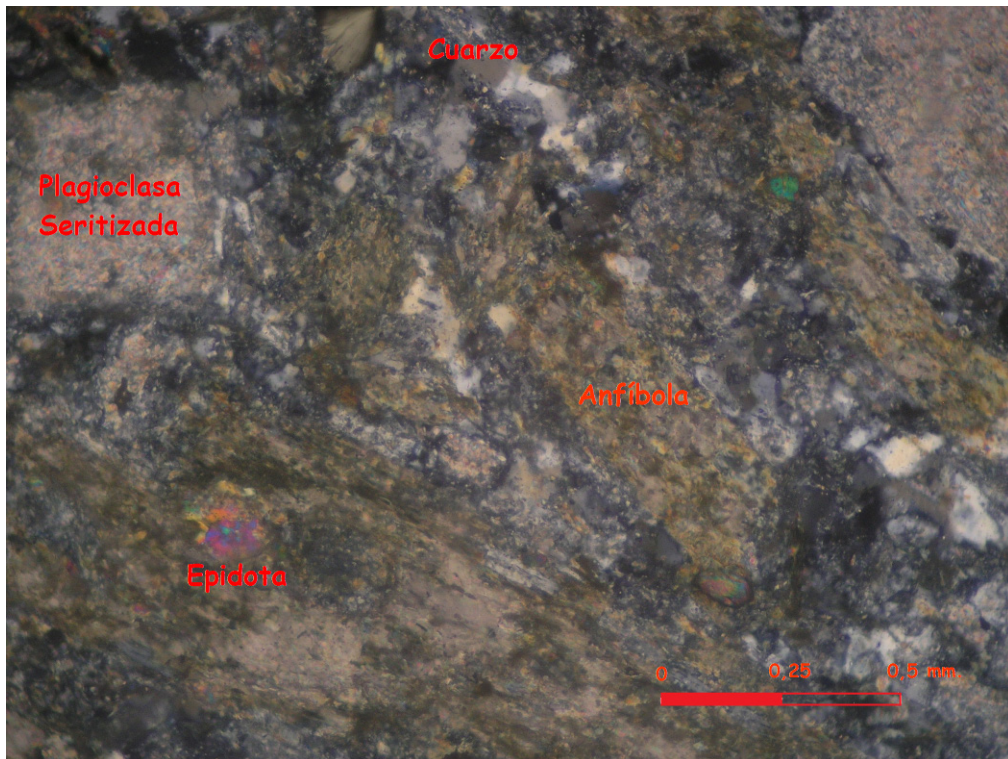


Figura C.8.: Corte 326 a nicoles cruzados.

- Corte 327

Textura: holocristalina, hipidiomórfica, equigranular, afanítica, microcristalina.

Composición:

- Plagioclasa: 55%; largo cristales < 1 mm.; se presentan con una alteración de sericita.

Características diagnósticas de la Plagioclasa: hábito tabular, gris de primer orden, macla polisintética.

Características diagnósticas de la Sericita: color amarillo-grisáceo a nícoles cruzados, se presenta como “challa” sobre los minerales que altera.

- Clorita: 20%; los cristales poseen un hábito fibroso, o son anhedrales relleno de espacios.

Características diagnósticas: verde a nícoles paralelos; pleocroismo débil a moderado, colores anómalos a nícoles cruzados (café, violeta, azul berlín).

- Anfíbolos: 8%; largo cristales < 0.7 mm.; se presentan alteradas a epidota.

Características diagnósticas de la Anfíbola: hábito alargado, color amarillo-verdoso a nícoles paralelos, exfoliación 56°-124°.

Características diagnósticas de la Epidota: color verde-amarillo a nícoles paralelos, manto de Arlequín a nícoles cruzados.

- Calcita: 7%; tamaño de grano < 1 mm. ; se presenta anhedral relleno de espacios.

Características diagnósticas: color pardo-rosa a nícoles cruzados, clivaje 60° - 120°.

- Arcilla: 3%; tamaño de grano no distinguible al microscopio; se presentan principalmente rodeando a los minerales opacos.

Características diagnósticas: masa de color café-negrusco.

- Minerales opacos: 7%

Debido a su hábito cuadrado, se puede suponer que sean pirita.

Nombre de la Roca: Diorita

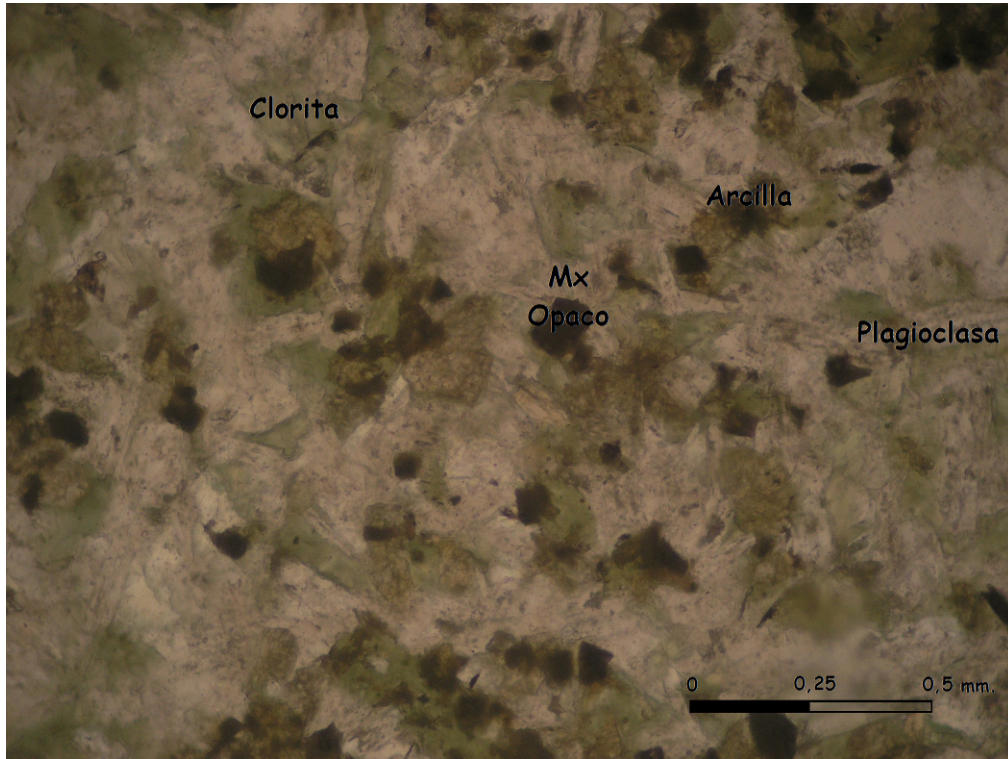


Figura C.9.: Corte 327 a nicoles paralelos.

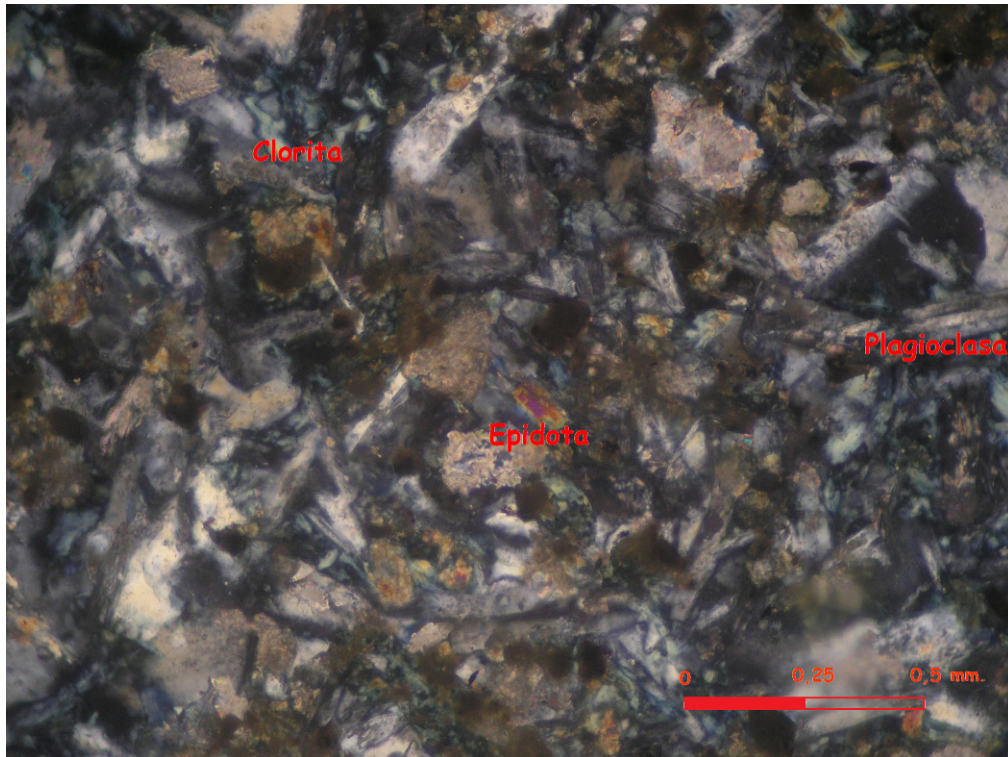


Figura C.10.: Corte 327 a nicoles cruzados.

- Corte 359

Textura: holocristalina, hipidiomórfica, inequigranular.

Composición:

- Plagioclasa: 50%; largo cristales < 3 mm.; se presenta con textura seriada.

Características diagnósticas de la Plagioclasa: hábito tabular, gris de primer orden, macla polisintética.

- Clinopiroxeno: 20%; tamaño de grano < 1 mm.; posee una textura poiquilítica, ya que los cristales incluyen cristales de minerales opacos; alrededor de un 5% de los cristales están siendo reemplazados por anfíbolos.

Características diagnósticas: hábito prismático corto, colores de birrefringencia medio-alto, extinción oblicua.

- Anfíbolo: 10%; largo cristales < 0,7 mm.; se presentan cloritizadas.

Características diagnósticas de la Anfíbolo: hábito alargado, color amarillo-verdoso a nícoles paralelos, exfoliación 56°-124°.

Características diagnósticas de la Clorita: verde a nícoles paralelos; pleocroismo débil a moderado, colores anómalos a nícoles cruzados (café, violeta, azul berlín).

- Minerales opacos: 13%; se presentan euhedrales con tamaño de grano < 0,2 mm., y anhedrales de tamaño < 1,3 mm.

- Cuarzo: 5%; tamaño de grano < 0,6 mm. ; se presenta en cristales anhedrales.

Características diagnósticas: gris de primer orden, relieve bajo, extinción ondulosa.

- Apatito: 2%; largo cristales < 0,3 mm.

