



UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

MORFOMETRÍA DE ABANICOS ALUVIALES EN EL NORTE DE  
CHILE (18°S a 31°S) E IMPLICANCIAS PARA SU APLICACIÓN EN  
EL ESTUDIO DE PROCESOS HIDROGEOMORFOLÓGICOS

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGO

IVAN GABRIEL MORALES ÁVILA

PROFESOR GUÍA

RODRIGO RAULD PLOTT

PROFESORA CO-GUÍA

MARISOL LARA CASTILLO

COMISIÓN

VALENTINA FLORES AQUEVEQUE

SANTIAGO DE CHILE

2019

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL  
TÍTULO DE: GEÓLOGO**

**POR:** Iván Gabriel Morales Ávila

**FECHA:** 30/09/2019

**PROFESOR GUÍA:** Rodrigo Rauld Plott

**MORFOMETRÍA DE ABANICOS ALUVIALES EN EL NORTE DE CHILE (18°S a  
31°S) E IMPLICANCIAS PARA SU APLICACIÓN EN EL ESTUDIO DE  
PROCESOS HIDROGEOMORFOLÓGICOS**

La siguiente investigación presenta el desarrollo de una metodología de caracterización de abanicos aluviales en el norte de Chile. A partir de esta, se han construido tres clasificaciones mayores, sobre las cuales, por medio de una zonificación de temporalidad relativa de los depósitos, se ha propuesto un acercamiento a estudios para evaluación de susceptibilidad de remociones en masa.

Para caracterizar las zonas de estudio se realizó una medición de parámetros morfométricos de 131 abanicos aluviales, se seleccionaron 40 de ellos para compararlos y asociarlos a un determinado ambiente. Todos los abanicos son delimitados y medidos a partir de imágenes satelitales y mapas de elevación digital de libre acceso.

El área de los abanicos aluviales seleccionados presenta una relación de proporcionalidad directa con el área de su cuenca de drenaje. Por medio de regresiones matemáticas potenciales, se obtienen constantes empíricas que la bibliografía identifica como marcadores de similitudes y diferencias entre las tres clasificaciones. Con esto, se logra confirmar que la variable de mayor relevancia en el desarrollo de abanicos aluviales en el norte de Chile es el espacio disponible para el depósito de sedimentos. Abanicos aluviales con cuencas de drenaje amplias poseen áreas de depósito con tamaño similar a áreas de abanicos de cuencas más pequeñas. Por otro lado, el desarrollo de una zonificación de temporalidad relativa de las superficies del abanico permite identificar las zonas de mayor actividad sobre cada uno de los depósitos y, por lo tanto, las que sugieren una mayor susceptibilidad de ser afectadas por remociones en masa.

El desarrollo de esta metodología permite realizar una caracterización general de los abanicos aluviales del norte de Chile y, a su vez, analizar y comparar los distintos ambientes de depósito de abanicos. Todo esto como un primer acercamiento a la caracterización geomorfológica de cualquier zona de estudio, previo a trabajos de terreno.

*A mis padres y su historia, que hoy me tienen llenos de  
felicidad y expectativa.*

## Agradecimientos

A mi profesor guía Rodrigo Rauld, por su apoyo, comprensión y todos los consejos que me ayudaron a llegar a buen puerto. Desde mis tiempos de práctica siempre me impulsó a mirar más allá de lo evidente y a entender lo que no se puede saber sin un buen trabajo de por medio.

A mi profesora cogaía Marisol Lara, por su buena voluntad y apoyo en todos los momentos que parecían más difíciles. Su ayuda fue fundamental para lograr todo lo que nos propusimos desde el inicio.

A la profesora Valentina Flores por hacerse partícipe de esta investigación, entregarme su apoyo y entusiasmo siempre que se lo solicité.

A Blanca, Rosita, el Vacca y todos los funcionarios del departamento de Geología que siempre me ayudaron, tanto en la facultad como en las salidas a terreno. Sin ellos, nada de esto sería posible.

A mis compañeros de geo. A Vicente, Mario, Vanessa, Jorge y todos aquellos con los que tuve el placer de compartir todos estos años. Su apañe y amistad me ayudó a mantener las ganas de estudiar la carrera que ahora quiero más que nunca.

A mis eternos amigos del colegio y la universidad. Al Seba, Dani, Kevin, José, Áxel, Ricardo, Francisco, Ariel y todos los que convivimos en “el roble” por tantos años. Las clases y no clases se pasaron mucho más rápido pensando en todos los grandes momentos que compartimos juntos.

A mi querido team MTZ. Por las risas, las penas, las frustraciones y los calditos que vivimos tantas noches de amanecida. Gracias por tanto.

A mis grandes amigos Diego Gramusset y Gabriel Castillo, por su cariño incondicional y todas esas conversaciones que guardo en el corazón.

A mis padres y hermanas por apoyarme, aguantarme y ser los primeros en ver en mí la capacidad de cumplir todo lo que estoy logrando ahora. Los amo.

A Karin por ser mi compañera, por su amor, por dar el aguante conmigo en estos tres años y hacerme sentir todos los días que estoy a la altura de afrontar cualquier desafío.

## Tabla de Contenido

1. Introducción .....	1
1.1. Objetivos .....	3
1.1.1. General.....	3
1.1.2. Específicos .....	3
1.2. Ubicación del estudio .....	4
1.3. Metodología .....	9
2. Marco teórico.....	9
2.1. Abanicos aluviales .....	10
2.2. Flujos de detritos.....	20
2.3. Factores determinantes en la modificación de depósitos aluviales.....	23
2.3.1. Clima .....	24
2.3.2. Alteraciones de roca.....	24
2.3.3. Eventos particulares .....	25
2.3.4. Topografía .....	25
3. Metodología para la caracterización de abanicos aluviales.....	26
3.1. Medición de datos morfométricos .....	26
3.2. Selección de sitios .....	28
3.3. Criterios de caracterización.....	28
3.4. Criterios para la selección de abanicos representativos de cada zona de estudio .....	32
3.4.1. Criterio 1: Depósito aluvial con morfología de abanico.....	33
3.4.2. Criterio 2: Abanico aluvial conservado .....	33
3.4.3. Criterio 3: Abanico aluvial no intervenido .....	33
3.5. Caracterización de abanicos aluviales.....	34
3.5.1. Medición de parámetros morfométricos .....	34
3.5.2. Procedimiento para la delimitación de cuencas aportantes.....	36
4. Área de estudio .....	39
4.1. Geomorfología .....	39
4.1.1. Planicies litorales y farellones costeros .....	40
4.1.2. Cordillera de la Costa.....	40
4.1.3. Valles transversales .....	41
4.1.4. Desierto de Atacama.....	42

4.1.5.	Precordillera .....	42
4.2.	Geología .....	42
4.2.1.	Región de Tarapacá .....	44
4.2.2.	Región de Antofagasta .....	45
4.2.3.	Región de Atacama .....	46
4.2.4.	Región de Coquimbo .....	47
4.3.	Antecedentes climáticos generales .....	48
4.4.	Antecedentes de remociones en masa .....	50
5.	Resultados .....	58
5.1.	Selección de zonas de estudio .....	58
5.1.1.	Norte Costero de Punta Patillos a El Loa, Región de Tarapacá. ....	58
5.1.2.	Norte Costero de Paposo a Taltal, Provincia de Antofagasta, Región de Antofagasta .....	59
5.1.3.	Precordillera Andina, Provincia de Huasco, Región de Atacama. ...	59
5.1.4.	Valles Transversales, Provincia de Elqui, Región de Coquimbo. ...	60
5.1.5.	Valles Transversales, Provincia de Limarí, Región de Coquimbo ..	60
5.2.	Abanicos seleccionados por zona .....	63
5.2.1.	Zona 1: Punta Patillos a El Loa .....	63
5.2.2.	Zona 2: Paposo a Taltal .....	65
5.2.3.	Zona 3: Alto del Carmen .....	67
5.2.4.	Zona 4: Elqui .....	69
5.2.5.	Zona 5: Limarí .....	72
5.3.	Abanicos no seleccionados por zona .....	72
5.4.	Clasificación de Abanicos Aluviales .....	74
5.4.1.	Clasificación I: Abanicos aluviales costeros del norte de Chile .....	75
5.4.2.	Clasificación II: Abanicos aluviales de valles transversales en zonas semiáridas .....	79
5.4.3.	Clasificación III: Abanicos aluviales de valles transversales en zonas de transición de clima semiárido a húmedo. ....	81
5.5.	Relación de regresiones de cada clasificación .....	85
5.6.	Evaluación de procesos aluviales ocurridos entre el 24 y 26 de marzo de 2015 en el norte de Chile .....	87
5.6.1.	Zona reciente de cada depósito .....	87
5.6.2.	Zonificación de eventos recientes para abanicos tipo I .....	88

5.6.3.	Zonificación de eventos recientes para abanicos tipo II .....	89
5.6.4.	Zonificación de eventos recientes para abanicos tipo III .....	90
5.7.	Actividad sobre zonificación reciente en casos relevantes. ....	92
6.	Discusiones .....	96
6.1.	Datos morfométricos y comparación con imágenes satelitales.....	96
6.2.	Zonificación superficial de abanicos aluviales.....	99
6.3.	Alcances y limitantes de la metodología .....	101
7.	Conclusiones .....	103
8.	Recomendaciones.....	104
9.	Bibliografía.....	105
Anexos	.....	110
Anexo A:	Mapeo geológico de abanicos aluviales .....	110
Anexo A-1:	Mapeo geológico de abanicos aluviales seleccionados de la zona 1 .....	110
Anexo A-2:	Mapeo geológico de abanicos aluviales seleccionados de la zona 2.....	115
Anexo A-3:	Mapeo geológico de abanicos aluviales seleccionados de la zona 3.....	120
Anexo A-4:	Mapeo geológico de abanicos aluviales seleccionados de la zona 4.....	125
Anexo A-5:	Mapeo geológico de abanicos aluviales seleccionados de la zona 5.....	129
Anexo A-6:	Mapeo geológico de abanicos aluviales no seleccionados de la zona 1 .....	132
Anexo A-7:	Mapeo geológico de abanicos aluviales no seleccionados de la zona 2.....	144
Anexo A-8:	Mapeo geológico de abanicos aluviales no seleccionados de la zona 3.....	151
Anexo A-9:	Mapeo geológico de abanicos aluviales no seleccionados de la zona 4.....	163
Anexo A-10:	Mapeo geológico de abanicos aluviales no seleccionados de la zona 5.....	170
Anexo B:	Tabla de parámetros morfométricos para abanicos aluviales no seleccionados por zona. ....	179
Anexo B-1:	Tabla de datos para abanicos no seleccionados en zona 1 ...	179

Anexo B-2: Tabla de datos para abanicos no seleccionados de zona 2 ...	180
Anexo B-3: Tabla de datos para abanicos no seleccionados de zona 3 ...	180
Anexo B-4: Tabla de datos para abanicos no seleccionados de zona 4 ...	181
Anexo B-5: Tabla de datos para abanicos no seleccionados de zona 5 ...	181
Anexo C: Zonificación de temporalidad relativa para abanicos seleccionados	182
Anexo C-1: Zonificación de temporalidad relativa para abanicos seleccionados de clasificación I.....	182
Anexo C-2: Zonificación de temporalidad relativa para abanicos de clasificación II .....	191
Anexo C-3: Zonificación de temporalidad relativa para abanicos de clasificación III. ....	197
Anexo D: Tabla de datos de precipitación durante marzo de 2015 en cada una de las zonas de estudio .....	204
Anexo D-1: Tabla de precipitaciones durante marzo de 2015 en zona 1 de estudio.....	204
Anexo D-2: Tabla de precipitaciones durante marzo de 2015 en zona 2 de estudio.....	206
Anexo D-3: Tabla de precipitaciones durante marzo de 2015 en zona 3 de estudio.....	207
Anexo D-4: Tabla de precipitaciones durante marzo de 2015 en zona 3 de estudio.....	209
Anexo D-5: Tabla de precipitaciones durante marzo de 2015 en zona 3 de estudio.....	211
Anexo E: Geología detallada por región .....	213
Anexo E-1: Geología predominante en la región de Tarapacá.....	213
Anexo E-2: Geología predominante en la región de Antofagasta.....	215
Anexo E-3: Geología predominante en la región de Atacama.....	216
Anexo E-4: Geología predominante en la región de Coquimbo .....	218

## Índice de Tablas

Tabla 1: Meteorización de rocas por diferentes factores y grados. Modificado de e-Learning program de Freie Universität Berlin, (2019).....	25
Tabla 2: Parámetros morfométricos para 8 abanicos seleccionados de la zona de estudio 1.....	63
Tabla 3: Parámetros morfométricos para 8 abanicos de la zona de estudio 2. ....	65
Tabla 4: Parámetros morfométricos para 11 abanicos de la zona de estudio 3. ....	68
Tabla 5: Parámetros morfométricos para 12 abanicos seleccionados de las zonas de estudio 4 y 5. ....	70
Tabla 6: Índices de erodibilidad globales para litologías en zonas con tasa de alzamiento baja. ....	78
Tabla 7: Tabla resumen de características principales de cada clasificación de abanicos aluviales estudiados en este trabajo. ....	84
Tabla 8: Regresiones potenciales para las tres clasificaciones del estudio .....	86
Tabla 9: Precipitaciones diarias para el mes de marzo de 2015 en la estación meteorológica de la localidad de Quillagua. ....	204
Tabla 10: Precipitaciones diarias para el mes de marzo de 2015 en la estación meteorológica de la localidad de Tocopilla.....	205
Tabla 11: Precipitaciones diarias para el mes de marzo de 2015 en la estación meteorológica de la localidad de Taltal. ....	206
Tabla 12: Precipitaciones diarias para el mes de marzo de 2015 en la estación meteorológica de la localidad de Junta del Carmen.....	207
Tabla 13: Precipitaciones diarias para el mes de marzo de 2015 en la estación meteorológica de la localidad de El Tránsito. ....	208
Tabla 14: Precipitaciones diarias para el mes de marzo de 2015 en la estación meteorológica de la localidad de Rivadavia. ....	209
Tabla 15: Precipitaciones diarias para el mes de marzo de 2015 en la estación meteorológica de la localidad de Monte Grande. ....	210
Tabla 16: Precipitaciones diarias para el mes de marzo de 2015 en la estación meteorológica de la localidad de Rapel.....	211
Tabla 17: Precipitaciones diarias para el mes de marzo de 2015 en la estación meteorológica de la localidad de Tuluahuén. ....	212

## Índice de Figuras

Figura 1 : Primera zona de estudio. Planicie litoral desde Punta Patillos hasta El Loa. ....	4
Figura 2: Segunda zona de estudio. Planicie litoral desde Paposos hasta Taltal. ....	5
Figura 3: Tercera zona de estudio. Valles transversales al oriente de la localidad de Alto del Carmen.....	6

Figura 4: Parte de la cuarta zona de estudio. Valles transversales en la provincia de Elqui. ....	7
Figura 5: Segunda sección de la cuarta zona de estudio. Valles transversales de la provincia de Limarí. ....	8
Figura 6: Distribución radial de paleocanales que marcan el paso de flujos en distintas direcciones, fenómeno que aporta significativamente a la morfología del abanico. (Bluck, 1965).....	12
Figura 7: Diferentes perfiles radiales de elevación de abanicos aluviales. (Blissenbach, 1954).....	13
Figura 8: Perfil radial de elevación de abanico aluvial típico con distribución granulométrica general por tramo, con diámetro promedio de partículas. (Colombo, 2010) modificado de (McGowen y Groat, 1971).....	14
Figura 9: Perfil radial de abanico aluvial con punto de intersección en zona de canal desencajonado. (Hooke, 1967).....	15
Figura 10: Relaciones geomorfológicas principales en un abanico aluvial. (Colombo, 2010).....	16
Figura 11: Esquema simplificado de un abanico aluvial (Giles et al, 2018).....	17
Figura 12: Perfil radial de abanico aluvial típico con zonación respecto al ápice y marcas de granulometría. De izquierda a derecha la granulometría cambia de la siguiente manera: (1) proximal con gravas masivas; (2) mid-fan con estratificación intercalada y cruzada de arena; (3) Distal con estratificación cruzada de areniscas. (McGowen y Groat, 1971) .....	18
Figura 13: Corte esquemático del frente de un flujo de detritos que muestra la formación de levées laterales de grano grueso tras el frente de avance. El trayecto de un grano superficial representativo se encuentra indicado en rojo. El “Marco de referencia” se mueve hacia adelante a la velocidad de avance del frente de flujo, por lo que un grano superficial que avanza más lentamente que el frente parece moverse hacia atrás. Editado de (Johnson et al, 2012) .....	22
Figura 14: Depósito de flujo de detritos con alta concentración de bloques en Lagos Arrow, Columbia Británica, Canadá. Fotografía de P. Jordan (Geertsema et al, 2002). ....	23
Figura 15: Relación de área de abanicos y área de cuencas para distintos ambientes. (Bull, 1977; Kesel,1985). Diagrama de Gómez (1989) .....	31
Figura 16: Perfil geológico esquemático del norte de Chile con sus unidades más importantes. La escala no está determinada (Seyfried et al, 1998a).....	40
Figura 17: Distribución geomorfológica del norte de Chile. (Clarke, 2006) .....	41
Figura 18: Mapa geológico de Chile a escala 1:1.000.000 entre latitudes 17°30' y 31°00'. Modificado de Servicio Nacional de Geología y Minería, 2003. ....	43
Figura 19: Registro de precipitaciones mensuales en el intervalo de 1980 a 2018 para estaciones pluviométricas en cada una de las zonas de estudio. (a) Precipitaciones en El Loa, localidad representativa de la zona 1 de estudio; (b) Precipitaciones en Tal-tal, localidad representativa de la zona 2 de estudio; (c) Precipitaciones en Junta del Carmen, localidad representativa de la zona 3 de	

estudio; (d) Precipitaciones en Rivadavia, localidad representativa de la zona 4 de estudio; (e) Precipitaciones en Rapel, localidad presentativa de la zona 5 de estudio.....	50
Figura 20: Temperaturas máxima, mínima, media y precipitaciones durante el período de 20 a 30 de marzo de 2015. Información de la Dirección Meteorológica de Chile, extraído de Olea y Arce, (2015). .....	52
Figura 21: Cuencas afectadas por el evento de precipitaciones del 24-26 de marzo de 2015. (Olea y Arce, 2015) .....	53
Figura 22: Gráficos de precipitaciones con milímetros caídos por día y precipitaciones acumuladas del mes de marzo de 2015 en localidades de las zonas de estudio. Localidad de Quillagua y Tocopilla para la zona 1; Localidad de Taltal para la zona 2; Localidad de Junta del Carmen y El Tránsito para la zona 3; Localidad de Rivadavia y Monte Grande para la zona 4; Localidad de Rapel y Tuluahuén para la zona 5. Los valores de precipitación diarios para cada una de las localidades se encuentran en el Anexo D. Elaboración propia.....	55
Figura 23: Modelo de elevación digital con erosión y volumen de subcuencas del Valle del Huasco durante las precipitaciones de marzo de 2015 (Aguilar et al, 2015). .....	56
Figura 24: Fotografías de Quebrada Leiva, ubicada al este de la ciudad de Vicuña. Abajo se observa la quebrada previo al evento de precipitación de marzo de 2015, mientras que arriba se puede ver la misma quebrada a unos días del fenómeno (Opazo y Velásquez, 2015). .....	57
Figura 25: Mapa del norte de Chile que indica cada una de las 5 zonas de estudio. ....	62
Figura 26: Gráfico de área de abanico aluvial vs área de cuenca aportante respectiva, para abanicos seleccionados de la Zona 1 de estudio.....	64
Figura 27: Gráfico de pendiente de abanico aluvial vs área de cuenca aportante respectiva, para abanicos seleccionados de la Zona 1 de estudio.....	64
Figura 28: Gráfico de área de abanico aluvial vs área de cuenca aportante respectiva, para abanicos seleccionados de la Zona 2 de estudio.....	65
Figura 29: Gráfico de pendiente de abanico aluvial vs área de cuenca aportante respectiva, para abanicos seleccionados de la Zona 2 de estudio.....	66
Figura 30: Gráfico de área de abanico aluvial vs área de cuenca aportante respectiva, para abanicos seleccionados de las Zonas 1 y 2 de estudio. ....	67
Figura 31: Gráfico de área de abanico aluvial vs área de cuenca aportante respectiva, para abanicos seleccionados de la Zona 3 de estudio.....	68
Figura 32: Gráfico de pendiente de abanico aluvial vs área de cuenca aportante respectiva, para abanicos seleccionados de la Zona 3 de estudio.....	69
Figura 33: Gráfico de área de abanico aluvial vs área de cuenca aportante respectiva, para abanicos seleccionados de las Zonas 4 y 5 de estudio. ....	71
Figura 34: Gráfico de pendiente de abanico aluvial vs área de cuenca aportante respectiva, para abanicos seleccionados de las Zonas 4 y 5 de estudio. ....	71

Figura 35: Gráfico de área de abanico vs área de cuenca aportante para los abanicos aluviales no seleccionados de la zona 1. ....	73
Figura 36: Gráficos de área de abanico vs área de cuenca aportante para abanicos seleccionados de zona 2 y abanicos no seleccionados, con corrección de datos, de la zona 2. ....	74
Figura 37: Gráfico de área de abanico vs área de cuencas aportantes respectiva de los abanicos seleccionados de las 5 zonas de estudio. ....	76
Figura 38: Gráfico de área de abanico vs área de cuenca aportante para los abanicos aluviales de las clasificaciones II y III. ....	82
Figura 39: Gráfico de pendiente de abanico vs área de cuenca aportante respectiva para los abanicos aluviales seleccionados de la clasificación III. ....	83
Figura 40: Gráfico de regresiones potenciales para datos seleccionados de tres clasificaciones .....	85
Figura 41: Abanico ZN-1-01 de la Clasificación I. A la izquierda se observa el abanico delimitado en el mapeo general mientras que, a la derecha, se observa el mismo abanico con la zonificación de 3 niveles de temporalidad relativa. El resto de las zonificaciones de abanicos de la clasificación II se encuentra en la sección de anexos C-1. Elaboración propia. ....	89
Figura 42: Abanico ZN-3-04 de la Clasificación II. A la izquierda se observa el abanico delimitado en el mapeo general mientras que, a la derecha, se observa el mismo abanico con la zonificación de 3 niveles de temporalidad relativa. El resto de las zonificaciones de abanicos de la clasificación II se encuentra en la sección de anexos C-2. Elaboración propia. ....	90
Figura 43: Abanico ZN-4-03 de la Clasificación III. A la izquierda se observa el abanico delimitado en el mapeo general mientras que, a la derecha, se observa el mismo abanico con la zonificación de 3 niveles de temporalidad relativa. El resto de las zonificaciones de abanicos de la clasificación II se encuentra en la sección de anexos C-3. Elaboración propia. ....	91
Figura 44: Imágenes de los abanicos ZN-01-04, ZN-01-05 y ZN-01-08 de la clasificación I para las fechas 15 de julio de 2013 (a la izquierda) y 3 de marzo de 2016 (a la derecha). Digital Globe imagery desde Google Earth.). Al centro mapeo de cambio sobre abanico Zn-01-05. ....	93
Figura 45: Imágenes de los abanicos ZN-03-7, ZN-03-10 y ZN-03-11 de la clasificación II para las fechas 3 de octubre de 2013 (a la izquierda) y 11 de octubre de 2016 (a la derecha). Digital Globe imagery desde Google Earth. Al centro, mapeo de zona activa de abanico ZN-03-11 y achurado sobre plantaciones removidas. ....	94
Figura 46: Imágenes del abanico ZN-04-2 de la clasificación III el 2 de enero de 2013 (a la izquierda) y 31 de octubre de 2016 (a la derecha). Digital Globe imagery desde Google Earth y Sentinel 2-A imagery. ....	95
Figura 47: Área de abanico vs área de cuenca aportante de abanicos seleccionados con corrección de datos de la zona 2 de estudio. ....	98

Figura 48: Área de abanico vs área de cuenca aportante de abanicos seleccionados con corrección de datos de la zona 2 de estudio. Los datos se muestran con ejes en función logarítmica y regresión potencial. ....	99
Figura 49: Zonificación de temporalidad relativa para abanico ZN-3-09 de la zona 3 de estudio.....	100

# 1. Introducción

Los depósitos cuaternarios con morfología de abanico aluvial corresponden a sistemas de transferencia de sedimentos que se depositan en cuencas adyacentes (Graf, 1988) y representan una condición de peligro geológico existente que se da en prácticamente todos los ambientes geológicos y climáticos (Wasson, 1977; Dorn, 2009).

La presencia de un depósito de abanico aluvial implica que cualquier tipo de evento erosivo importante en el sistema puede desencadenar la ocurrencia de una remoción en masa. Precipitaciones fuertes, cambios en cauces de ríos, tectonismo y cualquier otra condición que altere la morfología superficial pueden generar todo tipo de remociones en masa (Bull, 1977; Wieczorek, 2005). En términos de peligrosidad asociada a este tipo de depósitos, las remociones en masa más relevantes son los flujos de barro y/o detritos y deslizamientos de suelo (Chawner, 1935). Esto es importante al considerar que, dada su morfología, muchas localidades y grupos humanos se encuentran emplazados sobre antiguos abanicos aluviales

Desde mediados del siglo XX, la descripción de abanicos aluviales se basa en el estudio de características sedimentarias granulométricas, litológicas y morfométricas. Para ello, los trabajos de Bull (1964) y Hooke (1968a), entre otros, han complementado sus observaciones de terreno con la medición de parámetros tanto de los abanicos aluviales como de sus cuencas de drenaje asociadas. Estos valores morfométricos son los más relevantes, ya que permiten establecer algunas relaciones matemáticas entre los parámetros y así predecir las características de los abanicos que no han sido estudiados con el mismo detalle.

Con el avance de la tecnología, el estudio de imágenes satelitales permitió extraer mayor cantidad de información desde un sitio remoto, por lo que la naturaleza de este tipo de investigaciones ha evolucionado desde un trabajo completo de terreno a una combinación de ambos aspectos.

A pesar de llegar a conjeturas aplicables, esta clase de estudios requiere la comprobación de resultados de estudios previos en otras ubicaciones geográficas. En el caso de nuestro país, a pesar de la alta actividad aluvional evidenciable particularmente en la zona norte, no existen estudios generalizados de características geomorfológicas de abanicos aluviales.

Dicho todo esto, el fin de esta investigación es determinar si una caracterización geomorfológica de abanicos aluviales del norte de Chile basada únicamente en la medición de parámetros obtenidos mediante imágenes satelitales de libre acceso permite generar un antecedente aplicable en estudios de susceptibilidad de remociones en masa.

## 1.1. Objetivos

### 1.1.1. General

Caracterizar y analizar los abanicos aluviales más representativos de la zona norte de Chile, dadas las condiciones geológicas y climáticas presentes en este sector, mediante el estudio de sus principales parámetros morfométricos.

### 1.1.2. Específicos

- Generar una base de datos de los principales abanicos aluviales de cuatro zonas de interés en el Norte de Chile, que incluyen sus parámetros morfométricos y características morfológicas más importantes.
- Establecer una relación entre área de depósito, morfología y ubicación geográfica de abanicos aluviales en el norte de Chile.
- Comparar, clasificar y zonificar los distintos abanicos aluviales de las zonas estudiadas

## 1.2. Ubicación del estudio

El estudio de caracterización de abanicos aluviales fue realizado en cuatro zonas distintas del norte de Chile, seleccionadas a partir de la revisión de imágenes satelitales de los sectores con mayor concentración de abanicos aluviales y respaldadas por los informes de ocurrencia de remociones en masa de SERNAGEOMIN (Naranjo, 2015).

La primera de ellas corresponde a la planicie costera ubicada, de norte a sur, entre las localidades de Punta Patillos y El Loa, ambas en la Región de Tarapacá. De oriente a poniente, el sector estudiado corresponde a toda el área que se encuentra entre el acantilado costero y el Océano Pacífico (ver Figura 1). Específicamente, la zona 1 de estudio se ubica entre las latitudes  $20^{\circ}48'S$  y  $21^{\circ}25'S$ .

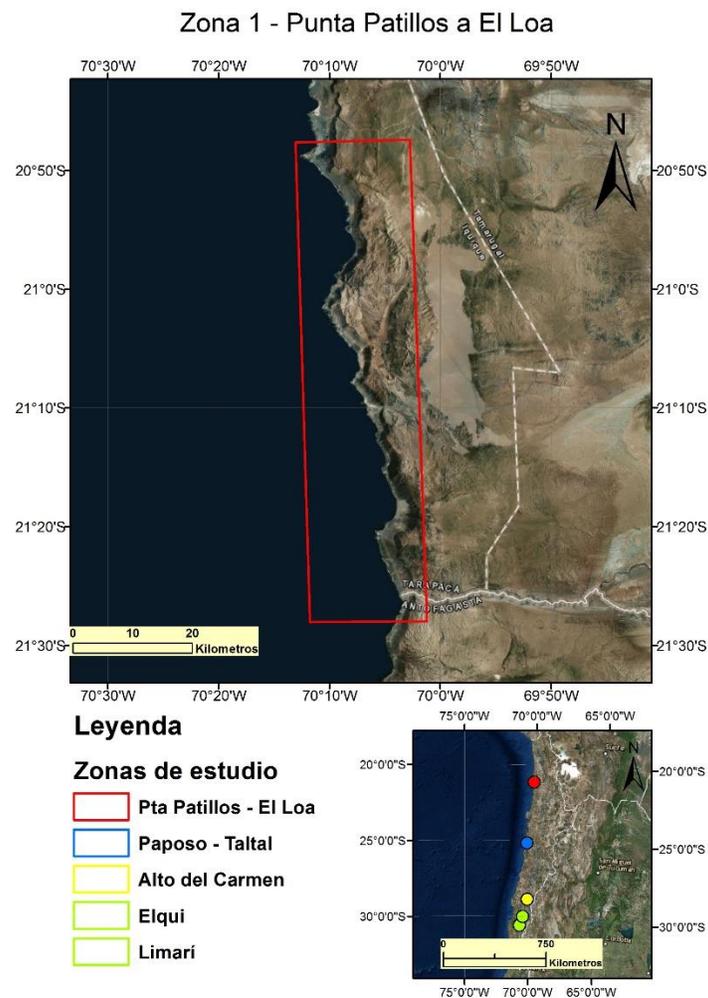


Figura 1 : Primera zona de estudio. Planicie litoral desde Punta Patillos hasta El Loa.

La segunda zona de estudio corresponde, al igual que la primera, a la planicie costera ubicada entre el acantilado costero y el Océano Pacífico, pero entre las localidades de Paposo y Taltal en la Región de Antofagasta (ver Figura 2). Específicamente, la zona 2 de estudio se ubica entre las latitudes 24°55'S y 25°25'S.

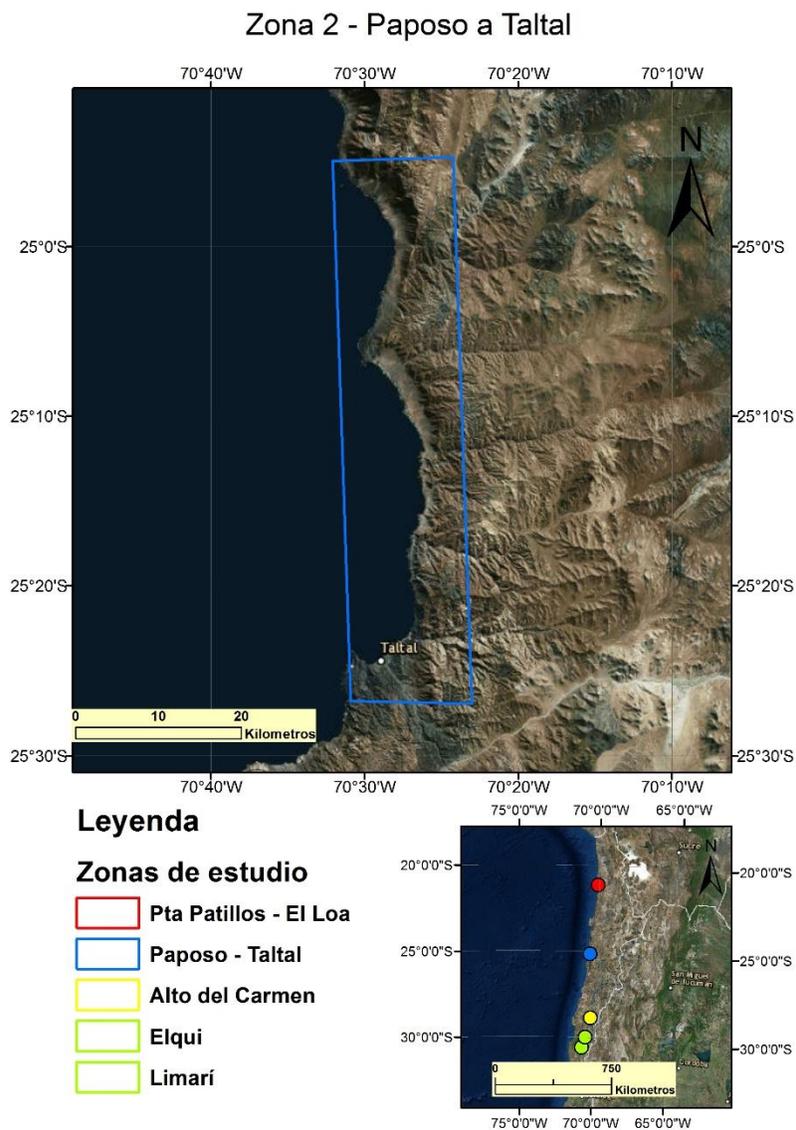


Figura 2: Segunda zona de estudio. Planicie litoral desde Paposo hasta Taltal.

A diferencia de las zonas previamente definidas, las zonas 3 y 4 del estudio corresponden a sectores precordilleranos y ubicados en los valles transversales del norte semiárido chileno. Dicho esto, la tercera zona de estudio corresponde al sector en torno al Valle del Tránsito y Valle del Carmen, en la localidad de Alto del Carmen,

Región de Atacama (ver Figura 3). Específicamente, la zona 3 de estudio se ubica entre las latitudes  $28^{\circ}43'S$  y  $29^{\circ}0'S$ , longitudes  $70^{\circ}07'W$  y  $70^{\circ}29'W$ .

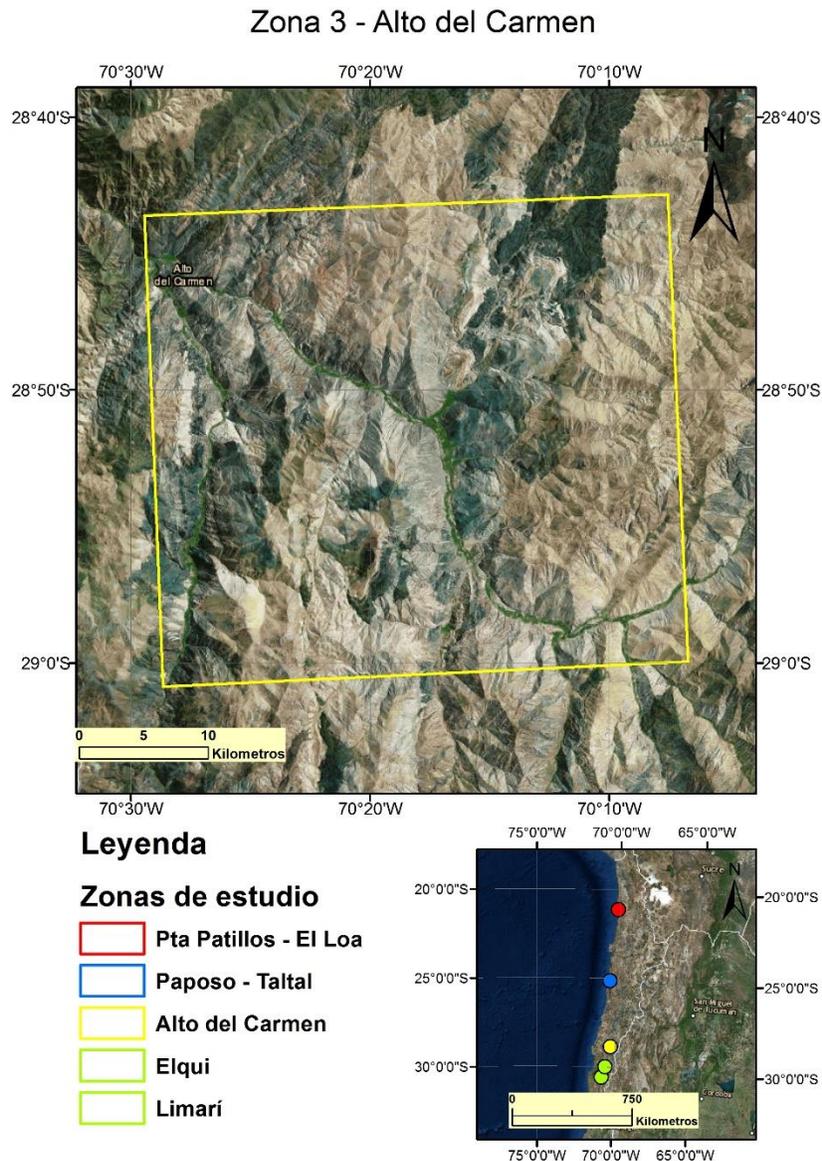


Figura 3: Tercera zona de estudio. Valles transversales al oriente de la localidad de Alto del Carmen.

La cuarta zona de estudio considera dos áreas cercanas y de características similares. La primera de ellas considera los valles transversales precordilleranos de la Región de Coquimbo. En particular, los valles que se encuentran al oriente de la localidad de Vicuña entre las latitudes  $29^{\circ}47'S$ ,  $30^{\circ}10'S$  y longitudes  $70^{\circ}24'W$  y  $70^{\circ}48'W$ . La segunda corresponde a los valles transversales precordilleranos de la Región de Coquimbo. Específicamente, entre las latitudes  $30^{\circ}15'S$ ,  $30^{\circ}51'S$  y

longitudes 70°29'W, 71°09'W. Ambas se encuentran contiguas, por lo que para efectos de este estudio se han considerado como una misma zona de estudio, la zona 4 (ver Figura 4 y Figura 5).