Características diagnósticas: hábito tabular, relieve alto,

Nombre de la Roca: Monzodiorita de piroxenos

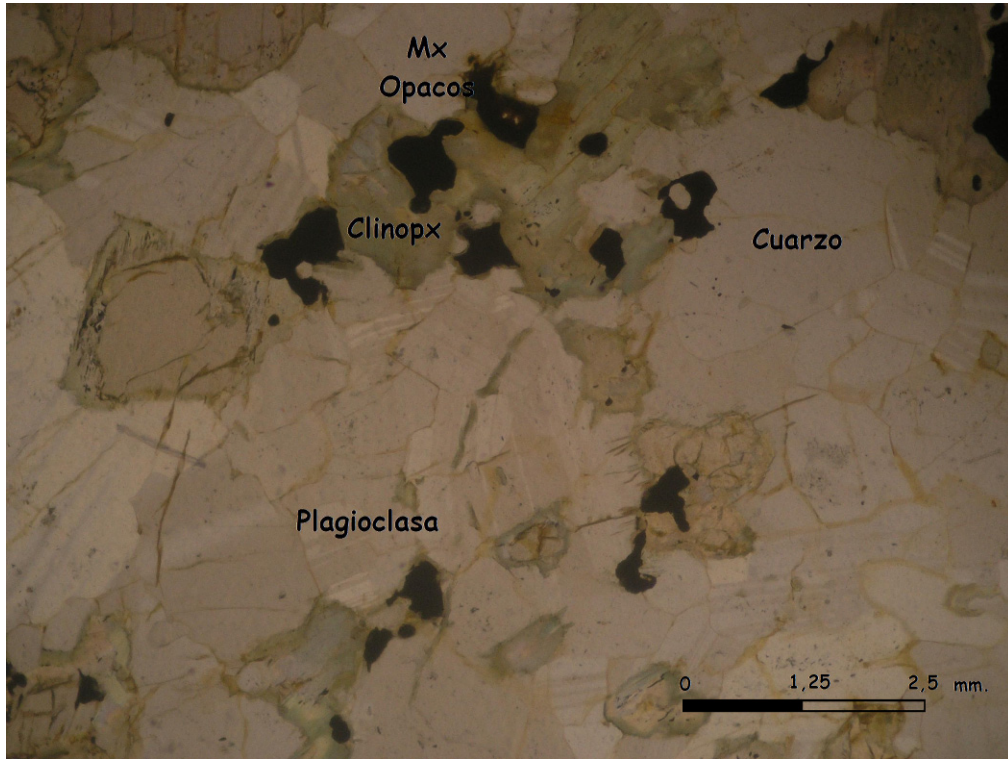


Figura C.11.: Corte 359 a nicoles paralelos.

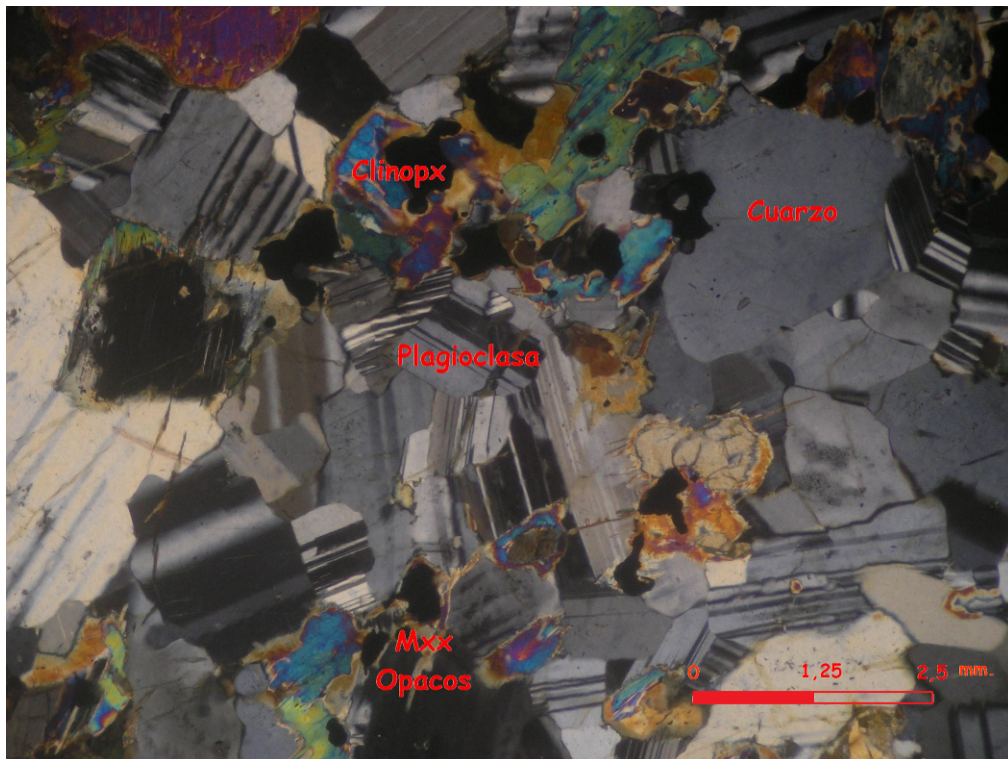


Figura C.12.: Corte 359 a nicoles cruzados.

- Corte 328

Textura: templada.

Composición:

- Vidrio + microlitos de plagioclasa: 80%

Características diagnósticas de la Plagioclasa: hábito tabular, gris de primer orden, macla polisintética.

- Vetillas: 17%; los minerales que componen a las vetillas son: clorita, epidota, y carbonatos.

Características diagnósticas de la Clorita: verde a nícoles paralelos; pleocroismo débil a moderado, colores anómalos a nícoles cruzados (café, violeta, azul berlín).

Características diagnósticas de la Epidota: color verde-amarillo a nícoles paralelos, manto de Arlequín a nícoles cruzados.

- Minerales opacos: 3%; se presentan en la masa fundamental.

Nombre de la Roca: Intrusivo hipabisal de composición andesítica.

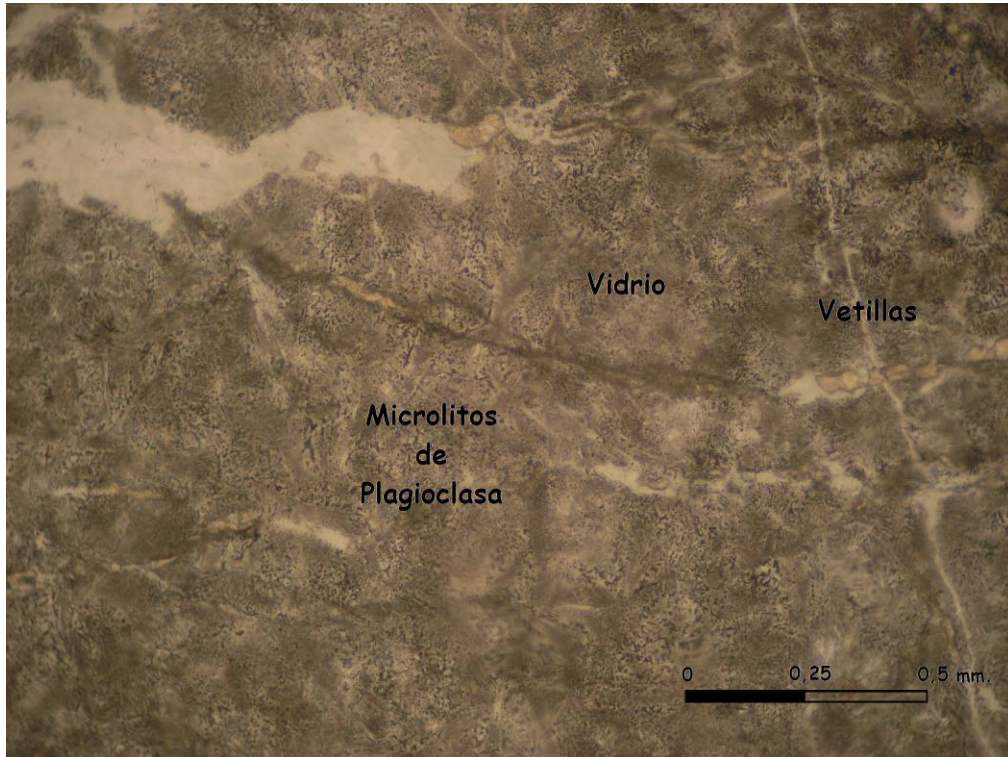


Figura C.13.: Corte 328 a nicoles paralelos.

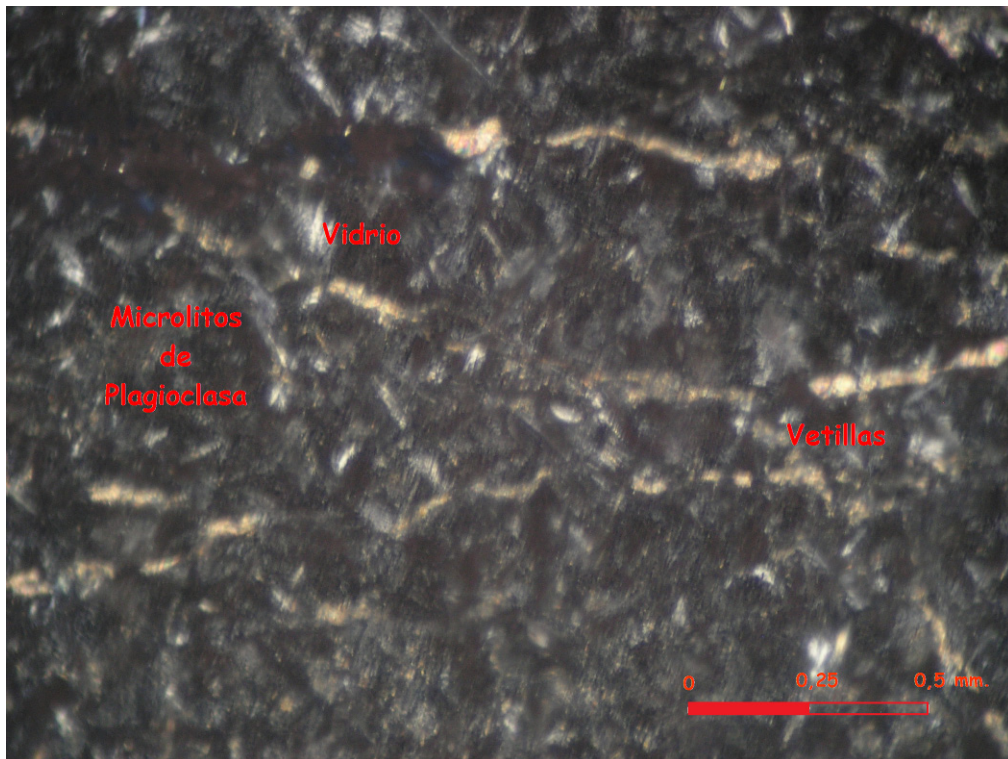


Figura C.14.: Corte 328 a nicoles cruzados.

D. MEDIDAS ESTRUCTURALES

D.1. Estructuras por punto.

Puntos situados al E del canal Cholgo:

- Punto 340

Dip	Dip Direction
83	322
78	65
59	256
62	150
32	220
75	20
50	272
54	271
82	332
72	304
77	151
60	278
77	142
70	163
87	81
30	277

- Punto 359

Dip	Dip Direction
28	20
23	7
62	246
78	96
47	110
55	357
74	87
60	356
56	343
62	252
80	98

- Punto 365A

Dip	Dip Direction
74	270
82	24
42	250
85	79
55	137
24	244
84	88
33	10
78	96
85	205
79	149
42	221
84	102
38	215
76	145

- Punto 365B

Dip	Dip Direction
34	86
70	171
89	355
33	228
37	213
83	80
18	297
52	148

- Punto 366

Dip	Dip Direction
82	245
72	159
40	285
85	235
75	165
84	64
50	247
83	227
62	263
48	166
72	336
60	250
65	98
56	292
80	54
75	184
35	213
85	292
78	248
40	273
87	312
87	90

- Punto 367

Dip	Dip Direction
76	264
60	288
82	130
52	31
59	306
64	11
74	144
82	67
76	283
76	254
53	317
67	134
66	223
79	356
70	274

Puntos situados al W del canal Cholgo:

- Punto 321

Dip	Dip Direction
68	17
72	62
48	255
81	138
43	30
50	60
65	141
68	149
22	252
70	319
63	327

- Punto 325

Dip	Dip Direction
30	185
80	290
63	38
64	50
28	232
82	115
70	55
70	212
42	197
68	48
35	191
24	206

- Punto 326

Dip	Dip Direction
48	181
60	199
46	57
88	96
76	337

- Punto 327

Dip	Dip Direction
16	346
15	350
20	30
4	75
85	206
67	304
66	17
60	300
70	137
85	47
84	335

- Punto 333

Dip	Dip Direction
32	324
57	97
38	330
72	105
70	98
66	101
55	205
70	103
68	101
87	30
78	102
42	311
73	107
45	309

- Punto 337

Dip	Dip Direction
45	112
80	254
75	25
78	265
70	349
70	174
68	285
25	36

D.2. Direcciones de foliación por punto.

- Punto 333

Dip	Dip Direction
68	115
70	104

- Punto 334

Dip	Dip Direction
75	58
77	83
84	274
55	77

- Punto 335

Dip	Dip Direction
72	86
88	88
72	90
82	78
86	75

D.3. Descripción de macizo rocoso por punto.

En algunos puntos se realizó una descripción del macizo rocoso perteneciente a la unidad geológica “Ttm”.

En la descripción de las discontinuidades medidas se utilizó la siguiente simbología:

Tipo de estructura:

D	Diaclasa	C	Contacto litológico
SD	Set de diaclasas	ES	Estratificación
FT	Falla	VT	Veta
ZC	Zona de cizalle	DX	Dique

Geometría:

SINUOSIDAD (S)	P	Planar
	S	Sinuosa
	D	Dentado
RUGOSIDAD (R)	R	Rugosa
	M	Moderadamente Rugosa
	S	Suave
CONTINUIDAD (C)	C	Continua
	D	Discontinua

Relleno:

N	Sin relleno
Ca	Calcita
O	Óxidos
S	Súlfuros
A	Arcilla

- Punto 340

Tipo de Roca:

- A, Andesita microcristalina, fina, levemente foliada. ¿Diorita?.

Clase de meteorización: II, Levemente.

Agua: Seco-Húmedo.

Resistencia (Mpa): R5, Muy fuerte. (100 – 250).

Jv: 3 – 5.

Jn: 3.

Criterio generalizado de Hoek & Brown: FB, Fracturado en bloques.

Condición discontinuidades: Re, Regular.

GSI: 50-60.

Observaciones: Caída de bloques de 0,5 a 1 m.

Discontinuidades: Ver tabla 4.1.

Tabla 4.1. Descripción discontinuidades del punto 340.

ESTRUCTURA			Tipo Roca	GEOMETRÍA					Relleno	
TIPO DE ESTR.	DDIP	DIP		FREC.	CONT.	LARGO(m)	ABERTURA (mm)	S		R
SD	322	83	A	2 a 3	C	> 5	5 a 10	P	M	O
SD	65	78	A	2 a 3	D	2 a 3	2 a 5	S	R	O
SD	256	59	A	3	D	3 a 4	5 a 10	P	M	O
D	150	62	A							
D	220	32	A							
D	20	75	A							
D	272	50	A							
D	271	54	A							
D	332	82	A							
D	304	72	A							
D	151	77	A							
D	278	60	A							
D	142	77	A							
D	163	70	A							
D	81	87	A							
D	277	30	A							

- Punto 365

Tipo de Roca:

- A, Granitoide Gneissico. Posee zonas con un mayor bandeamiento. Los minerales alineados son máficos, y existen en gran cantidad. También presenta inclusiones máficas. La roca está intruída por diques andesíticos de grano fino.
- B, Dique andesítico.

Clase de meteorización: II, Levemente.

Agua: Seco.

Resistencia (Mpa): R5, Muy fuerte. (100 – 250).

Jv: 3 – 5.

Jn: 3 + a.

Criterio generalizado de Hoek & Brown: MA, Masivo.

FB, Fracturado en bloques.

Condición discontinuidades: Bu, Buena.

GSI: 65-75.

Observaciones: Talud al camino subvertical y estable.

Discontinuidades: Ver tabla 4.2.

Tabla 4.2. Descripción discontinuidades del punto 365.

ESTRUCTURA			Tipo Roca	GEOMETRÍA					Relleno	
TIPO DE ESTR.	DDIP	DIP		FREC	CONT.	LARGO(m)	ABERTURA (mm)	S	R	
SD	270	74	A	2 a 3	C	4	1 a 5	P	R	Poco O
SD	24	82	A	< 1	D	< 2	-	S	R	Poco O
SD	250	42	A	2	C	> 5	1 a 3	S	R	Poco O
D	79	85	A							
D	137	55	A							
D	244	24	A							
D	88	84	A							
D	10	33	A							
D	96	78	A							
D	205	85	A							
D	149	79	A							
D	221	42	A							
D	102	84	A							
D	215	38	A							
D	145	76	A							
D	86	34	B							
D	171	70	B							
D	355	89	B							
D	228	33	B							
D	213	37	B							
D	80	83	B							
D	297	18	B							

- Punto 366

Tipo de Roca:

- A, Granitoide Gneissico. Posee zonas con un mayor bandeamiento. Los minerales alineados son máficos, y existen en gran cantidad. También presenta inclusiones máficas. La roca está intruída por diques andesíticos de grano fino.

Clase de meteorización: II, Levemente.

Agua: Seco.

Resistencia (Mpa): R5, Muy fuerte. (100 – 250).

Jv: 7 – 9.

Jn: 3 + a.

Criterio generalizado de Hoek & Brown: FB, Fracturado en bloques.

MF, Muy fracturado.

Condición discontinuidades: Bu, Buena.

Re, Regular.

GSI: 55-65.

Observaciones: Talud al camino estable, con algunos deslizamientos pequeños de 30 – 50 cm.

Discontinuidades: Ver tabla 4.3.

Tabla 4.3. Descripción discontinuidades del punto 366.

ESTRUCTURA			Tipo Roca	GEOMETRÍA						Relleno
TIPO DE ESTR.	DDIP	DIP		FREC	CONT.	LARGO(m)	ABERTURA (mm)	S	R	
SD	245	82	A	2 a 3	D	1 a 2	0 a 2	P	M	A; O
SD	159	72	A	3 a 5	D	1 a 2	0 a 2	P	M	A; O
SD	285	40	A	2 a 3	D	1 a 2	0 a 2	P	R	A; O
D	235	85	A							
D	165	75	A							
D	64	84	A							
D	247	50	A							
D	227	83	A							
D	263	62	A							
D	166	48	A							
D	336	72	A							
D	250	60	A							
D	98	65	A							
D	292	56	A							
D	54	80	A							
D	184	75	A							
D	213	35	A							
D	292	85	A							
D	248	78	A							
D	273	40	A							
D	312	87	A							
D	90	87	A							

- Punto 367

Tipo de Roca:

- A, Granitoide Gneissico. Posee zonas con un mayor bandeamiento. Los minerales alineados son máficos, y existen en gran cantidad. También presenta inclusiones máficas. La roca está intruída por diques andesíticos de grano fino.

Clase de meteorización: II, Levemente.

Agua: Seco.

Resistencia (Mpa): R5, Muy fuerte. (100 – 250).

Jv: 5 – 8.

Jn: 3 – 4.

Criterio generalizado de Hoek & Brown: MA, Masivo.

FB, Fracturado en bloques.

Condición discontinuidades: Bu, Buena.

Re, Regular.

GSI: 55-65.

Observaciones: Talud vertical de aprox. 20 m. de alto, con cuñas locales estables.

Algunas discontinuidades presentan vetillas centimétricas de cuarzo.

Discontinuidades: Ver tabla 4.4.

Tabla 4.3. Descripción discontinuidades del punto 367.

ESTRUCTURA			Tipo Roca	GEOMETRÍA						Relleno
TIPO DE ESTR.	DDIP	DIP		FREC	CONT.	LARGO(m)	ABERTURA (mm)	S	R	
D	264	76	A		C		0	P-S	M	N
D	288	60	A		C		< 5	P-S	M	N
D	130	82	A		C		< 5	P-S	M	N
D	31	52	A		C		0	P-S	M	N
D	306	59	A		C		< 5	P-S	M	N
D	11	64	A		C		< 5	P-S	M	N
D	144	74	A		C		0	P-S	M	N
D	67	82	A		C		< 5	P-S	M	N
D	283	76	A		C		< 5	P-S	M	N
D	254	76	A		C		0	P-S	M	N
D	317	53	A		C		< 5	P-S	M	N
D	134	67	A		C		< 5	P-S	M	N
D	223	66	A		C		< 5	P-S	M	N
D	356	79	A		C		0	P-S	M	N
D	274	70	A		C		< 5	P-S	M	N

E. DIAGRAMAS DE CONCENTRACIÓN DE POLOS, Y DIAGRAMAS DE POLOS Y PLANOS DE ESTRUCTURAS POR PUNTO.

Puntos situados al E del canal Cholgo:

- Punto 340:

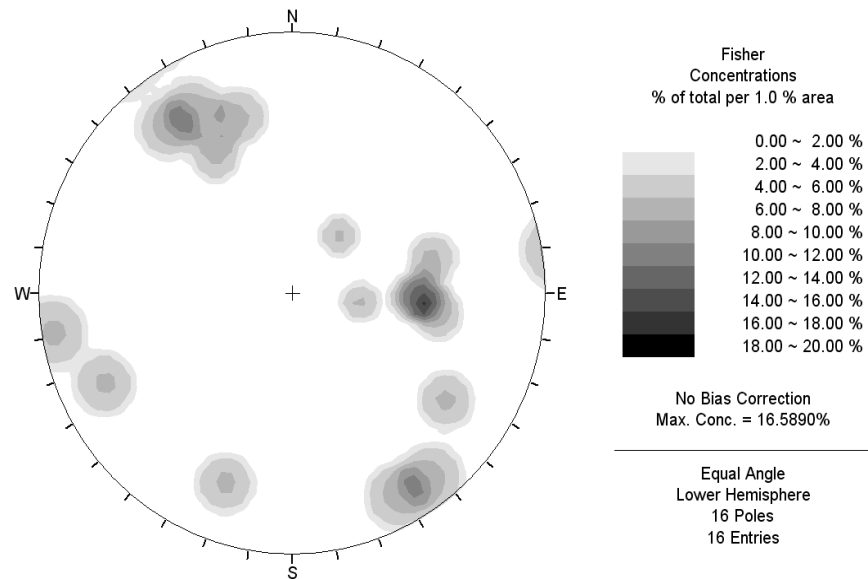


Figura 1: Diagrama de concentración de polos

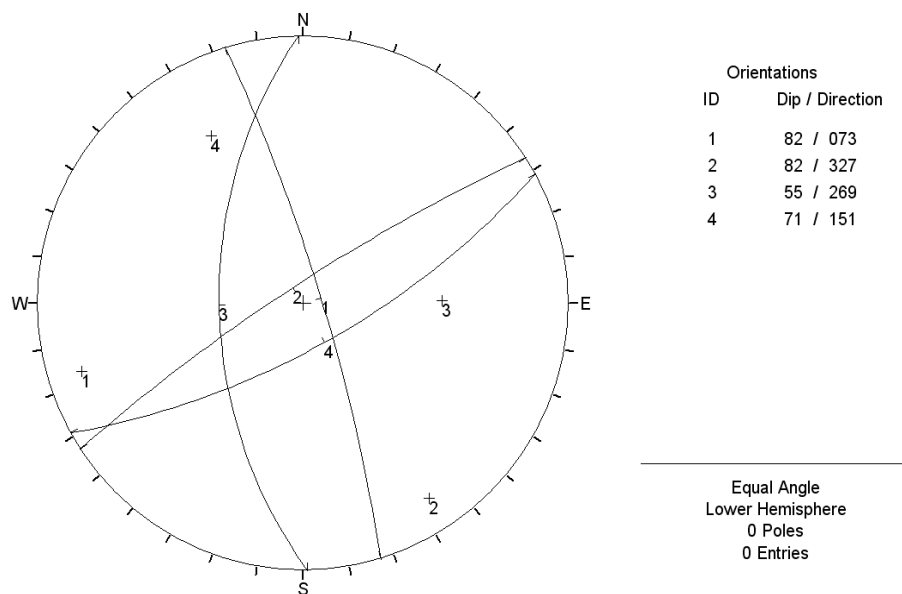


Figura 2: Polos y planos de los sets estructurales

- Punto 359:

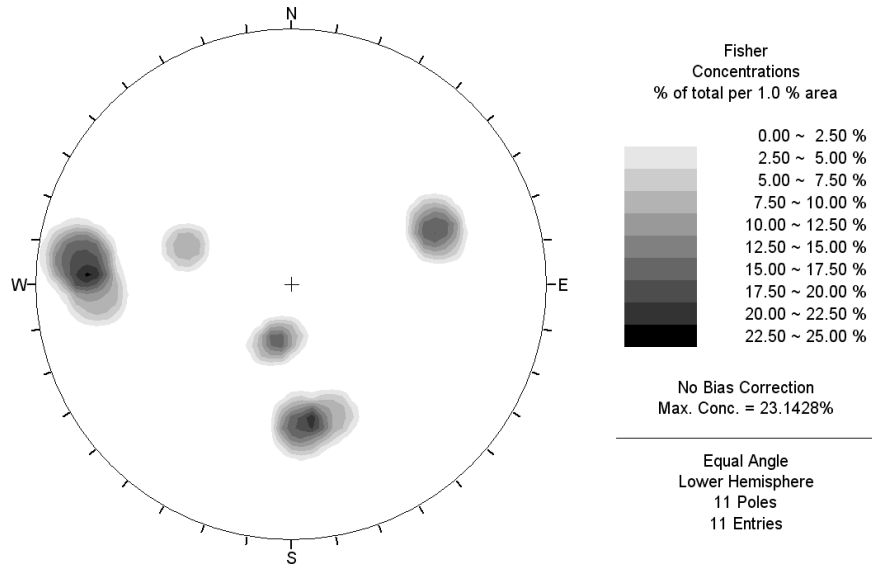


Figura 3: Diagrama de concentración de polos

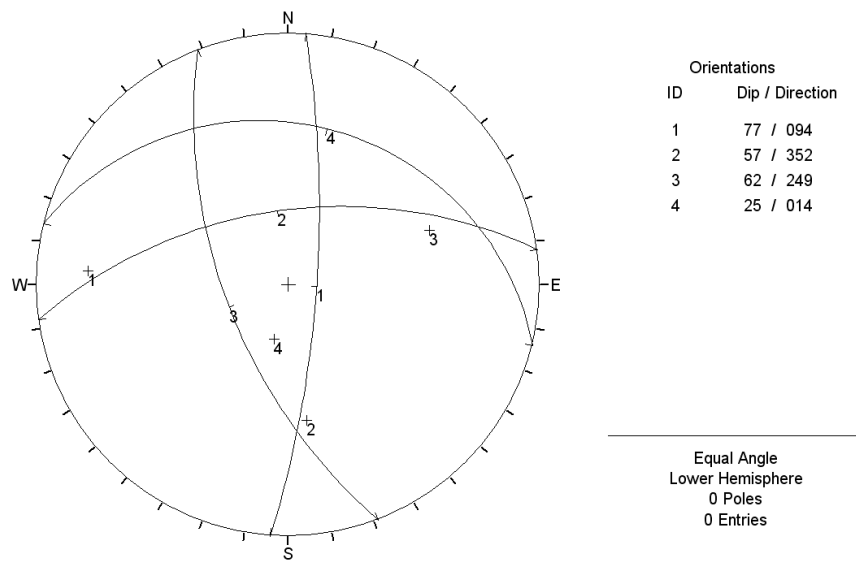


Figura 4: Polos y planos de los sets estructurales

- Punto 365A:

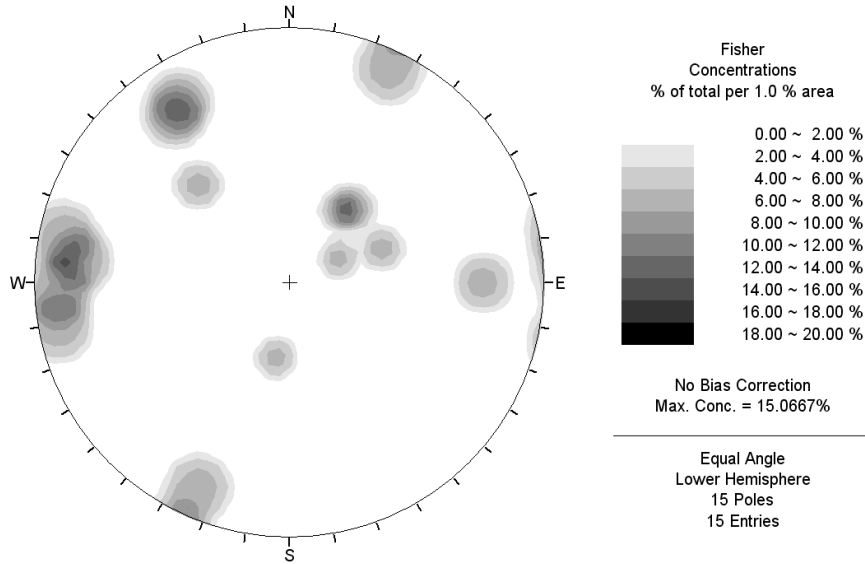


Figura 5: Diagrama de concentración de polos

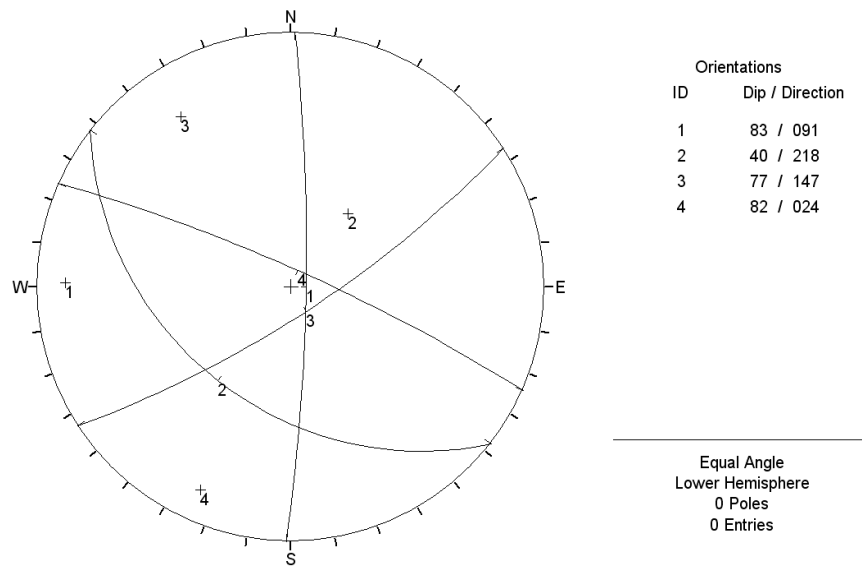


Figura 6: Polos y planos de los sets estructurales

- Punto 365B:

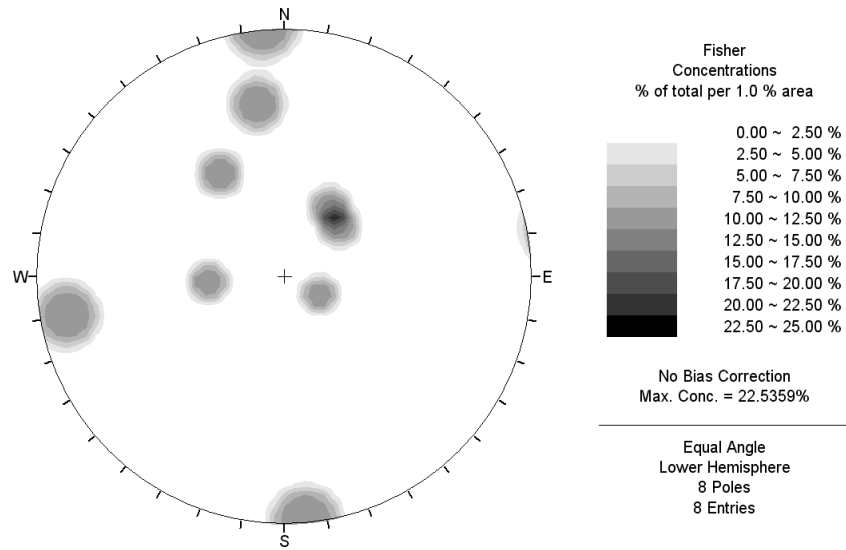


Figura 7: Diagrama de concentración de polos

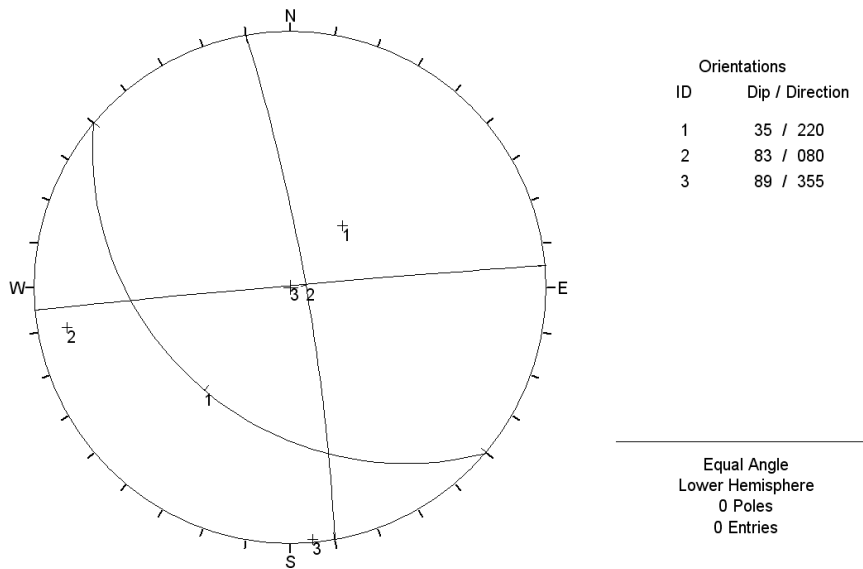


Figura 8: Polos y planos de los sets estructurales

- Punto 366:

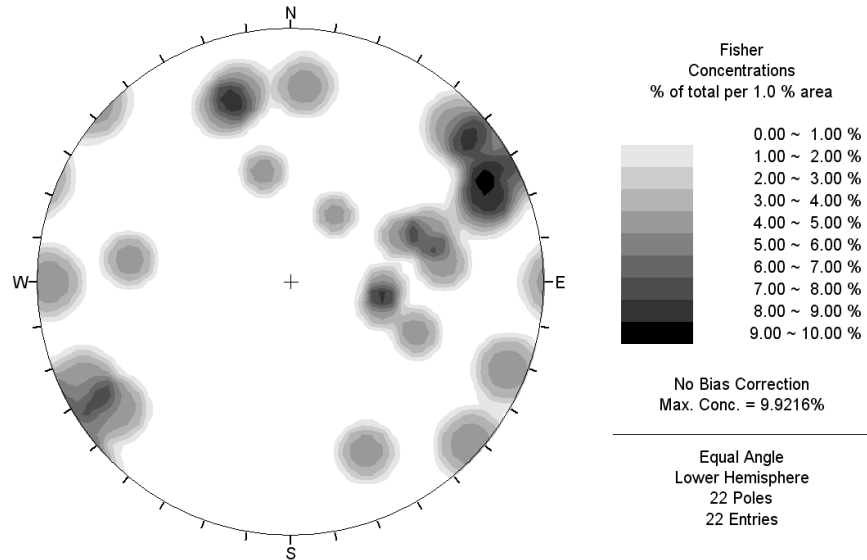


Figura 9: Diagrama de concentración de polos

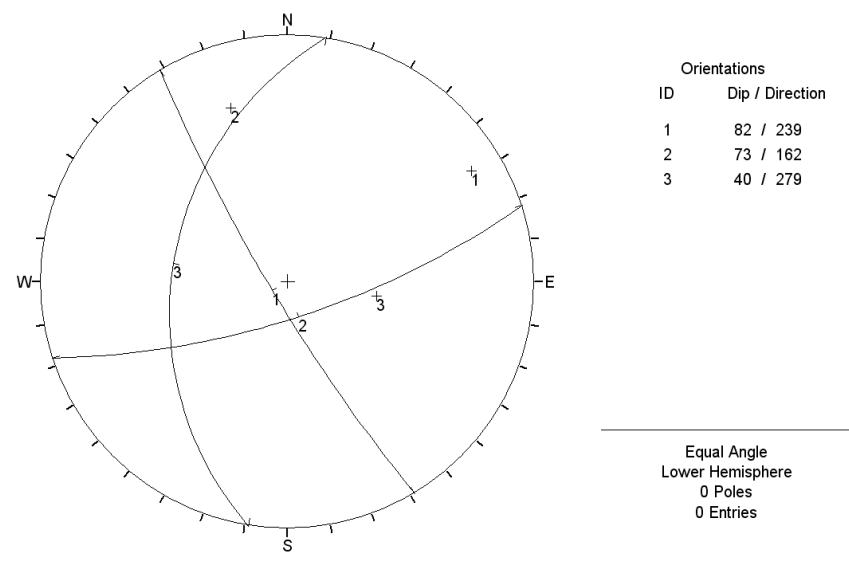


Figura 10: Polos y planos de los sets estructurales

- Punto 367:

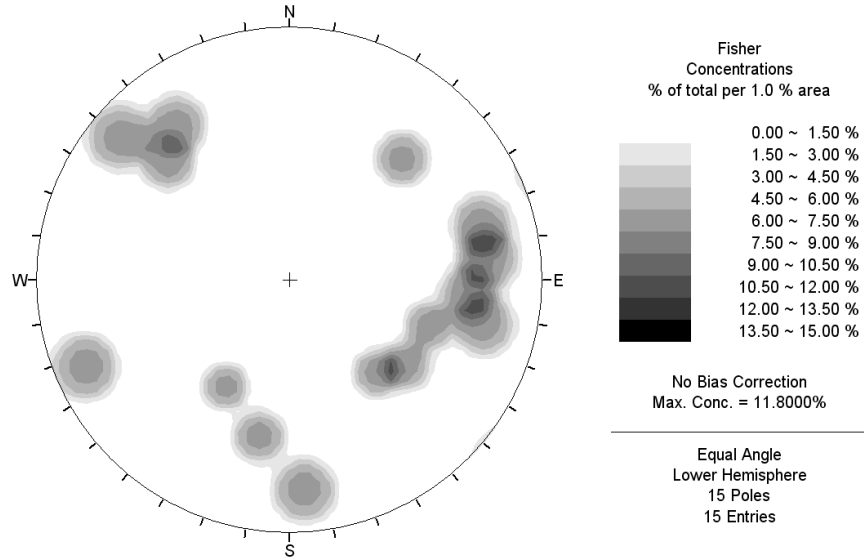


Figura 11: Diagrama de concentración de polos

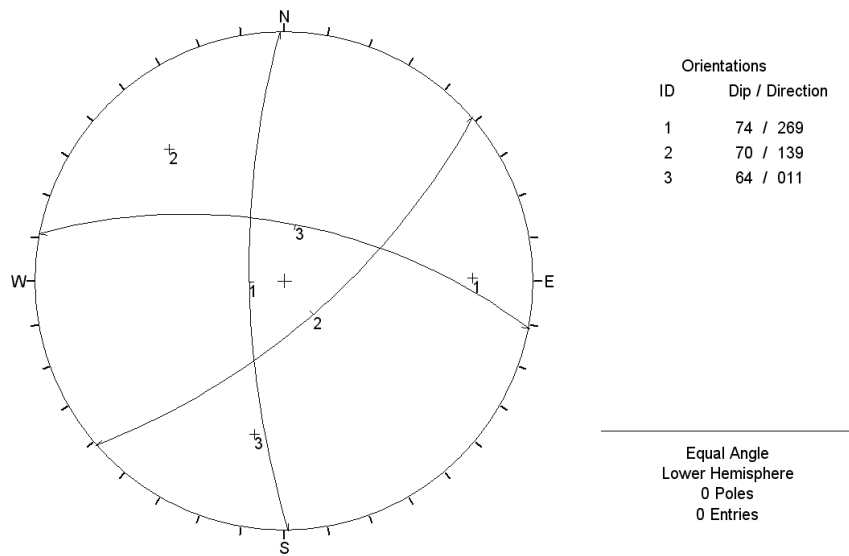


Figura 12: Polos y planos de los sets estructurales

Puntos situados al W del canal Cholgo:

- Punto 321:

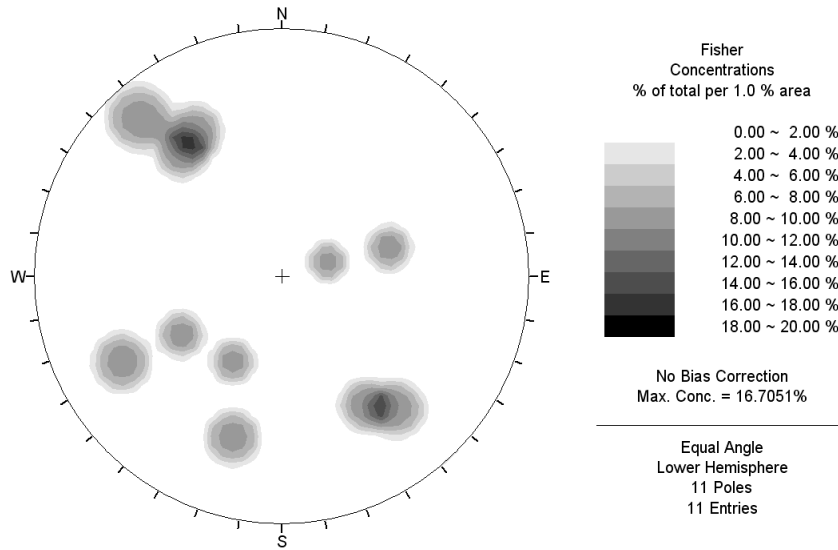


Figura 13: Diagrama de concentración de polos

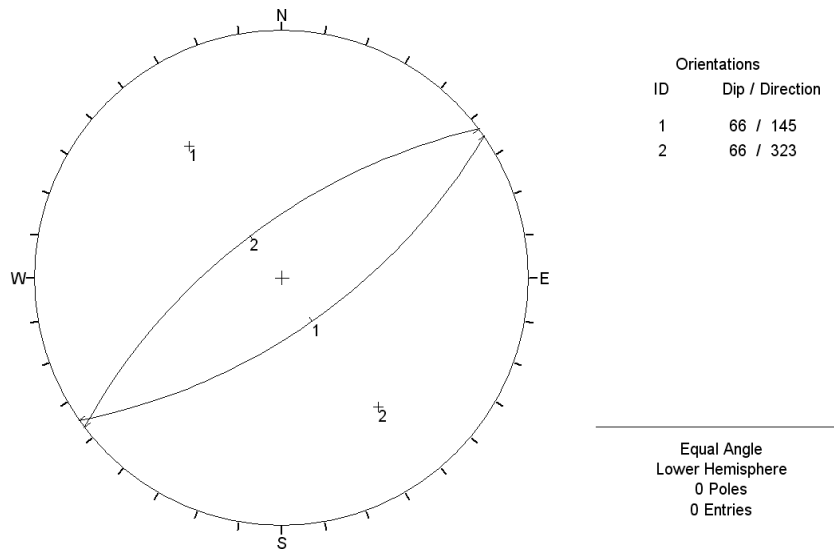


Figura 14: Polos y planos de los sets estructurales

- Punto 325:

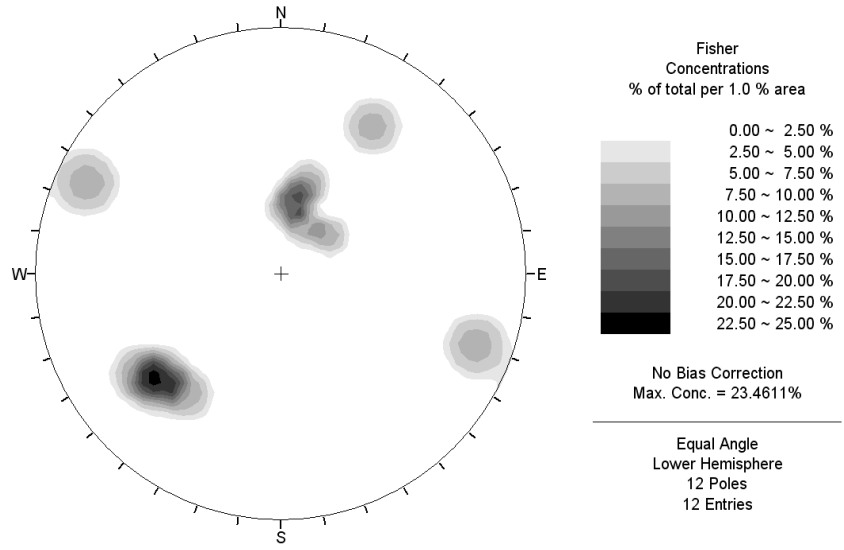


Figura 15: Diagrama de concentración de polos

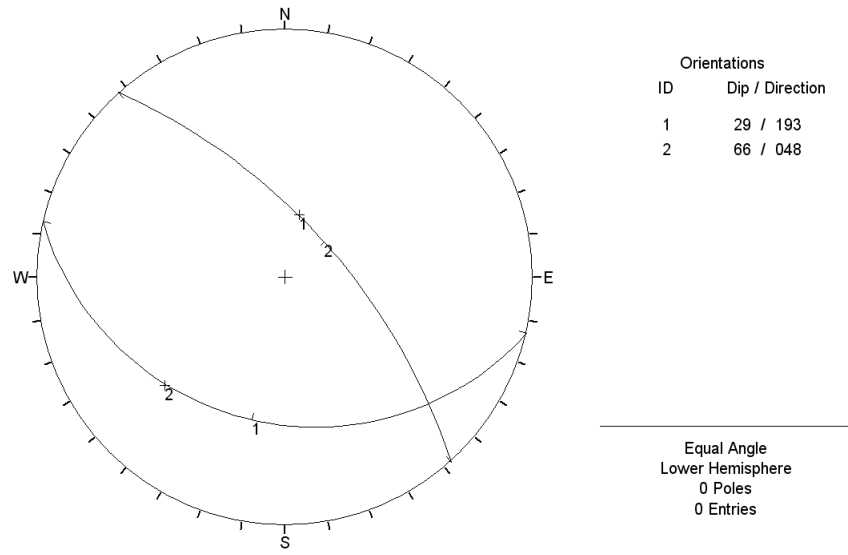


Figura 16: Polos y planos de los sets estructurales

- Punto 326:

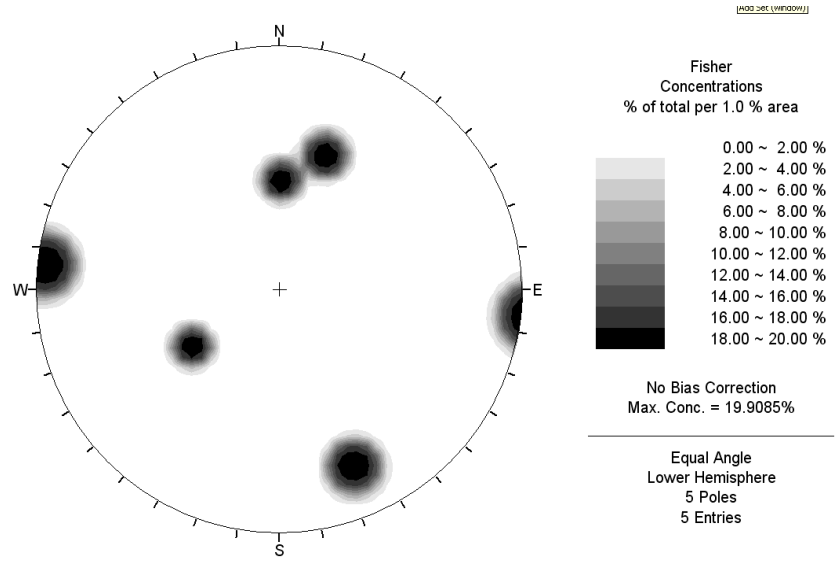


Figura 17: Diagrama de concentración de polos

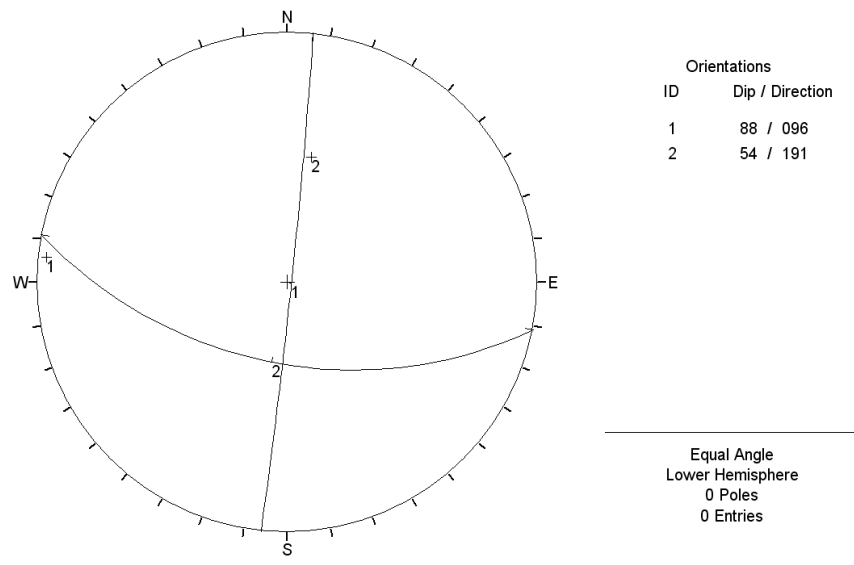


Figura 18: Polos y planos de los sets estructurales

- Punto 327:

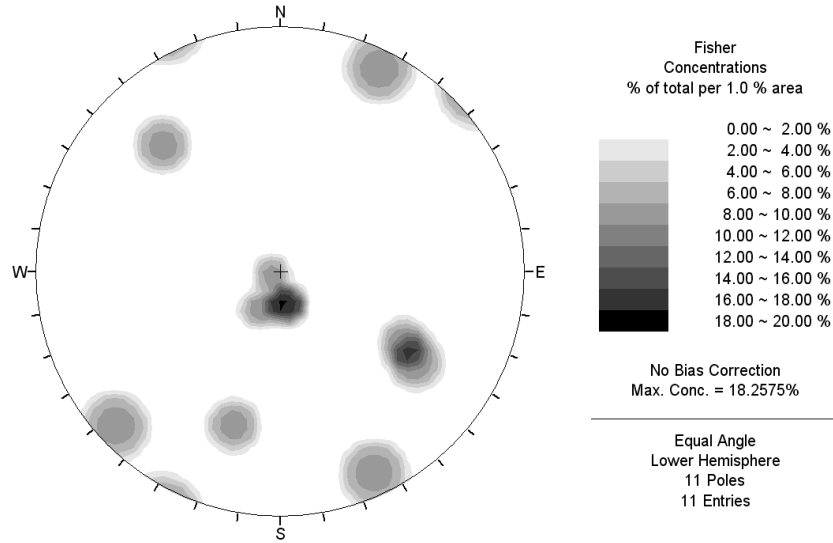


Figura 19: Diagrama de concentración de polos

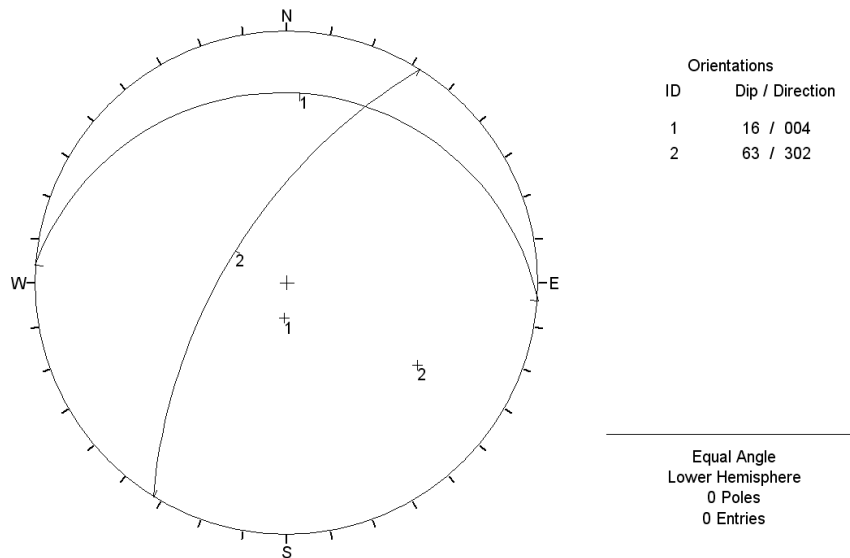


Figura 20: Polos y planos de los sets estructurales

- Punto 333:

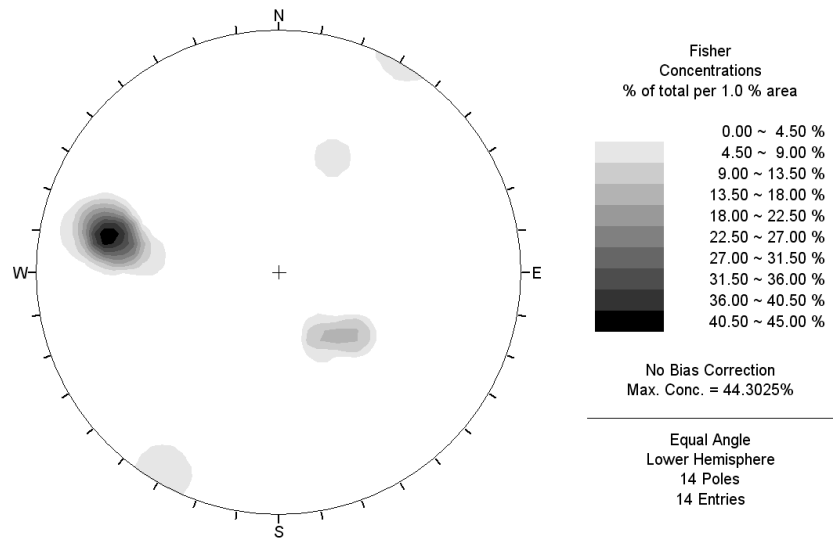


Figura 21: Diagrama de concentración de polos

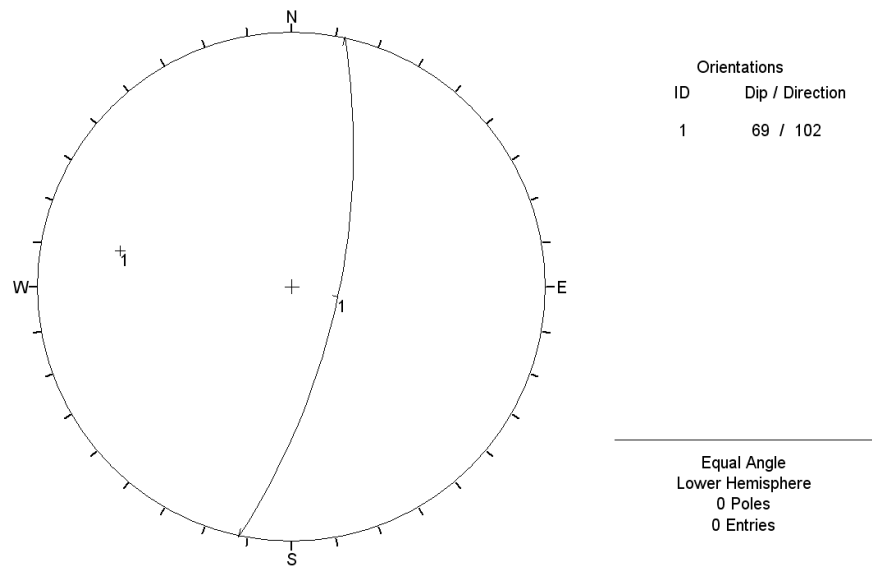


Figura 22: Polos y planos de los sets estructurales

- Punto 337:

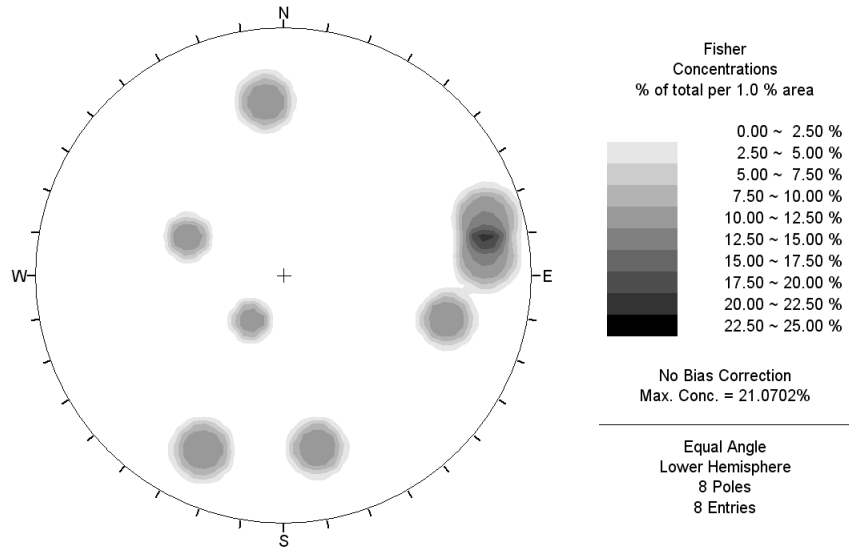


Figura 23: Diagrama de concentración de polos

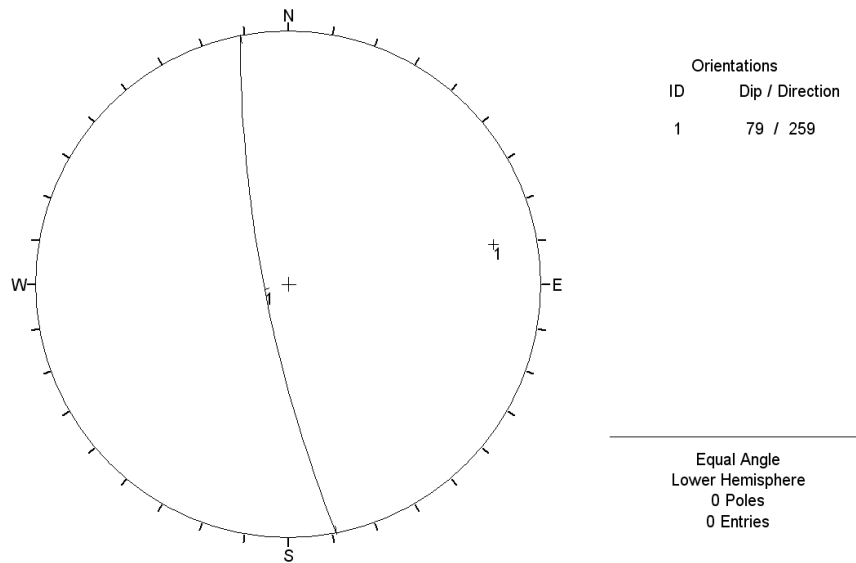


Figura 24: Polos y planos de los sets estructurales

Puntos situados al W del canal Cholgo, en los cuales se midió las direcciones de foliación:

- Punto 333F:

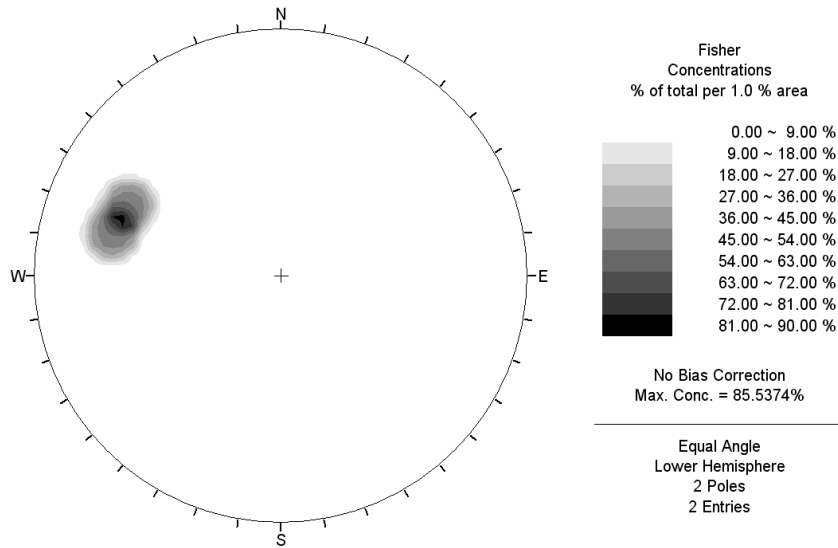


Figura 25: Diagrama de concentración de polos

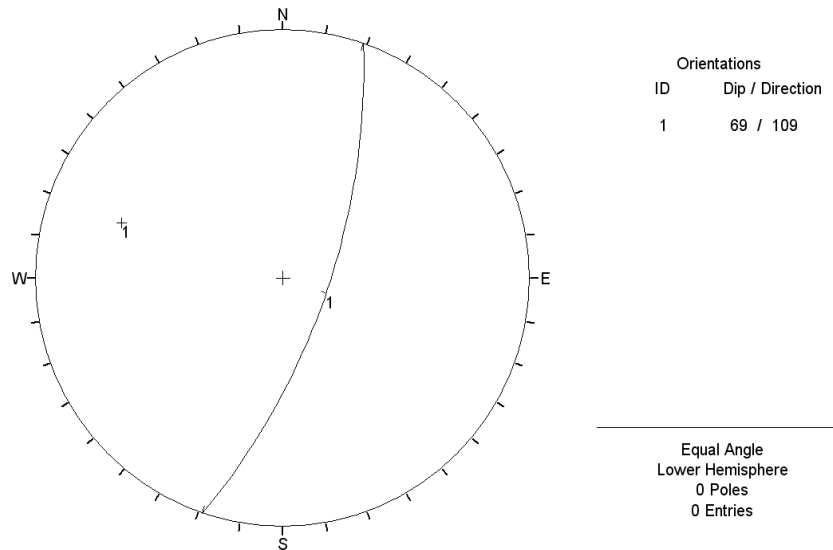


Figura 26: Polos y planos de los sets estructurales

- Punto 334F:

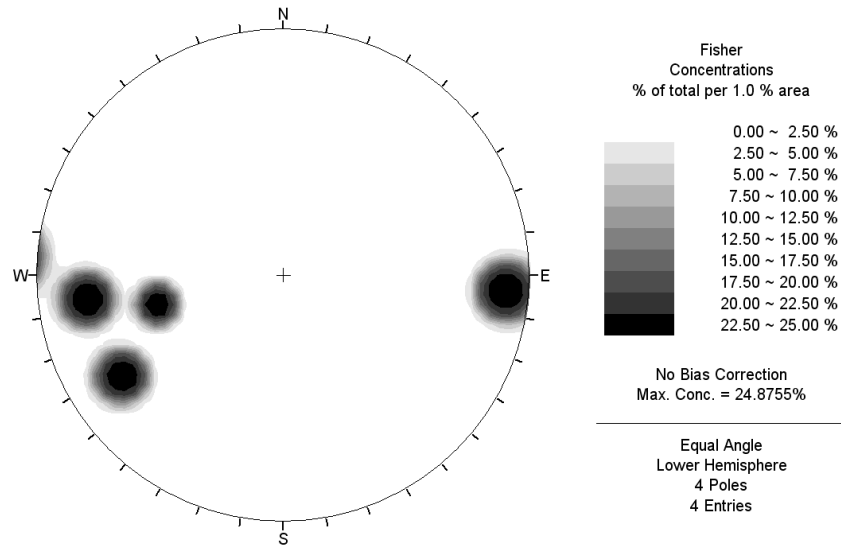


Figura 27: Diagrama de concentración de polos

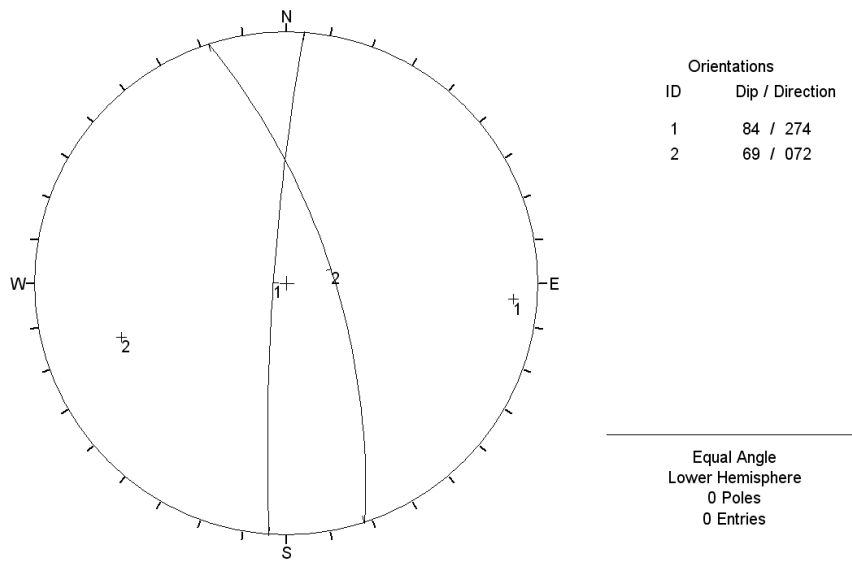


Figura 28: Polos y planos de los sets estructurales

- Punto 335F:

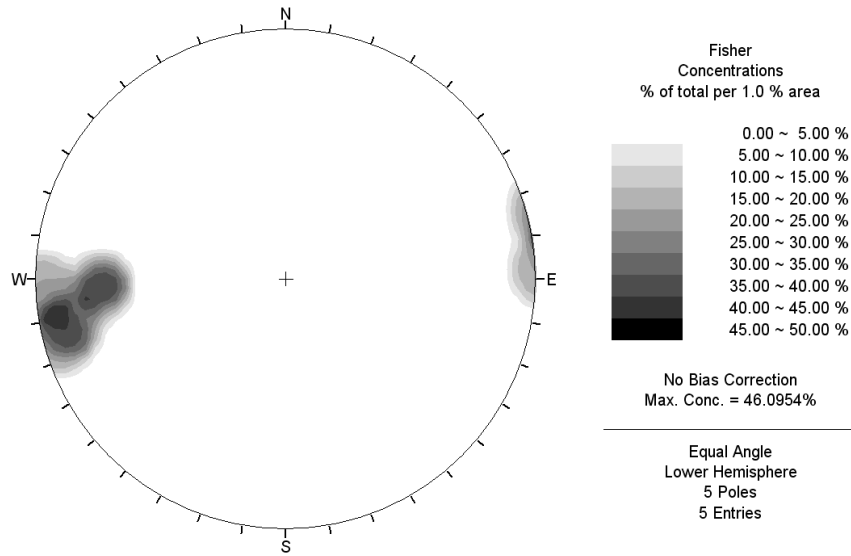


Figura 29: Diagrama de concentración de polos

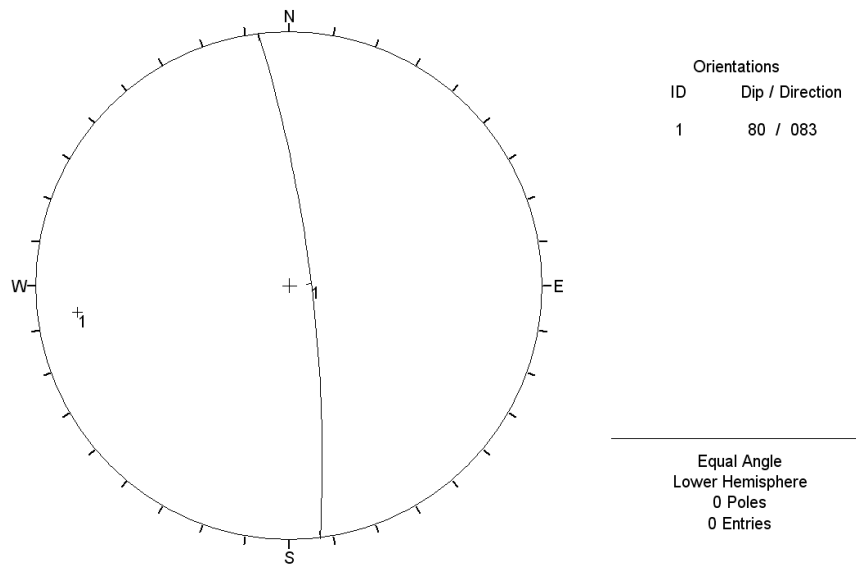


Figura 30: Polos y planos de los sets estructurales

F. CATASTRO DE REMOCIONES EN MASA.

Coordenada S	Coordenada W	Tipo de remoción en masa	Perímetro (m)	Área (m ²)	N° de píxeles
701036	5333074	Caída y/o Deslizamiento de Roca	1064.18	61973.92	150
714067	5346171	Deslizamiento de Suelo	624.98	11878.43	29
712017	5341739	Caída y/o Deslizamiento de Roca	987.51	66413.08	159
711355	5341541	Caída y/o Deslizamiento de Roca	2349.6	152278.86	386
705931	5335191	Caída y/o Deslizamiento de Roca Antigua	866.38	44348.21	102
710297	5333140	Deslizamiento de Roca - Suelo Antigo	739.54	14988.98	41
711355	5327518	Caída y/o Deslizamiento de Roca Antigua	1188.47	67189.84	172
711554	5326526	Deslizamiento de Roca - Suelo Antigo	729.14	20840.71	56
711091	5329635	Caída y/o Deslizamiento de Roca	540.85	17477.42	45
711620	5329701	Caída y/o Deslizamiento de Roca	551.37	17749.59	44
711950	5329701	Caída y/o Deslizamiento de Roca	739.32	27470.07	64
712149	5329635	Caída y/o Deslizamiento de Roca	802.39	25564.86	64
712347	5329635	Caída y/o Deslizamiento de Roca	1001.39	24933.64	66
712943	5327783	Caída y/o Deslizamiento de Roca	706.28	34254.97	86
713472	5327981	Caída y/o Deslizamiento de Roca	768.23	19363.2	50
713604	5327981	Deslizamiento de Roca - Suelo	269.19	2964.82	9
713009	5329304	Deslizamiento de Roca - Suelo	826.62	12243.63	29
713075	5329370	Deslizamiento de Roca - Suelo	300.66	3196.45	7
713141	5329370	Deslizamiento de Roca - Suelo	411.88	3835.74	10
713604	5329701	Deslizamiento de Roca - Suelo	478.88	4546.05	15
714332	5329436	Caída y/o Deslizamiento de Roca	638.71	18616.63	45
714266	5329635	Caída y/o Deslizamiento de Roca	387.92	9808.62	26
714133	5329502	Flujo de Detritos	560.72	6269.37	15
714596	5326857	Deslizamiento de Suelo	254.39	2890.7	7
714795	5326923	Deslizamiento de Suelo	181	1686.24	4
714464	5327320	Caída y/o Deslizamiento de Roca	477.01	8239.74	21
714398	5327253	Caída y/o Deslizamiento de Roca	220.45	3310.72	9
714795	5327187	Caída y/o Deslizamiento de Roca	181.88	2001.25	6
715192	5328113	Caída y/o Deslizamiento de Roca Antigua	521.81	9409.35	22
715787	5329635	Caída y/o Deslizamiento de Roca Antigua	971.34	37910.69	90
715985	5329436	Caída y/o Deslizamiento de Roca	568.16	20087.59	48
715588	5328047	Caída y/o Deslizamiento de Roca Antigua	444.87	9155.57	23
715853	5328047	Caída y/o Deslizamiento de Roca	473.6	7261.98	16
718234	5329436	Caída y/o Deslizamiento de Roca Antigua	1543.32	103073.35	254
717507	5330561	Deslizamiento de Roca - Suelo	318.1	3887.21	7
717705	5330561	Deslizamiento de Roca - Suelo	219.33	2415.09	6