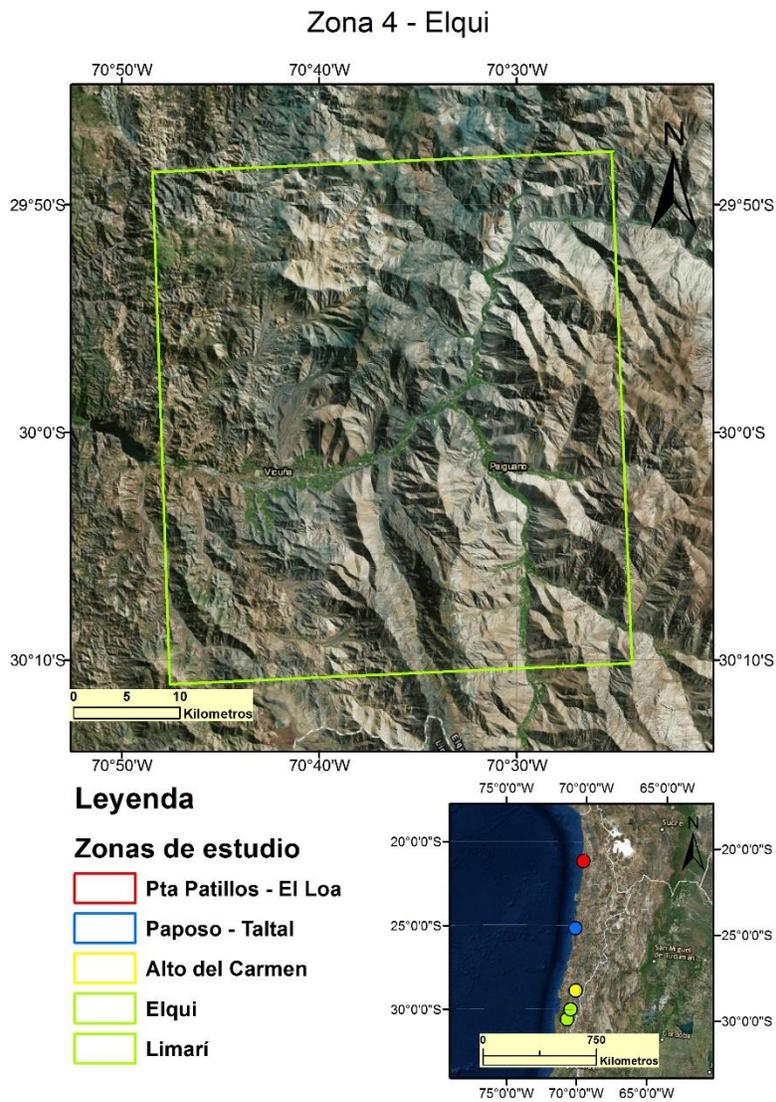


Figura 4: Parte de la cuarta zona de estudio. Valles transversales en la provincia de Elqui.

### Zona 4 - Limarí

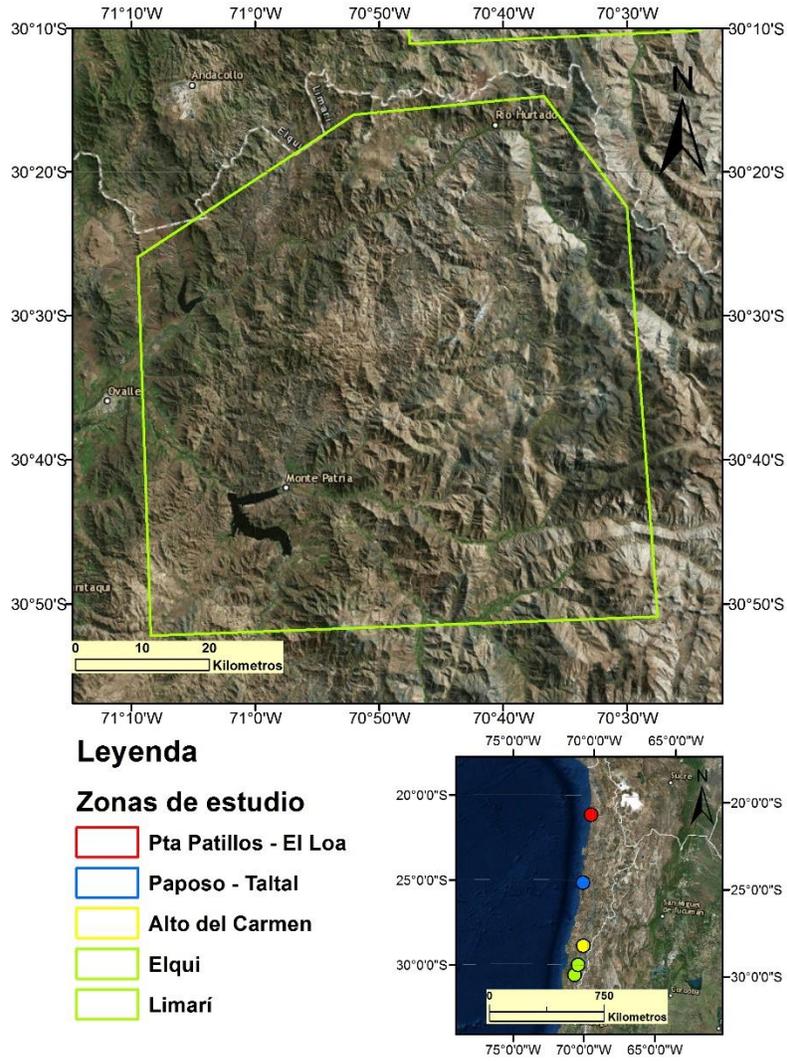


Figura 5: Segunda sección de la cuarta zona de estudio. Valles transversales de la provincia de Limarí.

En la sección 5.1. de este documento se realiza una descripción en detalle de cada una de las zonas de interés y sus características más relevantes para el estudio de abanicos aluviales.

### 1.3. Metodología

Por medio de la observación de imágenes satelitales a través del software Google Earth, se seleccionaron sectores del norte de Chile donde fuese posible encontrar abanicos aluviales de características similares entre ellos. Luego de seleccionar los sectores de mayor concentración de abanicos, utilizando el software ArcGis y modelos digitales de elevación (DEM) obtenidos de imágenes satelitales se comenzó a construir una estadística de los datos morfométricos más importantes. Entre ellos el largo y ancho de abanicos, pendiente promedio, área del abanico y área de la cuenca aportante. Estos últimos dos son los más relevantes ya que permiten establecer comparaciones entre una y otra zona.

Al obtener los datos y comparando con la bibliografía, se utilizan relaciones morfométricas para caracterizar las zonas de estudios y definir los tipos de abanicos que allí se forman. Esta caracterización es la que permite crear una clasificación de abanicos de acuerdo con su ambiente y regímenes de aporte.

Una vez que se han descrito las clasificaciones de abanicos aluviales, se define una zonación general de temporalidad relativa de secciones de los depósitos para los abanicos aluviales de cada una de las clasificaciones.

A partir de un catastro de eventos históricos e imágenes satelitales de fechas específicas, se evalúa qué tipo de abanicos son de mayor relevancia para un análisis de susceptibilidad de remociones en masa.

El capítulo 3 de esta investigación indica la metodología utilizada para la caracterización de abanicos aluviales en detalle. En ella se describen los criterios de caracterización y todos los elementos a considerar para el reconocimiento y descripción de abanicos aluviales en el norte de Chile.

## 2. Marco teórico

La necesidad de comprender cuáles son los procesos que dan lugar a los distintos tipos de geformas no consolidadas ha ido aumentando con la urbanización, nuevas tecnologías y metodologías adecuadas para estos propósitos. Es posible encontrar trabajos detallados enfocados a la descripción de depósitos cuaternarios desde

principios del siglo XX donde se encuentran, entre otros, las investigaciones enfocadas a la descripción e interpretación de abanicos aluviales.

Si bien, varios trabajos se acercaron a la descripción general de un abanico aluvial, no es hasta 1954 donde Blissenbach se encarga de dar una definición específica que incluye las secciones del abanico aluvial y las condiciones geológicas y climáticas favorables para la formación de este tipo de depósitos. Al igual que lo estudiado por Blissenbach, los trabajos de investigación enfocados en la descripción de fenómenos relativos a abanicos aluviales se centraron en el suroeste de Estados Unidos, en los valles de California (Bull, 1962). Es por esto que los trabajos más importantes se centran en la caracterización de abanicos aluviales desarrollados en climas semiáridos, acotando sus resultados a este dominio climático, aunque generalizando a otros lugares del mundo con características similares (Blair y McPherson, 1994).

Posteriormente, la descripción de factores condicionantes y desencadenantes más importante fue realizada por Bull (1962) primero describiendo las características granulométricas de los abanicos del condado de Fresno en California y luego, describiendo los parámetros geológicos y morfométricos de mayor relevancia en los abanicos aluviales del mismo sector. Dentro de su investigación, el resultado más importante corresponde a la relación directa entre área de abanico y área de cuenca de drenaje respectiva para grupos de abanicos en Fresno. Por medio de regresiones potenciales expresadas logarítmicamente, las constantes empíricas asociadas a cada una de las regresiones permiten asociar áreas distintas a procesos sedimentarios similares, así como también la relevancia de las litologías de origen de los clastos que generan los depósitos.

Los trabajos posteriores de Hooke (1967), Tunbridge (1983), Harvey (2005) y otros, han ayudado a afinar las descripciones de abanicos aluviales así como también determinar las condiciones ambientales bajo las cuales un abanico aluvial es formado y modificado.

## 2.1. Abanicos aluviales

Existen muchas definiciones de lo que se reconoce como un abanico aluvial, donde características como el ángulo de pendiente y la cantidad de agua disponible en su proceso de formación hacen que no exista una definición común. A pesar de esto, es aceptado que un abanico aluvial corresponde a una acumulación de materiales clásticos, en forma conoidal, situada aguas debajo de una ruptura de pendiente y que posiblemente se ha generado como consecuencia de la pérdida de encajamiento del canal principal que alimenta este sistema aluvial (Colombo, 2010).

La formación de un abanico aluvial depende de que se den ciertas condiciones particulares como las expuestas a continuación. Es necesario que exista material sedimentario clástico no consolidado disponible, una reducción de confinamiento del canal principal y una cantidad de agua intermitente y en cantidad tal que pueda transportar los sedimentos. Esta reducción puede darse por un cambio de pendiente, pérdida de profundidad del canal, por el paso del flujo de agua por un sector no canalizado o que la capacidad de caudal sea superada por el cauce. Además de ello, puede existir una pérdida de fuerza de los flujos por infiltración de agua en los sedimentos del mismo depósito.

Para que se den las condiciones de formación de un abanico, los elementos que conforman el depósito aluvial dependen de algunos factores mencionados a continuación. La litología de la cuenca aportante, la gradiente general del terreno, el grado de alteración y competencia de las rocas que componen las cuencas de drenaje, la cobertura vegetal, entre otros, son los que determinan la morfología conoide y el tamaño del abanico en cuestión (Bull, 1964).

Para entender correctamente el depósito de un abanico aluvial sobre un terreno cualquiera se debe estudiar su morfología y como se trata de un depósito dependiente de la circulación de flujos intermitentes con cambio de pendiente, existirá una zonación producto de la pérdida de fuerza del flujo y los clastos se seleccionarán de acuerdo con este fenómeno (Colombo, 2010b).

## **Morfología**

Como ya se ha mencionado, el rasgo morfológico más notable de un abanico aluvial es su forma de “abanico”. Esto se debe, entre otras cosas, a la formación de diversos cauces temporales con distribución radial generada por los cambios de pendiente y relieve que son propios de los procesos asociados a la deposición de sedimentos en estos ambientes. Esta distribución radial de canales abandonados permite observar el fenómeno de manera vectorial, como se puede ver en la Figura 6.

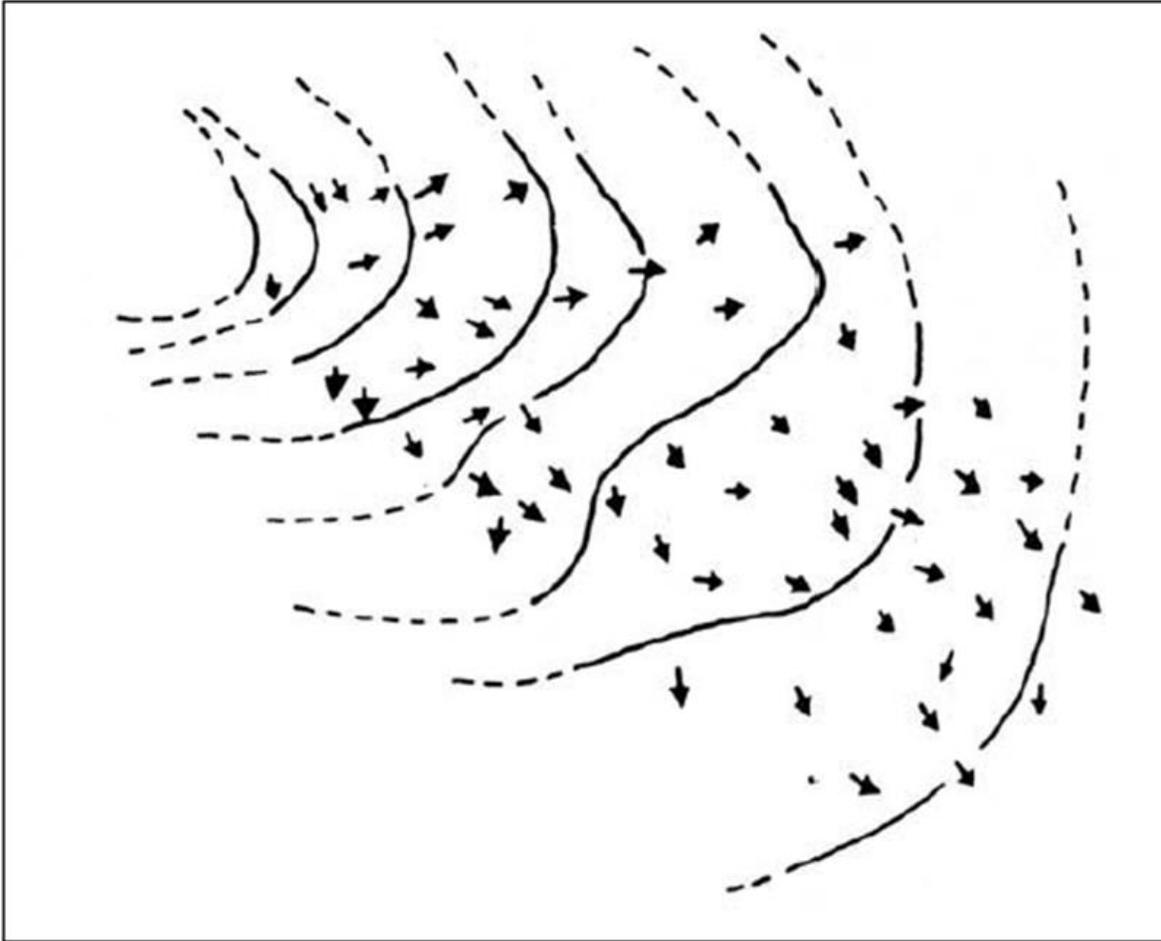


Figura 6: Distribución radial de paleocanales que marcan el paso de flujos en distintas direcciones, fenómeno que aporta significativamente a la morfología del abanico. (Bluck, 1965).

Otra característica morfológica relevante es el tamaño del abanico. Se han realizado diversos estudios en torno a este aspecto (Bull, 1964; Bull, 1977; Hooke, 1968a) a partir de los cuales se han establecido relaciones matemáticas sencillas entre la superficie del abanico aluvial y la superficie de la cuenca de aporte. Esta relación directa permite establecer parámetros de categorización como los que serán utilizados más adelante en la sección de clasificación de abanicos aluviales. De la misma manera, las características litológicas del material sedimentario formador de los abanicos influyen directamente en el tamaño de estos. Abanicos derivados de áreas fuente con una alta proporción de materiales lutíticos, tienen dimensiones que son casi dos veces mayores a otros con fuentes donde dominan las areniscas (Bull, 1964). Litologías menos susceptibles a la erosión formarán depósitos aluviales de clastos más grandes y, por lo tanto, que requieren mayor energía para ser transportados.

Cuando se estudian los perfiles radiales y transversales de los abanicos aluviales, es posible reconocer ciertas características comunes entre ellos. En primer lugar, el

perfil radial de un abanico aluvial de tamaño normal (menor al kilómetro) suele ser cóncavo hacia arriba, con un cambio gradual en la intensidad de la pendiente desde su parte más alta y hasta su base horizontal. Esto es observable en distintos perfiles radiales de abanicos particulares con medidas de altura y distancia desde su ápice, como se ha visto en los trabajos de Bull(1964), Hooke(1967) y otros más recientes estudios de abanicos particulares (Kesel, 1985; Harvey, 2005; Malatesta y Lamb, 2018)(ver Figura 7).

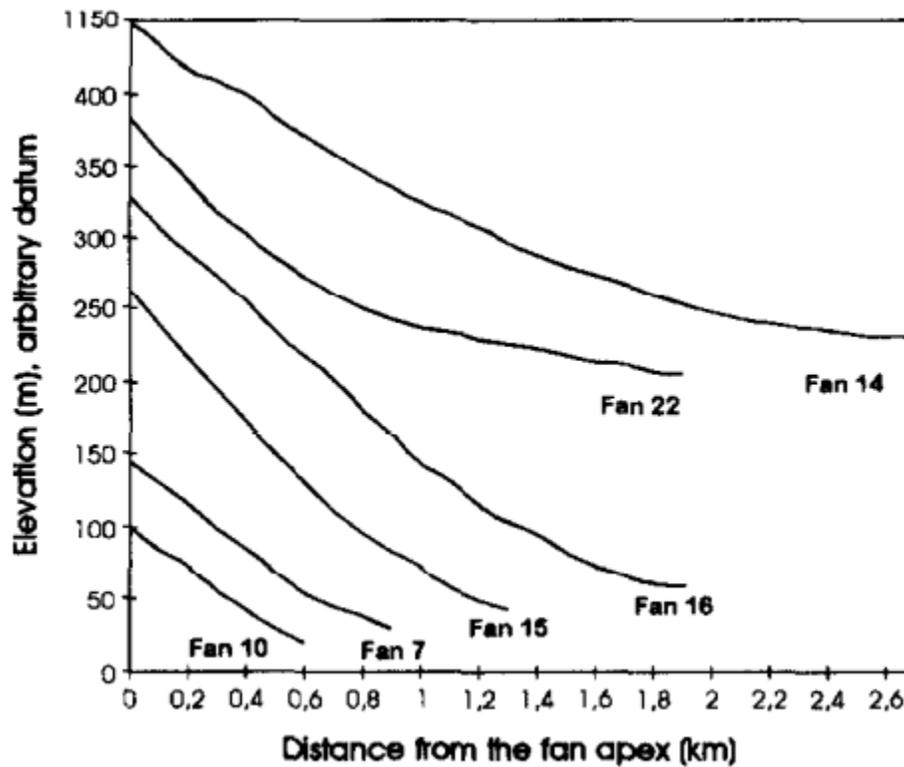


Figura 7: Diferentes perfiles radiales de elevación de abanicos aluviales. (Blissenbach, 1954)

Siendo el abanico típico de carácter cóncavo hacia arriba, existen diferencias entre estos que dependen del ambiente y la cantidad de agua a la que se encuentran expuestos los depósitos. Por un lado, en ambientes áridos existen variaciones de pendientes sutiles con 5 a 10° en las cabeceras y de 1 a 2° en zonas de pie (Ver Figura 8). Por otro lado, en abanicos generados por flujos predominantemente acuosos de ambientes húmedos suelen ser más extensos y con variaciones de pendientes más suaves. Esto es, con gradientes de 3 a 5° en las zonas apicales y menores a 1° en la zona del pie.