Coordenada S	Coordenada W	Tipo de remoción en masa	Perímetro (m)	Área (m ²)	N° de píxeles
718697	5328775	Caída y/o Deslizamiento de Roca	1024.1	32810.71	79
719756	5327650	Caída y/o Deslizamiento de Roca Antigua	449.72	10326.86	26
710098	5332744	Caída y/o Deslizamiento de Roca Antigua	667.09	19970.46	56
714861	5347362	Caída y/o Deslizamiento de Roca Antigua	592.28	19434.71	50
713538	5348288	Caída y/o Deslizamiento de Roca Antigua	863.48	38398.73	90
716779	5357085	Caída y/o Deslizamiento de Roca	893.78	18458.64	47
715787	5356688	Caída y/o Deslizamiento de Roca Antigua	572.27	22747.56	59
716581	5357019	Caída y/o Deslizamiento de Roca Antigua	403.88	8686.42	23
722666	5362273	Deslizamiento de Roca - Suelo	690.52	19191.56	54
722864	5362273	Deslizamiento de Roca - Suelo	743.43	20494.52	58
718565	5351888	Caída y/o Deslizamiento de Roca	1009.58	69405.56	180
713339	5342231	Caída y/o Deslizamiento de Roca	734.72	30972.52	76
715125	5339593	Deslizamiento de Roca - Suelo	636.37	8550.7	26
703947	5332971	Caída y/o Deslizamiento de Roca	1313.46	97830.79	247
703682	5332772	Deslizamiento de Roca - Suelo	496.87	7787.24	19
703616	5332971	Deslizamiento de Suelo	284.15	4199	13
713736	5341702	Deslizamiento de Roca - Suelo	1547.38	36931.59	93
705336	5349573	Deslizamiento de Suelo	547.49	11574.39	26
705468	5349242	Deslizamiento de Suelo	579.4	6730.07	24
705865	5349507	Deslizamiento de Suelo	2398.49	44625.05	99
705270	5347721	Deslizamiento de Roca - Suelo	1719.94	42678.06	105
704608	5346134	Caída y/o Deslizamiento de Roca Antigua	1441.18	110059.12	280
699581	5334690	Deslizamiento de Suelo	462.02	9281.81	21
712215	5344612	Caída y/o Deslizamiento de Roca	636.62	20874.92	48
712546	5344083	Caída y/o Deslizamiento de Roca	342.53	7015.13	20
704939	5346729	Deslizamiento de Suelo	544.76	9295.54	24
704939	5346994	Deslizamiento de Suelo	422.29	3874.89	10
705071	5347192	Deslizamiento de Suelo	270.5	1927	4
706328	5349639	Deslizamiento de Suelo	468.86	6030.38	17
713141	5343025	Deslizamiento de Roca - Suelo	534.53	7250.16	18
712215	5339784	Deslizamiento de Roca - Suelo	2036.82	88015.38	224
712612	5342033	Flujo de Detritos	1038.33	25426.28	71
715919	5327613	Caída y/o Deslizamiento de Roca	398.7	7975.86	21
712943	5342892	Caída y/o Deslizamiento de Roca	902.79	47883.2	121
703153	5333301	Deslizamiento de Suelo	310.92	2599.32	7
712347	5341702	Flujo de Detritos	655.62	14081.3	36

G. SCRIPTS

- **Script “WEIGHT”**

```
rem ILWIS Script
//El parámetro "%1" corresponde al nombre del mapa factor.
// El parámetro "%2" se refiere al nombre del mapa de evidencia.

//Se cruza el mapa factor (%1) con los mapas de evidencias (%2)
// Los mapas de evidencias fueron creados en el script WEIGHTIN
// La tabla cruzada es llamada s%1%2

s%1%2=TableCross(%1.mpr,%2.mpr,IgnoreUndefs)
calc s%1%2.tbt

//Ahora se calcula una columna en la tabla cruzada indicando sólo los
//píxeles con evidencias.

Tabcalc s%1%2 Npixact=iff((%2=1),NPix,0)

//A partir de la tabla cruzada se calcula "nclass" y "nclass%2", donde:
//NCLASS= número de píxeles en la clase. Se suman los valores de las
//columnas Npix.
//nclass%2 = número de píxeles en la clase con evidencias. Se suman los
//valores de las columnas Npixact.
//Los resultados no se guardan en la tabla cruzada s%1%2, pero sí en la
//tabla de atributos %1.

Tabcalc s%1%2 %1.nclass= ColumnJoinSum(s%1%2.tbt,Npix,%1,1)
Tabcalc s%1%2 %1.nclass%2 = ColumnJoinSum(s%1%2.tbt,Npixact,%1,1)

//Ahora se calculan los pesos en la tabla de atributos.

Tabcalc %1 W%2 {dom=value.dom; vr=0:100:0.000001}=
(100*(nclass%2*100)/nclass)

//Ahora se crea un mapa de atributos con los pesos finales.

w%1%2.mpr = MapAttribute(%1,%1.W%2)
calc w%1%2.mpr
```

- **Script “WEIGHTIN”**

```
rem ILWIS Script

//El parámetro "%1" corresponde la tabla asociada a las remociones en
//masa.
// Los parámetros "%2,%3,%4,%5,%6,%7,%8,%9" corresponden al nombre de los
//mapas factores.

//Primero se crean los mapas de evidencias para cada tipo de remoción en
//masa.
//Se generan columnas en la tabla asociada a las remociones (%1)
//indicando el tipo de remoción con el valor 1.

tabcalc %1 Caida=iff(Codigo=3,1,?)
tabcalc %1 Mix=iff(Codigo=4,1,?)
tabcalc %1 Suelo=iff(Codigo=5,1,?)
tabcalc %1 Flujo=iff(Codigo=6,1,?)

//Se crea un mapa de atributos para casa tipo de remoción en masa.

C.mpr{dom=value.dom;vr=1:1} = MapAttribute(%1,Caida)
M.mpr{dom=value.dom;vr=1:1} = MapAttribute(%1,Mix)
S.mpr{dom=value.dom;vr=1:1} = MapAttribute(%1,Suelo)
F.mpr{dom=value.dom;vr=1:1} = MapAttribute(%1,Flujo)

//Los valores indefinidos se vuelven "0" para así obtener mapas sólo con
//valores 0 y 1.

Caida {dom=value.dom;vr=0:1} = IFF(ISUNDEF(C), 0, 1)
Mix {dom=value.dom;vr=0:1} = IFF(ISUNDEF(M), 0, 1)
Suelo {dom=value.dom;vr=0:1} = IFF(ISUNDEF(S), 0, 1)
Flujo {dom=value.dom;vr=0:1} = IFF(ISUNDEF(F), 0, 1)
calc Caida.mpr
calc Mix.mpr
calc Suelo.mpr
calc Flujo.mpr

//Ahora se corre el script "WEIGHT" para los mapas de factores
ingresados.

run weight_1 %2 Caida
run weight_1 %2 Mix
run weight_1 %2 Suelo
run weight_1 %2 Flujo
run weight_1 %3 Caida
run weight_1 %3 Mix
run weight_1 %3 Suelo
run weight_1 %3 Flujo
run weight_1 %4 Caida
run weight_1 %4 Mix
run weight_1 %4 Suelo
run weight_1 %4 Flujo
run weight_1 %5 Caida
run weight_1 %5 Mix
run weight_1 %5 Suelo
```

```

run weight_1 %5 Flujo
run weight_1 %6 Caida
run weight_1 %6 Mix
run weight_1 %6 Suelo
run weight_1 %6 Flujo
run weight_1 %7 Caida
run weight_1 %7 Mix
run weight_1 %7 Suelo
run weight_1 %7 Flujo
run weight_1 %8 Caida
run weight_1 %8 Mix
run weight_1 %8 Suelo
run weight_1 %8 Flujo
run weight_1 %9 Caida
run weight_1 %9 Mix
run weight_1 %9 Suelo
run weight_1 %9 Flujo

```

```

//El mapa de peso total es calculado para cada tipo de remoción en
//masa.

```

```

wCaida {dom=value.dom ; vr =
0:700:0.00001}=w%2Caida+w%3Caida+w%4Caida+w%5Caida+w%6Caida+w%7Caida+w%8C
aida+w%9Caida+wdist_norm_m_clasesFCaida
wMix {dom=value.dom ; vr =
0:700:0.00001}=w%2Mix+w%3Mix+w%4Mix+w%5Mix+w%6Mix+w%7Mix+w%8Mix+w%9Mix+wd
ist_norm_m_clasesFMix
wSuelo {dom=value.dom ; vr =
0:700:0.00001}=w%2Suelo+w%3Suelo+w%4Suelo+w%5Suelo+w%6Suelo+w%7Suelo+w%8S
uelo+w%9Suelo+wdist_norm_m_clasesFSuelo
wFlujo {dom=value.dom ; vr =
0:700:0.00001}=w%2Flujo+w%3Flujo+w%4Flujo+w%5Flujo+w%6Flujo+w%7Flujo+w%8F
lujo+w%9Flujo+wdist_norm_m_clasesFFlujo
calc wCaida.mpr
calc wMix.mpr
calc wSuelo.mpr
calc wFlujo.mpr

```

```

//CALCULO PESO FINAL

```

```

wFinalmio {dom=value.dom ; vr = 0:700:0.00001}=wCaida+wMix+wSuelo+wFlujo
calc wFinalmio.mpr
open wFinalmio.mpr

```

- **Script “DIST NORM”**

```

//El parámetro “%1” corresponde al mapa de distancia a la cresta.
//El parámetro “%2” corresponde al mapa de distancia al valle.

```

```

rem ILWIS Script

```

```

dist_norm_cresta {dom=value.dom ; vr = 0:700:0.00001}= %1/(%1+%2)
calc dist_norm_cresta.mpr
open dist_norm_cresta.mpr

```

- **Script “SUCCESS”**

```
//El parámetro "%1" corresponde al mapa de peso.  
  
rem ILWIS Script  
%1.his = TableHistogram(%1)  
calc %1.his  
tabcalc %1.his cumpctmax = ColumnAggregateMax(npumpct,,1)  
tabcalc %1.his npixcumpct:=npumpct*(100/cumpctmax)  
tabcalc %1.his inverse:=100-npixcumpct  
tabcalc %1.his classes = CLFY(inverse,classes)  
  
tabcalc classes %1 = ColumnJoinMax(%1.his,value,classes,1)  
  
// Crear una tabla %1 con groupdomain %1 anterior.
```

- **Script “SUCCESS2”**

```
//El parámetro "%1" corresponde al mapa de peso.  
//El parámetro "%2" corresponde al mapa de evidencias.  
  
rem ILWIS Script  
//Se clasifica el mapa de peso  
  
%1s = MapSlicing(%1,%1.dom)  
calc %1s.mpr  
  
//Se cruza el mapa clasificado con el mapa de evidencia.  
  
%1c.tbt = TableCross(%1s,%2,IgnoreUndefs)  
calc %1c.tbt  
  
Tabcalc %1c.tbt npixact = ifundef(%2,0,npix)  
Tabcalc %1.tbt npixact = ColumnJoinSum(%1c.tbt,npixact,%1s,1)  
tabcalc %1.tbt npixactsum= ColumnAggregateSum(npixact,,1)  
tabcalc %1.tbt percent=100*(npixact/npixactsum)  
tabcalc %1.tbt cumpercent=cum(percent)  
tabcalc %1.tbt reorder=100-cumpercent  
open %1.tbt  
  
// Agregar columna "classmax" con el valor máximo de cada clase.
```