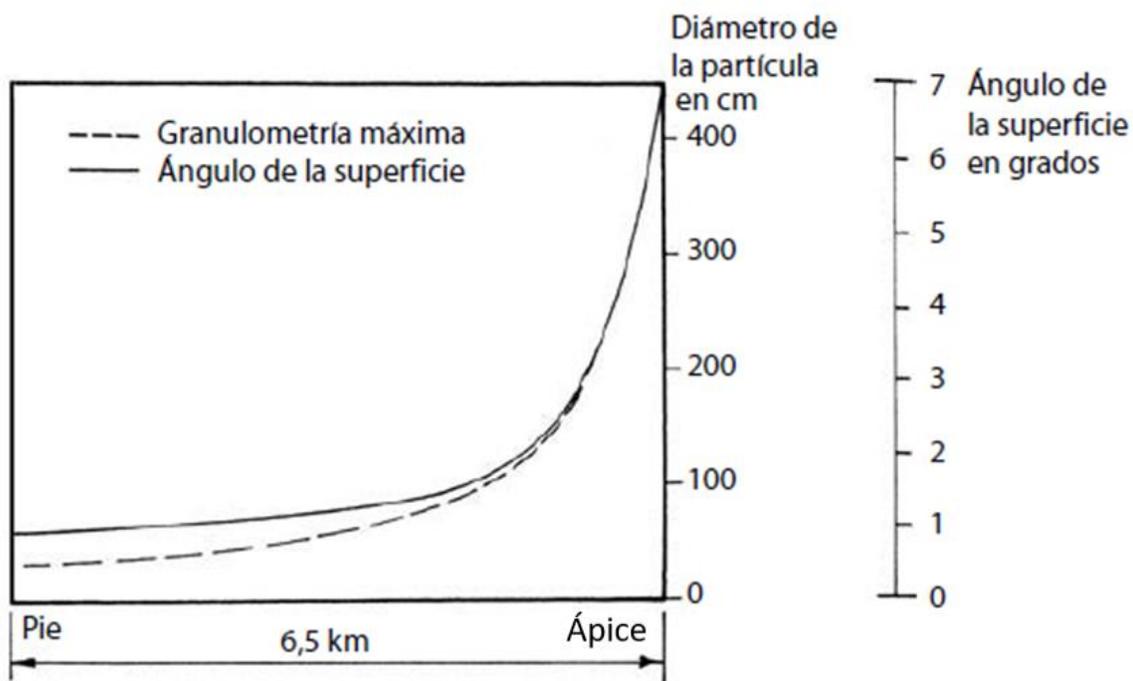


Figura 8: Perfil radial de elevación de abanico aluvial típico con distribución granulométrica general por tramo, con diámetro promedio de partículas. (Colombo, 2010) modificado de (McGowen y Groat, 1971).

El que un abanico aluvial presente un relieve uniforme o de variación frecuente depende de su tamaño, litología y ambiente. Además de lo que ya se ha mencionado, cuando los abanicos son de gran tamaño (decenas y centenas de kilómetros) el relieve tiende a ser uniforme y suavizado. De la misma manera, cuando un abanico aluvial es pequeño, su composición litológica se encuentra restringida a una zona muy concreta y no hay grandes variaciones granulométricas, el perfil radial también resulta suavizado y uniforme. (Viseras y Fernandez, 1995); Calvache *et al*, 1997).

La Figura 8 muestra el cómo varía la granulometría de un abanico aluvial por tramos, lo que hace sentido con la característica mencionada anteriormente donde los abanicos de granulometría más gruesa son más pequeños y empinados, mientras que los de material sedimentario más fino suelen ser más extensos y con gradientes de inclinación menos marcadas (Hooke, 1968a). Dentro de un mismo abanico se pueden observar estas diferencias que tiene que ver con la capacidad de transporte de sedimentos y el cómo se va perdiendo a medida que disminuye la pendiente.

Como se ha dicho, la distribución de facies dentro del mismo abanico se encuentra

determinada por los distintos grados de transporte de sedimento a lo largo de un perfil radial. En la parte más alta se sabe que el canal principal tiene un mayor grado de encajonamiento y profundidad. Esto ocurre hasta cierto punto de intersección donde el cauce del canal principal alcanza la superficie y genera, a partir de este punto intermedio un lóbulo deposicional. Este modelo general se ha establecido a partir del estudio de varios modelos análogos de abanicos, donde la pendiente del canal principal siempre es menor a la del abanico completo, lo que provoca el alcance de superficie por parte del cauce en algún punto (Hooke, 1967). El punto de intersección (ver Figura 9) no es fijo, ya que dependiendo de los procesos de transporte o acumulación de material sedimentario por parte de los flujos este puede desplazarse hacia la cabecera o el pie, dependiendo de cuál sea el proceso dominante (Bull, 1964).

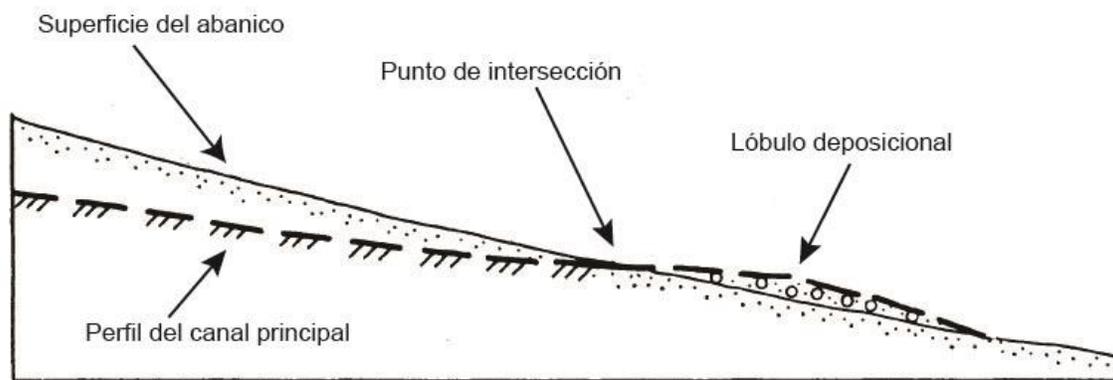


Figura 9: Perfil radial de abanico aluvial con punto de intersección en zona de canal desencajonado. (Hooke, 1967).

En algunos casos, los abanicos aluviales no son cóncavos. Dependiendo de la ubicación del abanico con respecto a frente montañoso, si existe un régimen de alzamiento activo, la deposición sedimentaria cambiará con el tiempo. Si bien se ha hablado de que los perfiles radiales son mayormente “cóncavos”, la verdad es que la superficie de algunos abanicos presenta una segmentación con planos uniformes que disminuyen su pendiente desde las zonas altas y hasta el pie (Hooke, 1968a).

Finalmente, es conveniente mencionar que los abanicos en conjunto dan lugar a otro tipo de segmentación más regional, con zonas de pedimento por retroceso erosivo del frente montañoso y una zona de deposición común donde los abanicos coalescen en sus zonas menos empinadas en lo que se denomina como bajada (Blissenbach, 1954).

## Zonación

En la sección de morfología se ha mencionado que los abanicos presentan zonaciones características con factores que pueden ser identificados en prácticamente todos los ambientes de deposición. Es importante tener en cuenta que cada una de las secciones identificadas en el modelo ideal del abanico aluvial varía dependiendo del ambiente de deposición, aporte de material sedimentario, cantidad de agua y otros. Dicho esto, las observaciones de diversos autores a lo largo del siglo XX (Blissenbach, 1954; Bull, 1964; Colombo, 1989) permiten establecer los siguientes términos comunes, definidos por Colombo (2010):

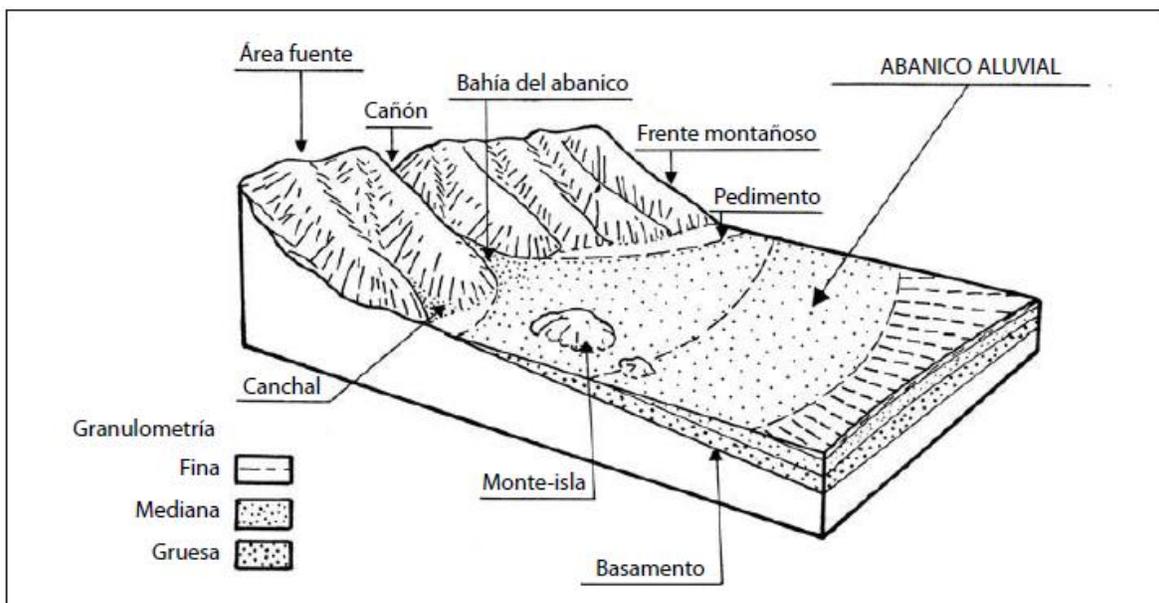


Figura 10: Relaciones geomorfológicas principales en un abanico aluvial. (Colombo, 2010)

1. **Ápice (ápex):** Zona topográficamente más elevada del abanico. Acostumbra a coincidir con la zona de contacto del abanico con el frente montañoso (ver Figura 11).
2. **Cabecera (fanhead):** Parte superior del abanico inmediata al ápice (ver Figura 12).
3. **Bahía de abanico (fan bay):** Corresponde a la zona apical cuando ésta penetra en el frente montañoso (ver Figura 10).
4. **Cañón (canyon):** Cauce principal que, profundamente excavado en el frente montañoso, favorece el transporte de los flujos de sedimentos que formarán el abanico (ver Figura 10).

5. Atrincheramiento del abanico (fanhead entrenchment): Encajamiento del canal principal en la zona apical de abanico (ver Figura 12).
6. Punto de intersección (intersection point): Lugar donde se intersecta la superficie de la cabecera del abanico con el tálveg (vaguada en catalán) del canal principal encajado, que acostumbra a tener un gradiente menor (ver Figura 9).
7. Lóbulo de abanico (fan lobe): Acumulación de materiales de granulometría gruesa en la zona del punto de intersección. Puede constituir un pequeño abanico (suprafan) sobre impuesto al abanico aluvial mayor (ver Figura 9).
8. Pie de abanico (fan toe): Zona topográficamente más baja del abanico que coincide con su base y donde se produce la interrelación con otros sistemas sedimentarios diferentes (ver Figura 11).
9. Segmento de abanico (fan segment): Sector del abanico que se halla limitado por rupturas geomórficas de pendiente (ver Figura 11).
10. Incisión de abanico (fan incision): Encajamiento sobre el abanico de un canal que desemboca fuera de sus límites (ver Figura 12).

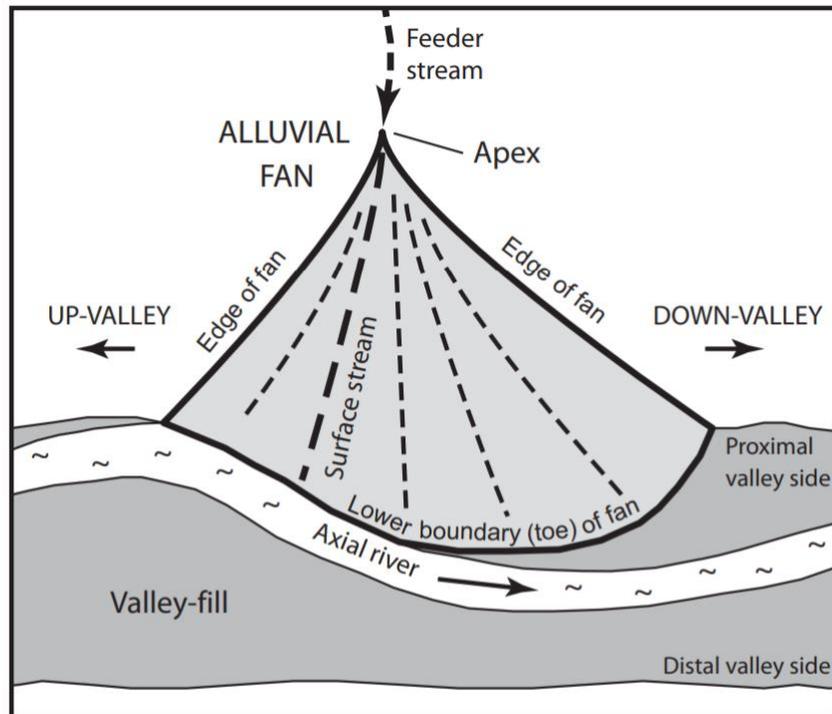


Figura 11: Esquema simplificado de un abanico aluvial (Giles *et al*, 2018)

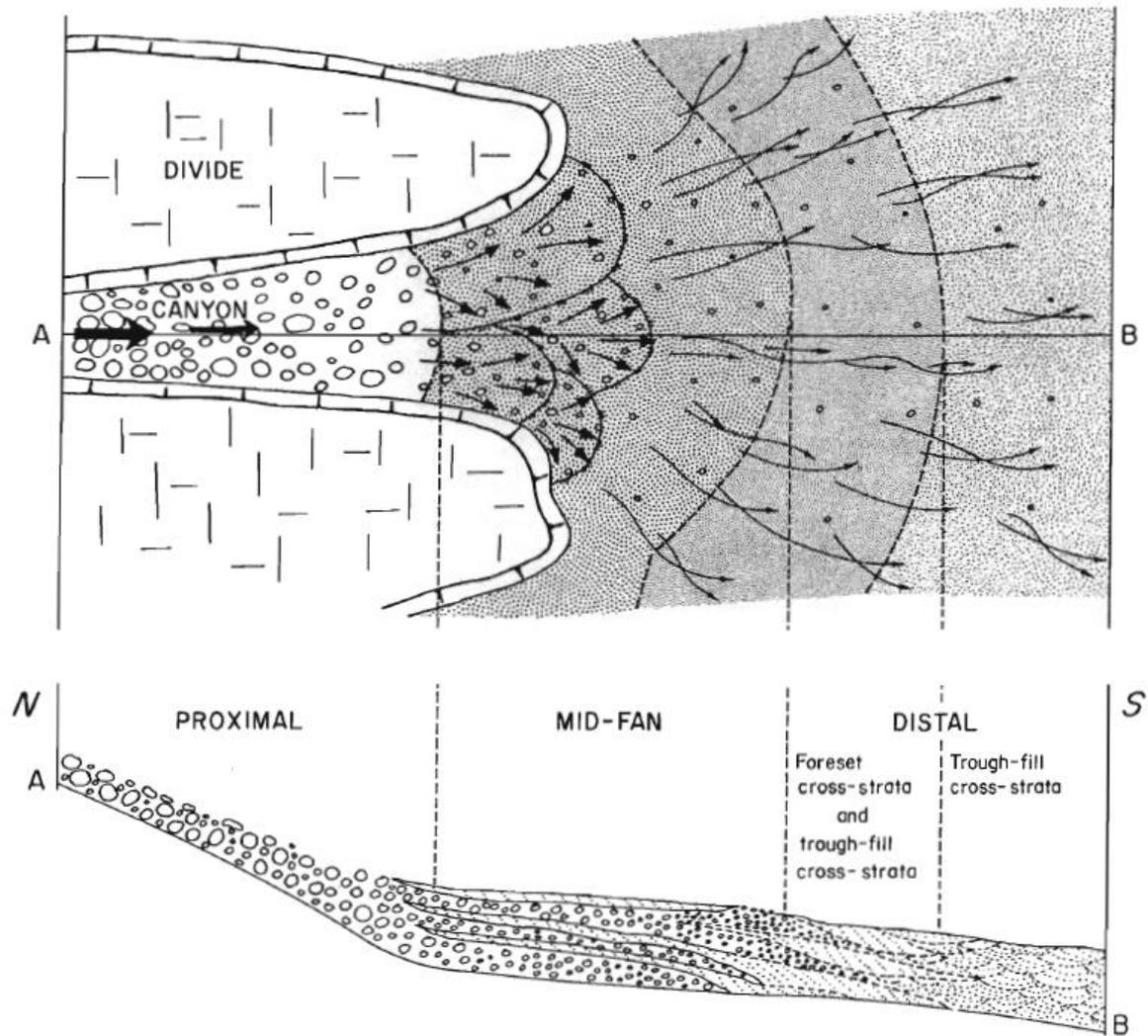


Figura 12: Perfil radial de abanico aluvial típico con zonación respecto al ápice y marcas de granulometría. De izquierda a derecha la granulometría cambia de la siguiente manera: (1) proximal con gravas masivas; (2) mid-fan con estratificación intercalada y cruzada de arena; (3) Distal con estratificación cruzada de areniscas. (McGowen y Groat, 1971)

De la misma manera, existe una clasificación (Figura 12) de acuerdo a los términos acuñados por (Blissenbach, 1954) y que tratan la zonificación de acuerdo al punto de intersección definido previamente. Las zonas en cuestión son:

1. Proximal: es la que presenta los materiales con granulometría más gruesa y que se encuentra inmediata a la cabecera del abanico. Abarca desde el ápice hasta la zona del punto de intersección.

2. Media: presenta materiales de granulometría intermedia y se halla ubicada entre la zona del punto de intersección y el área del pie del abanico.
3. Distal: es la que muestra los materiales de granulometría más fina y se halla situada a partir del pie del abanico hacia las zonas más alejadas. Sus paleocorrientes y sus facies deposicionales se hallan directamente relacionadas a los estadios evolutivos de desarrollo del abanico. Corresponde a la zona en la que los materiales de abanico interactúan con los de otros sistemas deposicionales relacionados.

## **Clasificaciones y ambientes asociados**

Típicamente, los abanicos aluviales se comportan de manera que las secciones de la zonación que se han mencionado previamente son identificables en cada uno de los depósitos. A pesar de ello, esto varía de acuerdo con el tipo de material del que se encuentran compuestos y todos los procesos de transporte de sedimentos asociados a la formación del abanico.

Como se ha mencionado previamente, el tipo de material, la disponibilidad de este y el proceso de formación estarán determinados por el lugar geográfico, su tasa de precipitaciones, flujos de agua y tipo de roca. Cada una de estas variables está correlacionada si se considera que para cada ambiente de formación se dará un contexto particular, con lo que es posible establecer clasificaciones a priori de los distintos tipos de abanicos aluviales de acuerdo con la relación entre sus características geomorfológicas con su ambiente de formación y la eficacia de transporte de sedimentos que ahí se produzca.

A lo largo del siglo XX, los estudios de abanicos aluviales apuntan a distintos tipos de clasificaciones según el autor (Blissenbach, 1954; Bull, 1964; Bluck, 1965; Tunbridge, 1983; Blair y McPherson, 1994; Colombo, 2010), aunque la más general corresponde a la clasificación por ambiente climático. A pesar de que se reconocen características particulares asociadas a ambientes húmedos y áridos (principalmente morfológicas), se ha comprobado que remociones en masa de tipo flujo de detritos pueden darse regularmente en zonas húmedas, de la misma manera que flujos de barro se dan en ambientes de extrema aridez (Blair y McPherson, 1994).

Clasificaciones que pretendan definir el comportamiento de cierto tipo de abanicos en base a dominio climático dependen de muchos factores particulares de cada zona y son susceptibles a cambios, haciendo de cada zona de depósito un ambiente prácticamente único, con similitudes a escala general.

## 2.2. Flujos de detritos

Un flujo de detritos es una masa de agua, fragmentos de roca y sedimentos (entre 50% y 80%) que en su conjunto se comportan como un fluido y circulan corriente abajo por quebradas y cauces antiguos. La alta concentración de sedimentos y material sólido dentro del flujo hace que posea una velocidad estable y una fuerza de arrastre muy intensa, que arrasa con rocas, vegetación y construcciones humanas, siempre controlada por la pendiente y el encajonamiento del cauce que lo contengan (Iverson, 2014).

Se han realizado diversos estudios sobre el comportamiento y evolución de los flujos de detritos. De acuerdo a lo indicado por Iverson (2014), es posible describir la evolución de un flujo cronológicamente de la siguiente manera:

1. La mayoría de los flujos de detritos se originan a partir de áreas discretas donde las pendientes no superan la barrera de los 25 a 30° y se encuentran cubiertas por capas de suelo de baja cohesión y/o roca fragmentada. Estos detritos que se encuentran marginalmente estables poco a poco se comienzan a saturar al entrar en contacto con agua meteórica o subterránea, principalmente por precipitaciones intensas o derretimiento de nieve. De esta manera, cuando la fricción generada por los detritos en el fondo no es capaz de soportar el peso de la masa con alta concentración de sólidos comienza el descenso pendiente abajo, ya sea por canales existentes o cualquier ladera, dependiendo del contexto topográfico.
2. A medida que la masa comienza a descender por la pendiente, los detritos dispersos comienzan a concentrarse, lo que aumenta la presión de poros del agua causando licuefacción y deformación generalizada, lo que se conoce como flujo. Es posible que el flujo de detritos se forme a partir de detritos densamente concentrados, siempre y cuando exista la cantidad de agua suficiente para dilatar los poros entre ellos a medida que comienza el movimiento. Si el resultado del fragmentado de roca es material arcilloso, la dilatación será reemplazada por aglomerado de estos finos.
3. Al descender, parte de la energía cinética de descenso pasa a ser energía cinética caótica que aumenta la colisión entre partículas dentro del fluido. Estos choques inelásticos hacen que el momentum de las partículas pase a los fluidos de poros y exprime el fluido viscoso entre granos. El intercambio de momentum entre fluidos y granos genera un desequilibrio constante en la presión de poros los que mantiene el comportamiento de flujo de la masa de alta concentración.

4. La persistencia de la presión de fluidos de poros que mantiene el comportamiento de fluido de la masa concentrada se debe a una suspensión hidrodinámica sostenida de partículas tamaño lodo ( $<63\mu\text{m}$ ) que incrementa la viscosidad efectiva de la fracción fluida de los detritos. Este aumento de la viscosidad facilita el desplazamiento del flujo de detritos al impedir que la presión de poros fluida se relaje y no exista disipación de energía producto del contacto entre granos más grandes. Detritos que mantienen alta movilidad por algunos minutos generalmente contienen una porción de su peso en partículas tamaño lodo, pero no tantas como para que la resistencia de cizalle del lodo domine el comportamiento del fluido. Si este fuera el caso, la masa concentrada pasaría a ser un flujo de barro, lo que no ocurre normalmente en espacios subaéreos.
5. Los flujos aumentarán en tamaño al integrar material sedimentario, agua y escombros que se encuentren en su camino mientras descienden. Este material incluye el adquirido por la erosión del lecho y el de colapso de los canales, llegando a aumentar hasta 10 veces su volumen antes de comenzar la deposición.
6. Frentes abruptos se forman en la cabeza del flujo de detritos (ver Figura 13). Los bloques grandes (mayores a 10m) y otros escombros de gran tamaño como troncos se movilizan al frente del flujo como resultado de una segregación por tamaño de grano debido a los movimientos internos en el desplazamiento del flujo, pero también es posible integrar bloques de gran tamaño por la erosión del fondo que son retenidos en la cabecera.
7. Los detritos saturados de agua que son arrastrados por este frente de avance se asemejan a hormigón no solidificado o arenas movedizas. De acuerdo a lo descrito por Sharp & Nobles (1953), el frente de avance de un flujo de detritos se comporta como una presa rocosa que se mueve impulsada por los detritos más finos y más fluidos, confinados atrás.
8. El flujo de detritos forma levées en sus costados debido a la separación que existe entre los granos gruesos y la parte fluidizada de los detritos. Normalmente se debe a que el nivel del flujo sobrepasa los límites del canal confinante generando depósitos a los costados a modo de planicies y abanicos aluviales. Finalmente, estos levées “recanalizan” el flujo de detritos, aumentando el alcance de este.

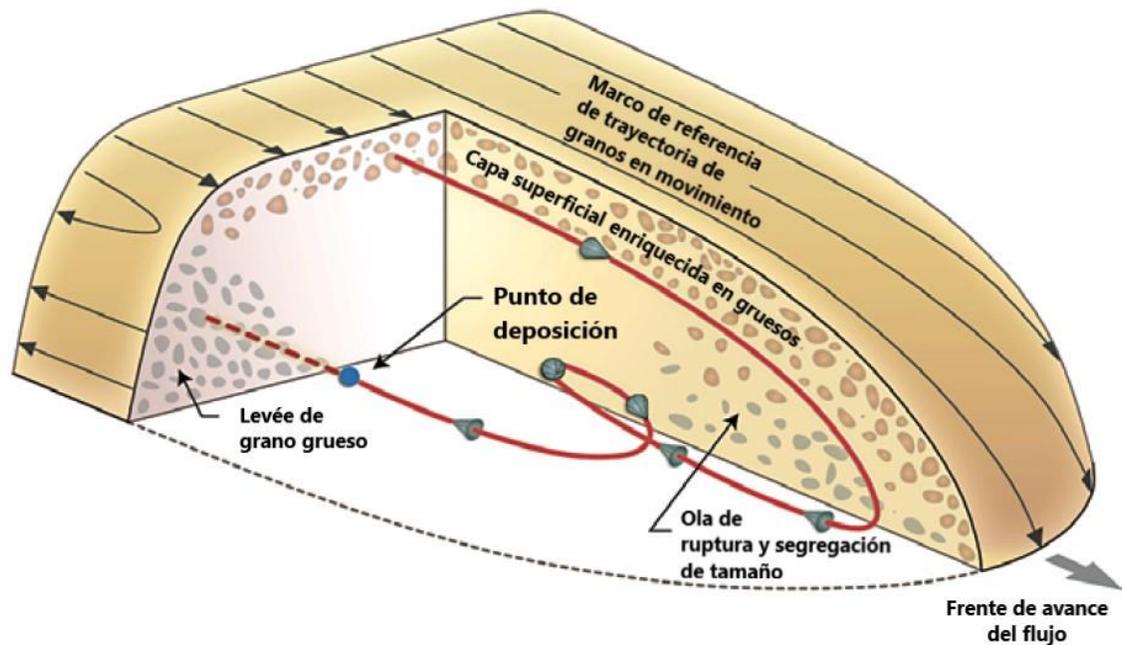


Figura 13: Corte esquemático del frente de un flujo de detritos que muestra la formación de levées laterales de grano grueso tras el frente de avance. El trayecto de un grano superficial representativo se encuentra indicado en rojo. El "Marco de referencia" se mueve hacia adelante a la velocidad de avance del frente de flujo, por lo que un grano superficial que avanza más lentamente que el frente parece moverse hacia atrás. Editado de (Johnson *et al*, 2012)

9. El flujo forma lóbulos deposicionales cuando la resistencia friccional de los frentes y márgenes de flujos de grano grueso es suficiente para detener el movimiento de los detritos fluidizados que se arrastran. Para hacerse una idea de la consistencia de cada una de las secciones del flujo de detritos, una vez que existe el lóbulo deposicional, el cuerpo de un depósito de flujo de detritos fresco generalmente es muy débil para resistir el peso de una persona que pase caminando. Por otro lado, los levées de grano grueso y los márgenes distales de depósitos frescos entregan mayor seguridad al ser pisados.
10. Cuando la pendiente disminuye a tal punto que favorece el emplazamiento, el flujo de detritos se comienza a secar gradualmente y se consolida hasta un punto que permite la circulación a pie por sobre el depósito. A medida que se sigue desecando se vuelve más rígido, en un proceso que puede durar varios días y hasta meses.
11. Reconocer un depósito de flujo de detritos reciente es un ejercicio que no debería ser complejo por las características superficiales de estos, con lóbulos de detritos, bloques y escombros acompañados de material fino

semiconsolidado (ver Figura 14). En el caso de los flujos más antiguos el proceso es más complicado, ya que requiere de un análisis estratigráfico con el reconocimiento de los levées de gravas y bloques, mientras las otras partes del abanico deben presentar gravas y bloques matriz soportadas o de sedimento predominantemente fino.



Figura 14: Depósito de flujo de detritos con alta concentración de bloques en Lagos Arrow, Columbia Británica, Canadá. Fotografía de P. Jordan (Geertsema *et al*, 2002).

### 2.3. Factores determinantes en la modificación de depósitos aluviales

Para este estudio, es importante considerar los factores que generan flujos de detritos, ya que la sucesión y solapamiento de estos flujos da lugar a un abanico aluvial. De la misma manera, entender cuáles son los factores asociados al ambiente donde ya existen depósitos de este tipo es relevante para resolver si estos

factores pueden generar un nuevo evento de remoción en masa en el mismo lugar donde se identificó un depósito aluvial con morfología de abanico.

### 2.3.1. Clima

El clima es uno de los factores más importantes a la hora de determinar el grado de meteorización de una roca o un suelo (Weinert, 1965). Si bien, muchas veces se parte desde una roca fracturada por procesos tectónicos, el efecto constante del clima a través de las precipitaciones, exposición al sol en sectores de aridez elevada, circulación de fluidos de alto caudal producto de cambios bruscos en la temperatura favorecen el fracturamiento y meteorización a pequeña y gran escala en rocas.

De la misma manera, los flujos de alto caudal que aparecen repentinamente sobre un sector favorecen la pérdida de estabilidad de depósitos no consolidados y transportan estos sedimentos (Blissenbach, 1954). Más específicamente, climas de mayor humedad y mayor temperatura favorecen el fracturamiento de rocas (Eppes y Keanini, 2017), mientras que climas de bajas temperaturas favorecerán erosión por cuerpos de hielo y liberación repentina de sedimentos y agua por fin de represamiento estacional (Tunbridge, 1983).

### 2.3.2. Alteraciones de roca

Cada depósito se encuentra conformado por distintos tipos de rocas dependiendo del contexto geológico y de las cuencas de aporte. Cada roca con su composición mineralógica será más o menos susceptible a alteraciones y meteorización dependiendo de cuál sea el caso (ver Tabla 1). El grado de alteración química y fracturamiento previo determinará el tipo de transporte del sedimento y la cantidad de agua y pendiente necesaria para que ocurra un desprendimiento (Harvey, 1987).

Tabla 1: Meteorización de rocas por diferentes factores y grados. Modificado de e-Learning program de Freie Universität Berlin, (2019).

<b>Factores que controlan el grado de meteorización</b>			
	Rápida	 Tasa de meteorización	Lenta
<b>Tipo de roca caja</b>			
Solubilidad de mineral en agua	Baja (ej. Cuarzo)	Moderada (ej. Feldespato)	Alta (ej. Calcita)
Estructura de roca	Masiva	Algunas zonas de debilidad	Muy fracturada y de laminación
<b>Clima</b>			
Caida de lluvia	Baja	Moderada	Alta
Temperatura	Frío	Temperado	Cálido
<b>Suelo y contenido orgánico</b>			
Grosor de la capa de suelo	Roca no limpia	Delgada a moderada	Gruesa
Contenido orgánico	Bajo	Moderado	Alto
<b>Tiempo de exposición</b>			
	Corto	Moderado	Largo
<b>Topografía</b>			
	Pendiente fuerte	Moderada	Pendiente suave

### 2.3.3. Eventos particulares

Debe entenderse por evento particular a todo evento que cambie de manera drástica el régimen típico de un sector en cuanto a su topografía y nivel de precipitaciones. De esta manera, los procesos tectónicos que alteran la superficie generando cambios en las pendientes favorecen el desplazamiento de fluidos de alta viscosidad, mientras que el aporte de aguas en gran cantidad en lugares donde normalmente son escasas otorga un potencial de transporte capaz de mover una gran cantidad de sedimento (Campbell, 1975) y generar depósitos tan potentes como los observados en algunos casos en abanicos aluviales.

### 2.3.4. Topografía

Como se ha dicho en otras ocasiones, el quiebre topográfico es uno de los factores más determinantes en la formación de un abanico aluvial. Junto con esto, las características del quiebre y la intensidad del cambio de la pendiente controlan otras variables de depósito.

El perfil topográfico de un sector es relevante en los fenómenos erosivos gravitacionales sobre rocas. En sectores de alta pendiente ( $>10^\circ$ ) los sedimentos

serán transportados gravitacionalmente en mayor medida que en otros sectores de pendientes más suaves y menos marcadas. En los sectores donde las pendientes no sean más pronunciadas naturalmente ( $<10^\circ$ ), la cantidad de agua en los flujos será más relevante para el transporte de sedimentos. Se considera, en este caso que pendientes entre  $5^\circ$  y  $10^\circ$  serán dominadas por transporte de corrientes acuosas, pendientes entre  $10^\circ$  y  $15^\circ$  presentarán transporte mixto por corrientes acuosas y procesos gravitacionales, mientras que pendientes sobre  $15^\circ$  presentarán transporte predominantemente gravitacional.

### 3. Metodología para la caracterización de abanicos aluviales

#### 3.1. Medición de datos morfométricos

Para reconocer y delimitar los abanicos aluviales, es necesario encontrar depósitos aluviales adyacentes a un quiebre topográfico de la manera que se especifica en la sección 2.1.

Dicho esto, los depósitos que son considerados como parte de este estudio se delimitan a partir de las observaciones de imágenes satelitales y sus características topográficas a partir de mapas de elevación digital (DEM) trabajados con el software ArcGis.

El software Google Earth permite realizar una observación general y rápida de todas las zonas de estudio ya que cuenta con imágenes de fechas recientes de la superficie terrestre. Además, la posibilidad de observar imágenes de los sectores de estudio a través de los años permite evaluar la evolución de los distintos tipos de ambientes.

El uso de imágenes satelitales Landsat (European Space Agency, 2018) y software que permitan realizar observaciones remotas de la zona de estudio son el recurso más importante ya que, para poder establecer las mediciones y observaciones generales en la definición y selección de ambientes geológicos solo se contará con este tipo de apoyo visual, complementado con los trabajos y bibliografía asociada.

A través de los modelos de elevación digital del satélite ALOS con sensor PALSAR (Phased Array Type L-band Synthetic Aperture Radar) obtenidos desde la plataforma virtual de Alaska Satellite Facility (Alaska Satellite Facility, 2018), el software ArcGis permite la delimitación de morfologías terrestres con bastante precisión. El uso de

esta herramienta permite determinar los tamaños y pendientes de los depósitos sedimentarios, lo que es la base del estudio.

El estudio de imágenes satelitales individuales permite contrastar lo observado previamente a través de ArcGis y Google Earth para redefinir los límites de geoformas recientes, las que son más susceptibles a cambios por efectos climáticos o alteraciones antropogénicas. Preferentemente, las imágenes de mayor resolución y las más usadas corresponden a las obtenidas de los proyectos Sentinel y Landsat (Alaska Satellite Facility, 2018; European Space Agency, 2018).

Para delimitar correctamente un abanico aluvial, las morfologías reconocibles se sometieron a una serie de criterios de selección de primer orden, que posteriormente serán filtrados para evaluar cuáles de los depósitos seleccionados son reflejo real de las condiciones de transporte de sedimentos asociados a cada zona de estudio.

Los criterios mencionados son:

- **Morfología adyacente a un quiebre de pendiente:** Es necesario que los depósitos estudiados se encuentran adyacentes a un quiebre de pendiente, típicamente caracterizado por la ladera de un frente montañoso o la ladera de un valle fluvial, dependiendo de cuál es la zona de estudio específica. Se entiende a partir de la definición de abanico aluvial (que será retomada posteriormente) que el ápice o punto de origen del abanico se ubica en la intersección del depósito y el frente montañoso.
- **Morfología de abanico:** Se considera como abanico aluvial a todos los depósitos que, dada la ubicación mencionada previamente, posean morfología conoidal, con un ensanchamiento paulatino desde el ápice hasta el fin del depósito (Bull, 1964). Este depósito aluvial debe ser, al menos en parte, semicircular con inicio y un fin distinguible.
- **Depósitos en pendiente:** Es una condición necesaria para el estudio de abanicos aluviales que el depósito se encuentre en pendiente, característica por encontrarse ubicado sobre la ladera del frente montañoso. La pendiente del depósito, en su perfil topográfico, debe ser de empinada a suave (desde pendientes en torno a los 10° y superiores hasta menores a 5° en la base), disminuyendo progresivamente desde el ápice hasta su fin. Es por esto que la condición general de pendiente de los abanicos aluviales es una superficie cóncava producto de la disminución progresiva de ángulo de inclinación.

- Canal principal desde cuenca de drenaje: Los depósitos sedimentarios considerados para este estudio poseen un canal principal de aporte de sedimentos que proviene de la cuenca de drenaje relativa a este depósito.

### 3.2. Selección de sitios

Para la selección de zonas de interés, en esta investigación se seleccionaron sectores con alta concentración de abanicos aluviales. Este tipo de zonas se pueden encontrar a lo largo de todo el país, particularmente en las áreas con quiebres de pendiente identificables a simple vista en las imágenes satelitales y a través del trabajo de mapas de elevación digital (DEM). Con esto, es posible identificar grupos de abanicos aluviales en zonas costeras, valles interiores y en la precordillera andina.

Para depurar la selección, se tomaron aquellas zonas con abanicos predominantemente detríticos, lo que en la observación de imágenes satelitales se traduce en depósitos aluviales regulares, con una relación largo/ancho que no superara el valor 1.5 y de tamaño similar entre ellos. Estos criterios permiten descartar aquellos abanicos depositados en regímenes más húmedos, como los observados en la zona precordillerana de Paipote, así como también los abanicos de gran tamaño de las pampas de Tarapacá, que además son generados por procesos mixtos.

### 3.3. Criterios de caracterización

Los estudios de abanicos aluviales en Chile siempre se han realizado para abanicos particulares y es difícil encontrar un estudio acabado que permita establecer una relación con el ambiente y factores gatillantes de formación de abanicos y de posteriores flujos de detritos. Diversos autores (Blissenbach, 1954; Hooke, 1968a; Bull, 1977; Harvey, 1987) han determinado que es posible reducir el análisis a algunos factores relevantes, que serán descritos a continuación y posteriormente relacionados a partir de regresiones matemáticas establecidas en los estudios de los autores mencionados previamente.

## Tamaño del Abanico

Los abanicos aluviales pueden presentar un tamaño muy variado. Se han visto depósitos con morfología de abanicos en muestras centimétricas de modelos análogos hasta otros kilométricos en sectores con precipitaciones ocasionales potentes y aporte sedimentario continuo (como los que se ven en Tarapacá).

El tamaño de los abanicos aluviales será definido considerando el largo desde la apertura del canal principal, el ancho del abanico en su sección más ancha y el área del polígono que marca el abanico geológico. De acuerdo a los estudios de Bull (1962) y Hooke (1968) es posible establecer una relación entre el área de la cuenca de drenaje y el área del abanico. Esta es:

$$Aa = c * Ac^n$$

Donde  $Aa$  es el área del abanico,  $Ac$  es el área de la cuenca de drenaje,  $c$  y  $n$  constantes empíricas. Los valores de la constante  $a$  son más o menos estables, oscilando entre 0,7 y 1,1. Por otro lado, los valores de  $c$  muestran una variación bastante amplia, de entre 0,1 y 2,1 dependiendo de las litologías y la zona de depósito de los sedimentos (Harvey, 2005). Estos valores, aunque variables, permiten observar que existe una relación de proporcionalidad directa entre el tamaño del abanico y el tamaño de la cuenca. Esta observación será detallada más adelante en el estudio. El valor de  $c$  también considera en parte los casos que no siguen la tendencia. Por ejemplo, un abanico pequeño (<500m de largo) alimentado por una cuenca grande (de escala kilométrica), tendrá un valor  $c$  más cercano a la cota inferior, mientras que un abanico mayor alimentado por una cuenca pequeña tendrá valores de  $c$  más cercanos a la cota superior.

A pesar de que muchos casos límites son considerados, aquellos abanicos que se depositan en valles estrechos y no tienen áreas deposicionales lo suficientemente amplias no se han descrito específicamente en la bibliografía.

## Pendiente

Las pendientes de las laderas y zonas de depósito juegan un papel fundamental en la morfología y tamaño de un abanico aluvial. De la misma manera, distintos ambientes geológicos y climáticos permitirán la formación de zonas topográficamente distintas. Como se ha mencionado previamente, se ha visto que,

en los sectores de valles transversales de la tercera y cuarta región, los valles son más encajonados y los abanicos son de pendientes más pronunciadas (sobre 10°).

Por otro lado, en los sectores altiplánicos del Norte Grande de Chile y a pesar de los grandes tamaños, los abanicos no muestran pendientes muy pronunciadas (5-10°). Distinto es el caso de los abanicos formados en los sectores costeros del norte donde las zonas de depósito son escasas y muy cercanas al farellón costero, con abanicos cortos y pendientes muy marcadas. De acuerdo a los estudios de Bull (1977) y Hooke (1967) es posible establecer una relación matemática morfométrica entre la pendiente y el área de la cuenca de drenaje de la siguiente manera:

$$Pa = a * Ac^b$$

Donde Pa es la pendiente del abanico, Ac el área de la cuenca de drenaje, a y b constantes empíricas.

A diferencia del parámetro anterior, en este caso las constantes empíricas varían entre intervalos diferentes. La constante b varía entre -0,15 y -0,35, mientras que la constante a varía entre 0,03 y 0,17 (Harvey, 1987). Esta relación es menos precisa que la de áreas abanico/cuenca, pero resulta ser igual de relevante al establecer una proporcionalidad inversa. En otras palabras, mientras mayor sea la pendiente del abanico, menor será el área de la cuenca y viceversa.

#### Tamaño de Cuenca Aportante

Se ha visto que el tamaño de la cuenca aportante tiene una relación directa con el tamaño del abanico aluvial (Bull, 1977) y la delimitación y medición de los parámetros asociados a la cuenca o sector de proveniencia de los sedimentos que componen el abanico permitiría caracterizar la relación de tipos de cuenca y tamaño final de abanicos, al menos con un grado considerable de compatibilidad. De acuerdo a los estudios mencionados previamente, una cuenca aportante de mayor tamaño implicaría la formación de un abanico aluvial de mayor tamaño (ver Figura 15), dado que la disponibilidad de sedimentos implica un mayor transporte de los mismos, asumiendo una tasa de precipitaciones regular en toda la cuenca (Hooke, 1968a).

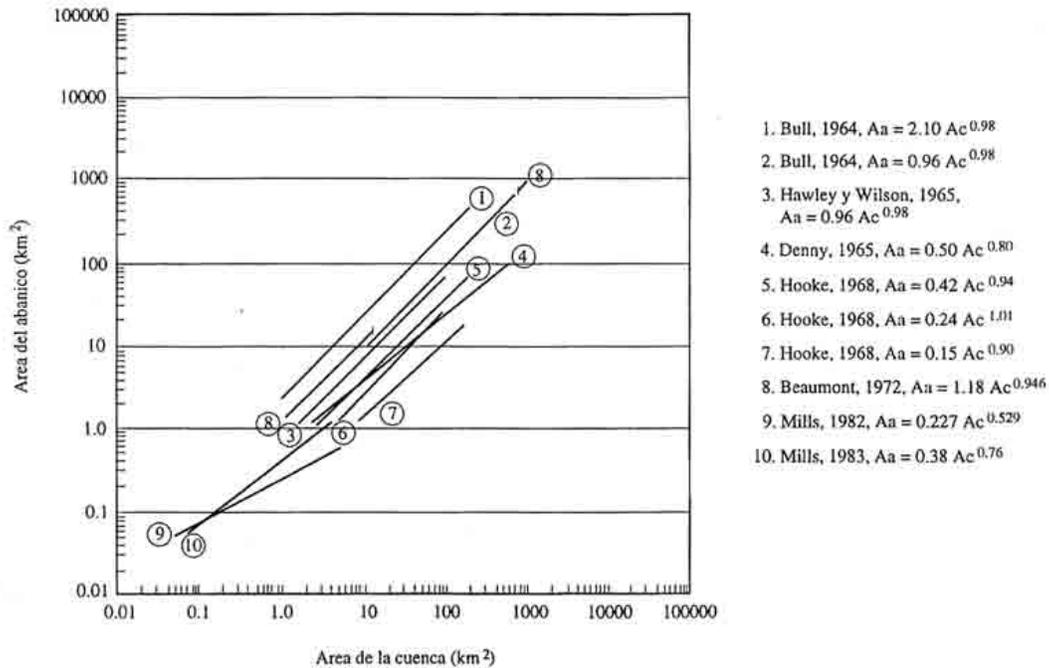


Figura 15: Relación de área de abanicos y área de cuencas para distintos ambientes. (Bull, 1977; Kesel, 1985). Diagrama de Gómez (1989)

## Litología y granulometría de Clastos

La litología tiene un efecto importante en la formación y alteración de los abanicos aluviales, partiendo por la competencia de las rocas que conforman el depósito aluvial. Litologías menos competentes o más alteradas favorecerán las fracturas de roca y la formación de material más fino, lo que aumenta la viscosidad de un flujo sin requerir un gran caudal para generar transporte. Flujos con sedimentos más gruesos generarán abanicos más empinados (Hooke, 1967). Por otro lado, los abanicos que se generan por sedimentos erodados por corrientes fluviales pueden ser afectados posteriormente por las mismas corrientes, lo que disminuye las pendientes promedio con el tiempo.

Para efecto de los modelos morfométricos en los que se respalda este estudio, las características litológicas de las cuencas de aporte y de los sedimentos transportados sí se verían afectados, particularmente en los valores de las constantes empíricas y el cuanto variarían. Si los sedimentos transportados corresponden a litologías menos resistentes a erosión (lutitas), los abanicos serán de áreas más grandes que otros de litologías más resistentes (areniscas o cuacitas en casos más extremos). Se justifica en este caso que para cuencas de drenaje de gran tamaño que generan abanicos aluviales más bien acotados, el factor litológico

influirá en los parámetros morfométricos y, por lo tanto, en las constantes empíricas de las regresiones (Bull, 1977).

A pesar de esto, el presente estudio considera abanicos aluviales de composición detrítica y, por lo tanto, de comportamiento genético similar. El factor de litología no tendrá mayor incidencia en una primera instancia. Conforme se avance en la investigación, la variable litológica será de utilidad para la clasificación de abanicos y la determinación de índices de erodabilidad para aquellos casos donde sea relevante.

#### Características adicionales

Debe entenderse por características particulares al entorno único que represente cada uno de los ambientes de depósito y que deben ser identificadas para cada caso. Desde la presencia de una litología distinta a la dominante en una región hasta un evento tectónico de gran envergadura que pueda generar cambios a corto plazo. La presencia de variantes climáticas intensas también es considerada en este punto.

#### 3.4. Criterios para la selección de abanicos representativos de cada zona de estudio

Las imágenes satelitales utilizadas para realizar las mediciones correspondientes se obtuvieron del sitio del United States Geology Service (USGS), desde su herramienta EarthExplorer que permite obtener imágenes DEM en formato .tif con celdas de precisión de 30 metros. También, para los modelos de relieve se utilizaron imágenes satelitales del satélite ALOS PALSAR (Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar), obtenidas en el sitio Alaska Satellite Facility de NASA (Alaska Satellite Facility, 2018).

Para la selección de los abanicos más representativos, los abanicos seleccionados deben ser representativos de las condiciones de depósito de la zona a la que pertenecen. El objetivo de seleccionar un abanico particular en lugar de tomar cualquiera es que se elimine la posibilidad de que condiciones muy particulares entreguen información confusa y que altere la normalización del estudio. Cada abanico seleccionado será comparado con los contiguos y cada variable distinta será evaluada para ver si es o no descartable en cada caso.

Para el trabajo de cada una de las zonas estudiadas en esta investigación se hizo la distinción de “Abanicos Seleccionados” y “Abanicos No Seleccionados”. El proceso de selección que se ha establecido se describe de la siguiente manera:

#### 3.4.1. Criterio 1: Depósito aluvial con morfología de abanico.

Para este estudio serán considerados como elementos a estudiar todos aquellos depósitos aluviales con morfología de abanico. Debe entenderse por depósito aluvial lo mencionado en la sección de marco geológico. En palabras sencillas, un abanico aluvial será todo depósito sedimentario ubicado en un quiebre topográfico como frente montañoso, escarpe o ladera de valle con morfología de abanico total o parcial. Adicionalmente, para acotar y comparar apropiadamente los abanicos de distintas regiones, serán considerados únicamente aquellos que, a partir de las imágenes satelitales, sean identificados como principalmente detríticos.

#### 3.4.2. Criterio 2: Abanico aluvial conservado

Una vez que se han seleccionado los abanicos aluviales de cada una de las zonas de estudio, serán clasificados como “Abanicos No Seleccionados” todos aquellos que, a partir de las imágenes satelitales, presenten zonas con erosión significativa que indique el desprendimiento parcial o total de alguna sección del abanico. Este criterio se establece a partir de las relaciones morfométricas de Bull (1964) que enlazan el área del depósito con el área de la cuenca aportante, por lo que la ausencia de una sección de los abanicos puede generar una incongruencia con su tamaño actual y el de la cuenca aportante. El grado de erosión tolerable para este criterio de selección es relativo, pero en general se considera que un abanico aluvial conservado al menos en un 80% es seleccionable.

#### 3.4.3. Criterio 3: Abanico aluvial no intervenido

Para aquellos abanicos que se mantengan conservados, todos aquellos que se encuentren intervenidos por obra humana, ya sea a través de desarrollo agrícola o construcciones urbanas, serán clasificados como “Abanicos No Seleccionados”. Este criterio se establece para descartar todos los depósitos que, a pesar de conservar su morfología de abanico, no conservan sus características superficiales debido a los requerimientos civiles. En otras palabras, los abanicos que se encuentran intervenidos por obra humana son alterados y no conservan los flujos más recientes, por lo que su estudio en términos morfométricos arroja resultados alterados. Al igual que en el caso anterior, la tolerancia de este criterio de selección es relativa, pero en general un abanico que no esté intervenido en más de un 20% de su área total es seleccionable.

A partir de este punto, cuando en las secciones siguientes se hable de “abanicos seleccionados” se debe entender que los abanicos en cuestión cumplen con los tres criterios de selección, mientras que los “abanicos no seleccionados” no cumplen con las condiciones 2 o 3, de manera excluyente o simultánea. Aquellos depósitos que no cumplen con el criterio 1 de selección no serán medidos en este estudio y, por lo tanto, no serán considerados en las discusiones o conclusiones.

### 3.5. Caracterización de abanicos aluviales

#### 3.5.1. Medición de parámetros morfométricos

Para esta investigación, los datos de mayor relevancia son los parámetros morfométricos de abanicos aluviales. Entre ellos se encuentran áreas, pendientes y medidas de largo y ancho que se obtienen a través del software ArcGis.

Una vez que se seleccionan y delimitan las zonas de estudio, se procede a superponer las imágenes satelitales entregadas por el mapa base del software con mapas de elevación digital (DEM). Estos mapas que asignan un valor de altura para cada pixel de la imagen permiten desarrollar curvas de nivel y correlacionar los valores individuales para obtener pendientes y puntos de acumulación.

Cada uno de los elementos para el estudio de abanicos aluviales utilizados en esta investigación obtienen de la siguiente manera:

- Largo abanico: Utilizando la herramienta de medida de ArcMap, el largo de un abanico corresponde a la recta que se traza desde la cabeza hasta el pie (fin) del abanico, alcanzando medidas calculadas en metros.
- Ancho de abanico: De la misma manera que el largo, el ancho del abanico se calcula con la herramienta de medida trazando una recta entre los límites del sector de mayor extensión lateral, perpendicular a la recta que determina el largo del abanico.
- Pendiente de abanico: Para el cálculo de la pendiente es necesario utilizar los valores de elevación entregados por el DEM y la herramienta “3D Analyst”. Esta herramienta permite determinar, entre otras cosas, el perfil de elevación de una recta trazada en función de los valores de altura asignados a cada pixel por el DEM. De esta manera, con los datos de altura máxima y altura mínima, en un ejercicio de trigonometría básica se calcula la pendiente promedio, pendiente de abanico para esta investigación calculada en grados.

- Distancia desde el ápice: Se entiende por ápice de un abanico aluvial al punto de quiebre de pendiente que genera un cambio en las condiciones de descenso de sedimentos aluviales. Comúnmente se asocia al contacto entre el depósito de abanico y el frente montañoso, aunque para algunos casos particulares y debido al atrincheramiento del canal de transporte de sedimentos, la cabecera del abanico se ubica a cierta distancia del ápice. En este estudio, la “distancia desde el ápice” corresponde a la distancia que hay entre el ápice y la cabecera del abanico, calculada en metros.
- Área de abanico: Dadas las condiciones de distancia entregadas por el mapa base de ArcGis y el cuadrante de trabajo seleccionado, por medio de una herramienta de cálculo de geometría es posible asociar un valor de área para un polígono de un shapefile. El polígono que encierra el abanico aluvial al que se desea calcular área se determina por medio de fotointerpretación de imágenes satelitales y curvas de nivel obtenidas del DEM. Este parámetro es medido en kilómetros cuadrados.
- Largo de cuenca aportante: Para el trazado del polígono que encierra la cuenca aportante de cada abanico, se utilizó un procedimiento que será detallado en el siguiente punto de esta sección. Una vez que se ha creado dicho polígono, el largo de cuenca aportante corresponde a la recta que va desde el punto de mayor elevación de la cuenca hasta el ápice del abanico aluvial. Esta recta puede variar dependiendo de cuán posible es trazar una recta entre los dos puntos previamente mencionados sin pasar por fuera del polígono que delimita la cuenca. Para aquellos casos se ha determinado que una forma correcta de medir el largo de la cuenca aportante es trazar más de una recta de manera que la línea entre los dos puntos atravesase la cuenca aportante por el centro y sin cortar los bordes. Esta distancia se encuentra medida en metros.
- Ancho de cuenca aportante: Debido a lo variable del ancho de las cuencas aportantes en función de su pendiente, se ha determinado que el ancho de la cuenca aportante asociada a cada abanico corresponde a la medida en metros de una recta perpendicular a la línea que determina el largo y que se ubica aproximadamente en el punto medio de la cuenca. Para cada caso se tiene especial cuidado de que el ancho de cuenca seleccionado sea el más representativo de la cuenca completa.
- Área de cuenca aportante: Por medio del procedimiento de delimitación de las cuencas aportantes de cada abanico aluvial, el polígono resultante de proceso entrega una tabla de datos que cuenta con algunos valores geométricos importantes. Entre estos se encuentra el área de la cuenca aportante, que se recopila en kilómetros cuadrados.
- Diferencia de altura de cuenca aportante: Por medio del mismo procedimiento para determinar la pendiente de los abanicos aluviales, la

herramienta “3D Analyst” permite determinar la diferencia de altura entre el punto de altura máxima de la cuenca y el ápice del abanico correspondiente. Este se mide en metros.

- Pendiente de cuenca aportante: Con los valores de diferencia de altura y largo de la cuenca aportante es posible determinar la pendiente en grados a través de un cálculo trigonométrico simple.

### 3.5.2. Procedimiento para la delimitación de cuencas aportantes

Los sedimentos de cada depósito aluvial se encuentran asociados al transporte y depósito de rocas y material fino que proviene de las cuencas de aporte. Estas cuencas varían en tamaño para cada uno de los abanicos y debido a lo irregular en la topografía de las laderas, delimitar con polígonos los bordes de estas cuencas resulta complejo si no se utilizan herramientas computacionales que separen correctamente una cuenca de otra y cuál de estas aporta sedimentos a cada depósito aluvial.

Para la delimitación de cuencas de aporte se ha utilizado el set de herramientas Spatial Analyst de ArcGis, que permite modelar espacialmente rasters (DEMs, por ejemplo) para datos de celdas. Particularmente, se han utilizado las herramientas de Hidrología de este set, que permiten modelar los flujos de agua en superficie. En este caso, los flujos aluviales para determinar a partir de qué puntos comienza el transporte de sedimentos hacia el depósito. Dicho esto, para cada cuenca se realizó el siguiente procedimiento.

#### 1. Delimitar zona de influencia de cuenca

Dado que las herramientas de modelamiento en superficie requieren la utilización de un ráster con datos de altura, en primer lugar, es necesario crear un shapefile para trazar un polígono que permita recortar el ráster de superficie que será usado. Una vez que se tiene el polígono que marca la zona de influencia de la cuenca a estudiar se utiliza la herramienta “Clip” de Data Management. Con esto, el ráster que se utilizará para delimitar la cuenca será más fácil de trabajar y evitará el arrojado de resultados no deseados.

#### 2. Ajuste del ráster para rellenar celdas sin datos

Para la toma de datos en esta investigación se utilizaron mapas de elevación digital (DEM) obtenidos del satélite ALOS con un sensor PALSAR (Phased Array Type L-band Synthetic Aperture Radar). Los mapas trabajados cuentan con una resolución espacial de imagen de 12,5 metros por celda y resolución vertical métrica, lo que se considera como bastante preciso, especialmente para mediciones que pueden llegar a ser kilométricas. Sin embargo, si se estudia en detalle, especialmente para determinar correlaciones de altura entre celdas, en algunos casos se pueden encontrar vacíos de información e imperfecciones de datos, lo que puede afectar los resultados arrojados por las herramientas de ArcGis. Es por esto que se debe utilizar la herramienta Fill (Relleno) de Hidrología en set "Spatial Analyst", que permite, en función de las celdas adyacentes, rellenar los sumideros o incongruencias de información.

Para utilizar la herramienta Fill, se debe ingresar el ráster seleccionado, que en este caso será el ráster delimitado previamente.

### 3. Determinar direcciones de flujo y tendencias en el ráster

Para determinar correctamente a partir de qué punto es considerable marcar una cuenca, es necesario determinar hacia qué dirección se mueve un flujo en cada celda. Para ello se utiliza la herramienta "Flow Direction" (Dirección de flujo) de Hidrología en el set "Spatial Analyst".

La herramienta "Flow Direction" asigna, para cada celda, una dirección de caída respecto de las 8 celdas contiguas a la original. Luego de que cada celda tenga asignado un valor numérico representativo de la dirección de mayor pendiente se pueden construir líneas de flujo y puntos de convergencia de flujos para todo el ráster analizado. Cuando se determinan puntos de acumulación de flujos que se diferencian de otros dentro del mismo ráster, entonces es posible determinar que estos corresponden a cuencas diferentes. Con esta información se pueden trazar las cuencas automáticamente utilizando las herramientas siguientes.

### 4. Delimitación de cuencas

Para determinar los límites de las cuencas se debe utilizar la herramienta "Basin" (Cuenca), que permite delimitar las cuencas aportantes a partir del ráster de dirección de flujo obtenido previamente. La herramienta delimita la cuenca determinando los puntos de fluidez desde donde se iniciaría un flujo de agua, de acuerdo con los valores de dirección de flujo. Cada cuenca asignada toma las líneas de flujo hasta un punto de convergencia común que cierra la cuenca. Para que el

proceso de separación de cuencas sea efectivo y preciso es necesario que el ráster original esté recortado de tal forma que el punto de convergencia que cierra la cuenca de interés (en el ápice del abanico correspondiente) no sea interpretado como parte de un flujo más grande, como ocurre en el caso de quebradas que van a dar a un río mayor. A pesar de que las cuencas dibujadas en el ráster tienden a representar correctamente las cuencas de aporte para los abanicos, estas deben ser ajustadas modificando los bordes para ajustarlas a lo que se observa en las imágenes satelitales y que pudo haberse ignorado en el proceso de las herramientas de ArcGis.

## 5. Ajuste de cuencas a partir de flujos de agua

Dado que en algunos casos las cuencas que se obtienen a partir de la herramienta "Basin" concentran más de una cuenca de aporte, es necesario separarlas manualmente observando los flujos y puntos de concentración que se obtienen con la herramienta "Flow Direction". Las direcciones de flujo no son suficientes por si solas para determinar el cauce completo, por lo que se requiere calcular los puntos de acumulación. La herramienta "Flow Accumulation" (Acumulación de flujo) permite, previa definición del peso o relevancia las celdas, asignar un valor numérico equivalente a cantidad de celdas con dirección desembocante a cada una de ellas. De esta manera, es posible determinar numéricamente cuales son las ubicaciones de mayor concentración y los puntos de acumulación de flujos. Estos datos serán trabajos como se explica en el punto siguiente.

## 6. Trazado de flujos en cuencas aportantes

La herramienta "Map Algebra" (Álgebra de mapas) permite trabajar los valores numéricos de las celdas de un ráster y así, entre otras cosas, destacar los valores representativos de acuerdo con las necesidades del usuario. Con operaciones matemáticas sencillas, se pueden trabajar datos como los de acumulación de flujo obtenidos previamente. Dependiendo de la cantidad de celdas en el ráster original, si se marca un valor de acumulación límite, se pueden obtener las líneas de flujo que en conjunto marcan el área de influencia dentro de una cuenca específica.

De esta manera, seleccionando una cantidad acumulación mínima en cada celda individual (en torno a las 500, aunque relativo dependiendo de la cantidad de datos), todas las celdas con cantidad acumulada superior al número seleccionado quedarán destacadas en un ráster de flujos, que posteriormente se puede convertir en un shapefile de líneas y así ser trabajado más fácilmente.

## 7. Modificación manual de cuencas en modo shapefile

Cuando se tiene seguridad de que las cuencas han quedado delimitadas correctamente, entonces se utiliza la herramienta de transformación de ráster a shapefile, que permite modificar los polígonos además de asignarles un valor de área. Cuando las cuencas no coinciden correctamente con el shapefile de líneas de los flujos obtenido previamente, entonces se debe editar para abarcar toda el área aportante al abanico correspondiente. De la misma forma, se debe cuidar que el polígono de cuenca se extienda hasta lo que se pueda observar en las imágenes satelitales.

Una vez que se ha delimitado la cuenca de drenaje asociada a cada uno de los abanicos aluviales del estudio, se realiza una medición de los parámetros morfométricos mencionados en las secciones anteriores.

## 4. Área de estudio

### 4.1. Geomorfología

La zona del Norte Grande de Chile cuenta con una diversidad de dominios geomorfológicos que se desarrollan de manera casi independiente. Al considerarse una franja tan amplia que se cuenta desde el borde costero hasta la Cordillera de los Andes (Figura 16), cada uno de los dominios geomorfológicos se encuentra asociado a un ambiente con diferente clima, aporte sedimentario, influencia volcánica y tectónica. A pesar de que esta marcada diversidad de dominios geomorfológicos es observable a lo largo de todo Chile, lo que ocurre en la zona norte del país es especial al encontrarse algunos de los ambientes más distintivos de este sector del continente, como lo son el Desierto de Atacama y el Altiplano de los Andes centrales, como se puede ver en la Figura 17.



Figura 16: Perfil geológico esquemático del norte de Chile con sus unidades más importantes. La escala no está determinada (Seyfried et al, 1998a).

#### 4.1.1. Planicies litorales y farellones costeros

En el norte grande las planicies litorales son muy escasas. Se encuentran en contacto directo con el mar y corresponden a zonas llanas de depósito de sedimentos. Desde este punto y hacia el sur, entre 18,5°S hasta 29°S, las planicies se vuelven intermitentes por el encuentro directo de la Cordillera de la Costa con el mar, en lo que se llama Farellones Costeros (Quezada, Cerda, y Jensen, 2010). Estos cuerpos rocosos se hacen presentes en casi toda la línea costera del norte de Chile y entran en contacto con el mar en forma de acantilados abruptos, dejando corredores muy angostos en algunos casos. Este acantilado costero se encuentra íntimamente relacionado a la notable aridez del sector y limitada por la presencia del Desierto de Atacama, lo que ha permitido la preservación del relieve antiguo (Oligoceno-Mioceno) (Clarke, 2006). A pesar de que las planicies son intermitentes y suelen estar afectadas por la erosión marina, es posible encontrar sectores donde entregan el espacio suficiente para el depósito de sedimentos.

#### 4.1.2. Cordillera de la Costa

La cordillera de la Costa corresponde a un cuerpo rocoso de composición intermedia y de edad Jurásica que se observa paralela a la línea de costa y prácticamente a lo largo de todo el país (García, 1960) (Seyfried *et al*, 1998b). Se ubica entre el Océano Pacífico al oeste, a partir del mencionado acantilado costero y lo que se conoce como la depresión intermedia y valles transversales al este. Sus alturas varían desde unos cientos de m.s.n.m. en zonas cercanas a la región de Arica y variando entre los 1000 y 3000 m.s.n.m. a la altura de Antofagasta (Errazuriz, 1998).

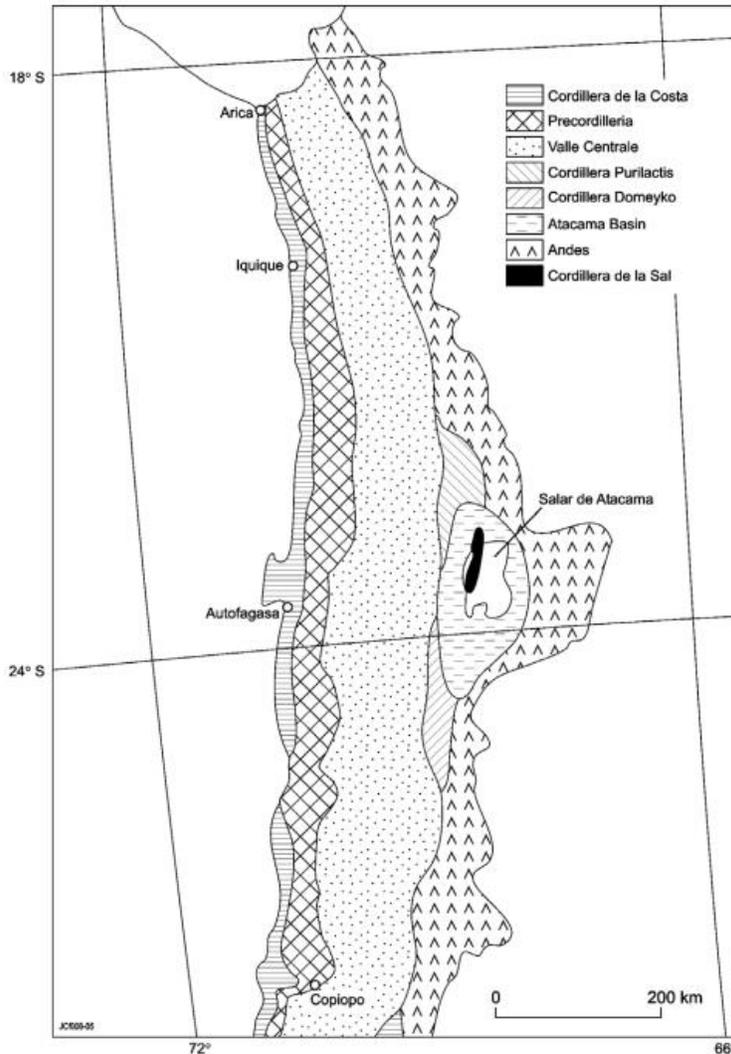


Figura 17: Distribución geomorfológica del norte de Chile. (Clarke, 2006)

### 4.1.3. Valles transversales

Los valles transversales corresponden a todas las zonas deprimidas con depósitos fluviales y aluviales y que toman el lugar de la Depresión Intermedia cuando esta no es visible. Hacia la zona más al norte (18°S - 20°S) se pueden encontrar algunas quebradas importantes como lo son Azapa, Higuera, Vitor, Camarones y otras, mientras que en latitudes del Desierto de Atacama se vuelven extremadamente escasas (García, 2004) (Quezada, 2010). Ya a partir del 24°S en el sector del cobre se reconocen más sectores deprimidos que se asocian a la influencia de la SFA, volviendo a un régimen similar al de Arica en el sector de Paposos.

#### 4.1.4. Desierto de Atacama

El Desierto de Atacama corresponde a un ambiente geológico único en su especie. Ubicado al Occidente de la Cordillera de los Andes entre las latitudes 17°S y 28°S, este desierto es considerado el más árido del mundo y presenta depósitos sedimentarios de poca erosión reciente asociados a la escasez de agua. Sus climas áridos e hiperáridos (Dunai *et al*, 2005) han prevenido la erosión en muchos de los sectores, con afloramientos que se mantienen intactos desde hace cerca de 26 Ma. La presencia del Desierto de Atacama en el norte de Chile ha sido asociada al alzamiento de la Cordillera de los Andes y su distintiva aridez a muchos de los fenómenos más relevantes de la geología de este sector como los depósitos evaporíticos de nitratos y sales, enriquecimiento secundario de pórfidos cupríferos, sales enriquecidas en Litio, entre otros (Tapia *et al.*, 2018).

#### 4.1.5. Precordillera

En la zona sur de la Cordillera de los Andes (como ocurre a lo largo de todo Chile) se llama precordillera a una subdivisión de la Cordillera Occidental que se encuentra entre la zona de depresión central (o el altiplano, dependiendo de la latitud) y la Cordillera montañosa alta. En otras palabras, la precordillera es la sección occidental de la Cordillera de los Andes cuyas alturas van entre 2600 y 4000 m.s.n.m. (Tosdal, *et al*, 1984). Dependiendo de si existe o no la depresión central, es posible encontrar valles transversales en la precordillera que conectan la Cordillera de los Andes con el resto de las unidades geomorfológicas.

### 4.2. Geología

En esta sección, se explicarán algunos de los fenómenos más relevantes de la geología de Chile. Dado que, en este caso, la zona de estudio abarca 4 regiones

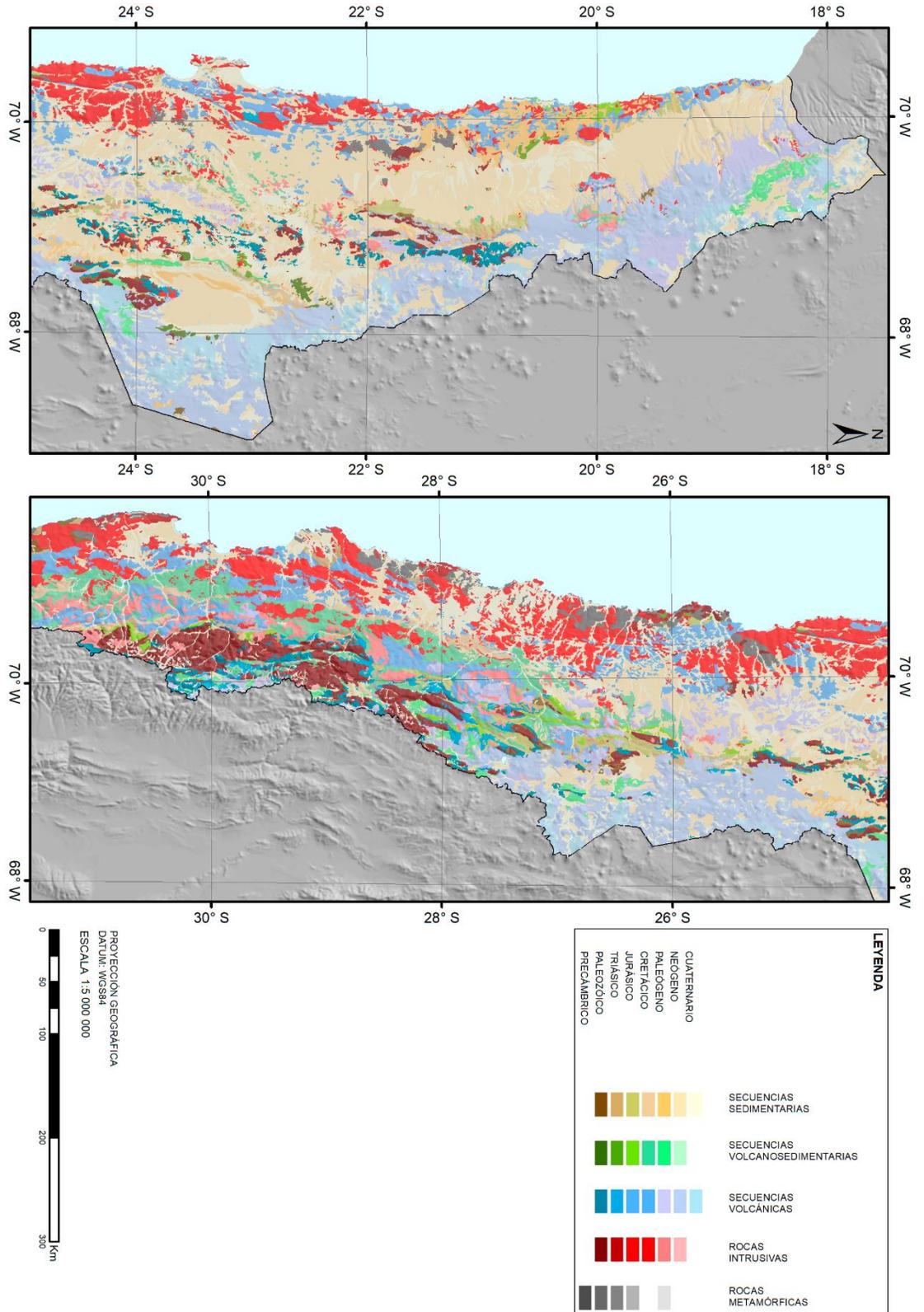


Figura 18: Mapa geológico de Chile a escala 1:1.000.000 entre latitudes 17°30' y 31°00'. Modificado de Servicio Nacional de Geología y Minería, 2003.

del país, la descripción geológica se hará de manera general y en las siguientes secciones de este trabajo se detallará siempre que sea necesario.

La geología de Chile es variada y en ella es posible encontrar todo tipo de formaciones y contextos geológicos. En ella destacan los arcos magmáticos que dieron lugar a la Cordillera de los Andes y la Cordillera de la Costa, además de formaciones sedimentarias afectadas por los procesos de extensión y compresión que ocurrieron en el territorio chileno particularmente desde el periodo Triásico Inferior en adelante. Todo esto se encuentra directamente relacionado con los inicios y pausas del proceso de subducción de placas tectónicas característicos del margen existente en el sector costero de nuestro país.

Para el estudio de la geología de Chile por región, se utilizó el Mapa Geológico digital a escala 1:1000000 del SERNAGEOMIN (ver Figura 18)

#### 4.2.1. Región de Tarapacá

La geología de la Región de Tarapacá tiene la particularidad de cambiar drásticamente de poniente a oriente. En el sector costero se puede ver claramente la influencia del arco magmático formador de la Cordillera de la Costa, planicies litorales principales y todas las unidades volcánicas y sedimentarias asociadas a esta unidad geomorfológica.

Lo mismo ocurre con el sector de la Cordillera de los Andes donde, con unidades de edad más reciente, gran parte de la geología local se encuentra dominada por la influencia del arco magmático formador de centros volcánicos localizados entre formaciones sedimentarias junto con algunos intrusivos. Sin embargo, en la zona de la depresión central y hasta llegar a la precordillera se puede observar que toda la franja entre estos dos dominios se encuentra casi completamente cubierta por unidades no consolidadas de tipo aluviales, con abanicos que llegan a tener varios kilómetros de extensión. Esta característica es de gran interés para este estudio, ya que las condiciones geológicas y geográficas parecen favorecer la formación de depósitos con morfología de abanico. De acuerdo al Mapa Geológico de Chile a escala 1:1.000.000 (Servicio Nacional de Geología y Minería, 2003).

- Planicies litorales y Cordillera de la Costa

En esta zona, además de los depósitos no consolidados asociados a la erosión marina y todos aquellos que conforman las planicies litorales, las formaciones más importantes corresponden a aquellas que nacen del arco magmático Jurásico formador de la Cordillera de la Costa. Las unidades de roca más importantes son:

- Depresión Central y Precordillera

Como se ha mencionado previamente, la sección de depresión intermedia cuenta con una gran cantidad de depósitos aluviales con morfología de abanico y otros similares que cubren prácticamente toda esta área.

- Alta Cordillera

En este sector se encuentran mayormente unidades volcánicas más recientes.

#### 4.2.2. Región de Antofagasta

La región de Antofagasta cuenta con una geología que se da de la misma manera que el sector anterior y cada tipo de roca se acota a la sección geomorfológica asociada. Por un lado, existen unidades sedimentarias, plutónicas y volcánicas con edades en torno al jurásico en la Cordillera de la Costa, luego otra semiconsolidadas en la depresión central y hacia la zona de precordillera y Cordillera de los Andes se pueden ver unidades volcánicas de edad más reciente en los sectores donde se alcanzan las alturas más pronunciadas. Sin embargo, entre las zonas más altas de la Cordillera de los Andes y la precordillera existe una zona deprimida sobre la cual es posible encontrar depósitos evaporíticos que dan lugar a algunos de los salares más importantes del norte de Chile.

- Cordillera de la Costa

Como se ha dicho previamente, esta zona la dominan las unidades de roca intrusivas del Jurásico, aunque en algunos sectores es posible encontrar otras localizadas de rocas metamórficas en la costa y también no consolidadas como depósitos aluviales del Holoceno y secuencias litorales y fluviales estuarinas del Pleistoceno.

- Depresión Central y Precordillera

Lo que más destaca de esta franja es el cambio de una franja estable de depósitos no consolidados a la unión de las unidades de roca Jurásicas de la Cordillera de la Costa con las Cretácicas y más recientes de la Cordillera de los Andes.

- Depresión de Salares

En esta sección acotada de la región de Antofagasta es posible encontrar depósitos de salares asociados a la Cordillera de la Sal y a la Cuenca de Atacama. Dada su importancia en términos geológicos, la descripción de la unidad de depósitos evaporíticos que se ha definido previamente se debe asociar al Salar Grande de Atacama y los demás que se pueden registrar en esta región en torno a la latitud 26° sur.

- Alta Cordillera

En la Cordillera de los Andes es posible encontrar principalmente unidades volcánicas e ígneas asociadas a magmatismo reciente. Particularmente, las que se encuentran a la altura del Salar de Atacama son más recientes y representan lo que se ha dicho sobre las unidades de roca de la Cordillera de los Andes, aunque estas aparecen en medio de unidades del paleozoico.

#### 4.2.3. Región de Atacama

La geología de la región de Atacama destaca por la mayor presencia de depósitos no consolidados en la franja de la Cordillera de la Costa y por la intermitencia de los depósitos de cuenca de la depresión intermedia. Particularmente, esta depresión intermedia desaparece hacia el sur hasta llegar a Copiapó, donde luego vuelve a aparecer intermitentemente hasta prácticamente no encontrarse en la región de Coquimbo.

- Cordillera de la Costa

En la Cordillera de la Costa es posible encontrar unidades de roca de características similares a las definidas previamente, pero en esta región aparecen más frecuentemente unidades metasedimentarias paleozoicas producto de un sistema de prisma de acreción con metamorfismo en varias etapas (Alarcón, 2015).

- Depresión Intermedia

En esta franja intermitente es posible ver depósitos principalmente no consolidados. Hacia el norte de Copiapó se pueden observar los principales, aunque reaparecen

por unos kilómetros hacia el sur de la ciudad hasta Vallenar y reapareciendo parcialmente en la Cuenca de Domeyko cercana a la localidad del mismo nombre.

- Precordillera

La zona de la precordillera presenta algunas unidades volcanosedimentarias cretácicas y otras de complejos volcánicos y plutónicos más recientes que se mantienen más o menos a lo largo de toda la región. Sin embargo, en la zona de la cordillera de Vallenar es posible encontrar algunas unidades plutónicas y volcánicas de carboníferas a triásicas asociadas a la acreción de terrenos alóctonos.

- Depresión de los Salares

De la misma forma que en la región de Antofagasta, entre la precordillera y cordillera alta de la región de Antofagasta se da una depresión que alberga alguno de los salares más importante del norte de Chile, producto de depósitos evaporíticos en la cuenca endorreica de Atacama. Entre ellos se encuentran el Salar de Pedernales y el Salar de Maricunga.

- Cordillera Alta

La cordillera alta de la región de Atacama cuenta principalmente con unidades volcánicas recientes y en menor medida algunas unidades semiconsolidadas fluviales y aluviales de tipo piedemonte.

#### 4.2.4. Región de Coquimbo

La geología de la región de Coquimbo se encuentra marcada por la ausencia de una depresión intermedia entre la Cordillera de la Costa y la Cordillera de los Andes. Junto con esto, las litologías de esta región se encuentran restringidas por los dominios estructurales que quedan determinados por las fallas principales. Con esto, las litologías de los dominios costero y occidental corresponden a las encontradas en la Cordillera de la Costa, el dominio occidental y central a las encontradas en la precordillera andina y el dominio oriental en la Cordillera Alta.

Es posible observar una amplia diversidad de litologías que, hacia la Cordillera de la Costa son principalmente plutónicas básicas del Cretácico y Jurásico, además de unidades de intercalaciones volcánicas y sedimentarias de composición intermedia Cretácicas. Ya en la transición a la precordillera andina, las unidades son volcánicas continentales de basálticas a dacíticas y en la alta cordillera aparecen rocas plutónicas y volcánicas de edades que van de Carboníferas a Triásicas.

- Cordillera de la Costa

La Cordillera de la Costa de la región de Coquimbo se caracteriza por contar principalmente con rocas plutónicas cretácicas y otras unidades sedimentarias con intercalaciones marinas transgresivas y continentes.

- Precordillera

La precordillera en la región de Coquimbo se encuentra dominada principalmente por litologías volcánicas y sedimentarias continentales del Cretácico, con concentraciones plutónicas granodioríticas del Paleoceno.

- Cordillera Alta

La cordillera Alta cuenta con litologías de un amplio intervalo de edades, con rocas plutónicas del Carbonífero, secuencias volcánicas y sedimentarias Jurásicas y batolitos plutónicos del Oligoceno.

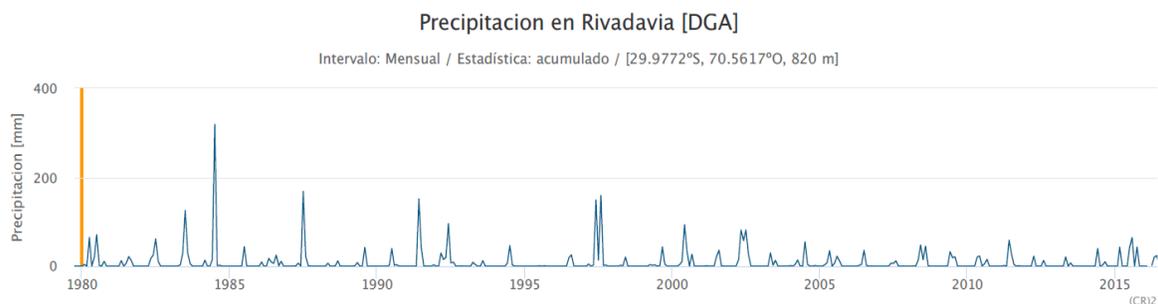
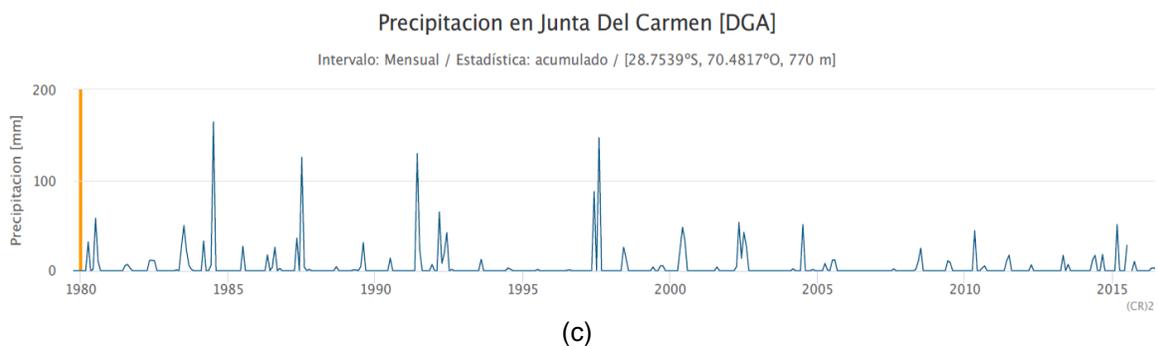
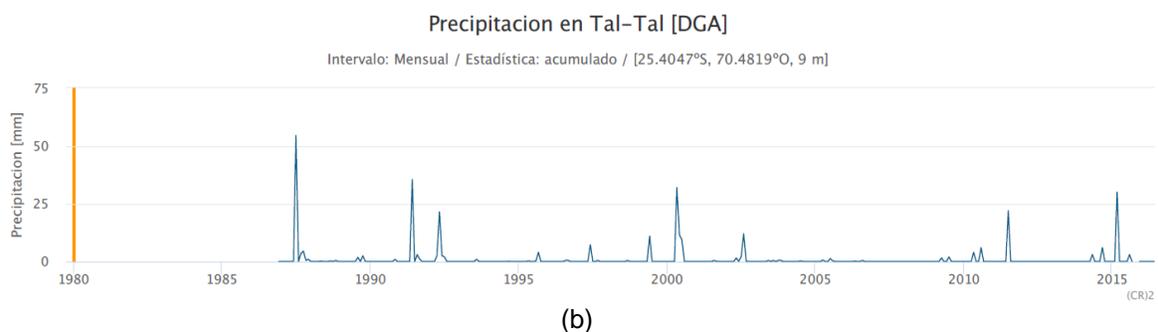
Las unidades geológicas más importantes de cada región se describen detalladamente en las tablas del Anexo E.

### 4.3. Antecedentes climáticos generales

El territorio chileno posee uno de los gradientes climatológicos más pronunciados del mundo. A lo largo de su territorio se pueden encontrar sectores de extrema aridez como el Desierto de Atacama y otros con precipitaciones de varios metros por año, como ocurre en el extremo sur de Chile. A pesar del efecto regulador que imprime la presencia del Océano Pacífico en el territorio continental, esta diferencia de regímenes climáticos favorece un cambio constante en el paisaje superficial, controlado principalmente por la presencia y/o ausencia de precipitaciones tanto en el norte como en sur del país.

Esta variación climática también se encuentra controlada por el relieve, destacando algunas unidades geomorfológicas que serán expuestas en las secciones posteriores de este trabajo, pero que permiten la existencia de dominios climáticos particulares como climas litorales, áridos desérticos, semiárido de valles y cordillerano, entre otros.

Al tratarse de un estudio concentrado en el norte de Chile, la preponderancia de climas semiáridos restringe importantemente las precipitaciones en cada una de las zonas de estudio. Revisando los datos obtenidos del registro pluviométrico del Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (Center of Climate and Resilience Research, CR<sup>2</sup>), se observa que las precipitaciones anuales en cada uno de los sectores de estudio son más bien escasas, con peaks marcados (Figura 19).



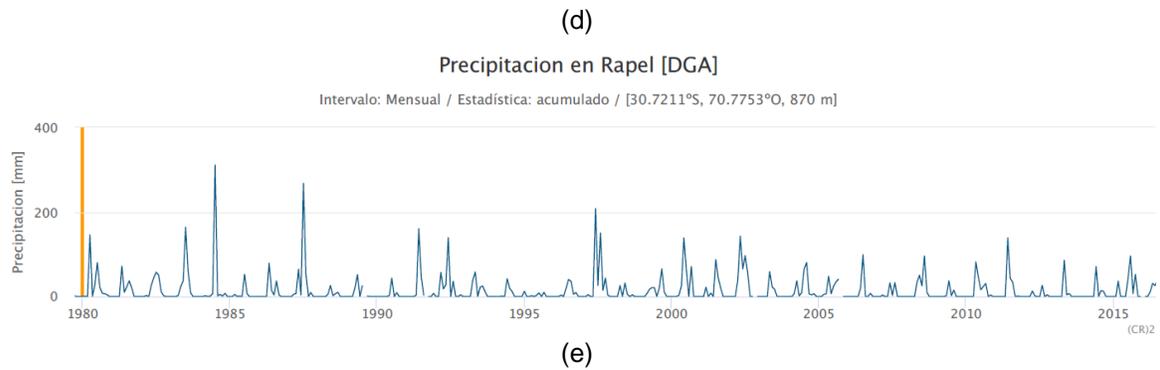


Figura 19: Registro de precipitaciones mensuales en el intervalo de 1980 a 2018 para estaciones pluviométricas en cada una de las zonas de estudio. (a) Precipitaciones en El Loa, localidad representativa de la zona 1 de estudio; (b) Precipitaciones en Tal-tal, localidad representativa de la zona 2 de estudio; (c) Precipitaciones en Junta del Carmen, localidad representativa de la zona 3 de estudio; (d) Precipitaciones en Rivadavia, localidad representativa de la zona 4 de estudio; (e) Precipitaciones en Rapel, localidad presentativa de la zona 5 de estudio.

La Figura 19 muestra el registro para cada una de las 5 zonas de estudio, donde se puede observar que, a pesar de existir eventos particulares de precipitaciones mayores a la media, los eventos mayores no son recurrentes anualmente. En el caso de las secciones (a) y (b) de la imagen, se observa que hay largos períodos sin precipitaciones, donde el peak más reciente corresponde a lo ocurrido en marzo del año 2015, con una precipitación mensual de 17mm en el caso de la zona 1 y de 30mm en el caso de la zona 2. Ya en las secciones (c), (d) y (e), se observa que las precipitaciones, aunque aún escasas, son más recurrentes con peaks cercanos a los 50mm en el mes que ocurren. En la zona 5, existe un peak histórico en mayo de 2017, con precipitaciones que cuando son intensas alcanzan valores en torno a 90mm.

#### 4.4. Antecedentes de remociones en masa

Para conectar la caracterización geomorfológica de cada una de las zonas de estudio con una zonificación que permita determinar una zonación de actividad relativa para los abanicos aluviales, se debe recurrir a una revisión del registro histórico de remociones en masa y a los informes de catástrofes de SERNAGEOMIN. Si bien, el registro histórico de remociones en masa es muy amplio debido a la cantidad de eventos relevantes y a la cobertura de esta investigación, se pondrá especial interés en los eventos ocurridos en el año 2015.

Entre los días 23 y 26 de marzo del año 2015, un núcleo frío en altura en el norte de Chile dio lugar a un evento de intensas precipitaciones acotadas a un corto plazo que afectó a las regiones de Antofagasta, Atacama y Coquimbo. Estas precipitaciones, que alcanzaron varios milímetros en sectores donde las lluvias son escasas o inexistentes durante el año, desencadenaron una serie de eventos aluvionales que afectaron a las poblaciones cercanas a ríos y quebradas de las regiones mencionadas.

A pesar de que, en algunos casos, las precipitaciones no sobrepasaron los 50mm, la cantidad de agua caída en un solo día fue suficiente para generar aluviones que arrasaron con poblaciones completas, dado como resultado 25 fallecimientos, 59 desaparecidos y cerca de 30.000 personas damnificadas por pérdida total o daño severo de sus viviendas (de acuerdo con los informes de ONEMI y SERNAGEOMIN).

- Condiciones de temperatura en los días del evento

Como se puede ver en la Figura 20, existe una marcada anomalía de temperaturas mínima y máxima durante los días del evento que dan lugar a las precipitaciones, inusuales tanto en el periodo cercano (entre 20 y 30 de marzo) como en el periodo anual.

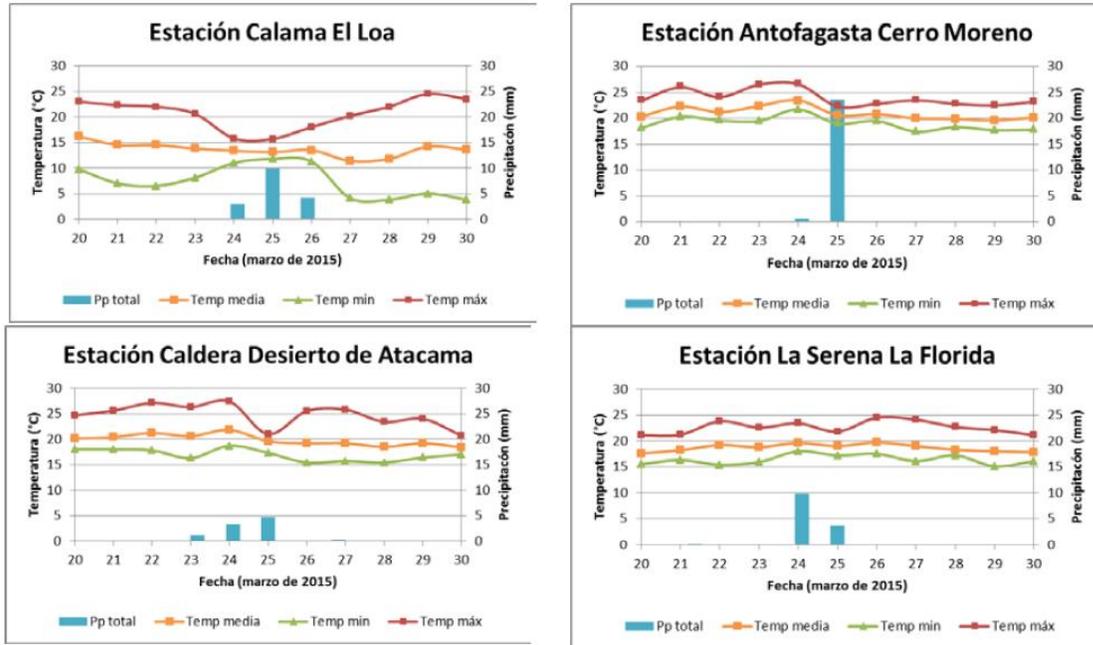


Figura 20: Temperaturas máxima, mínima, media y precipitaciones durante el período de 20 a 30 de marzo de 2015. Información de la Dirección Meteorológica de Chile, extraído de Olea y Arce, (2015).

Los eventos de alta precipitación acotados a lapsos cortos son uno de los principales agentes desencadenantes de remociones en masa. Las lluvias sobre sectores donde los sedimentos de las cuencas no son transportados con regularidad dan lugar a estas remociones. Dependiendo de la cantidad de sedimentos disponibles y de la calidad de las rocas que conforman las cuencas de drenaje, es posible que se produzcan flujos hiperconcentrados, flujos de detritos y en menor medida caídas de roca.

- Concentración de precipitaciones en las zonas de estudio

Los eventos de alta precipitación de marzo del 2015 afectaron a gran parte del norte de Chile, especialmente sobre 5 cuencas. Estas son la cuenca Quebrada Taltal, la cuenca Río Salado, la cuenca Río Copiapó, la cuenca Río Huasco y la cuenca Río Elqui. La Figura 21 muestra la ubicación de cada una de estas.

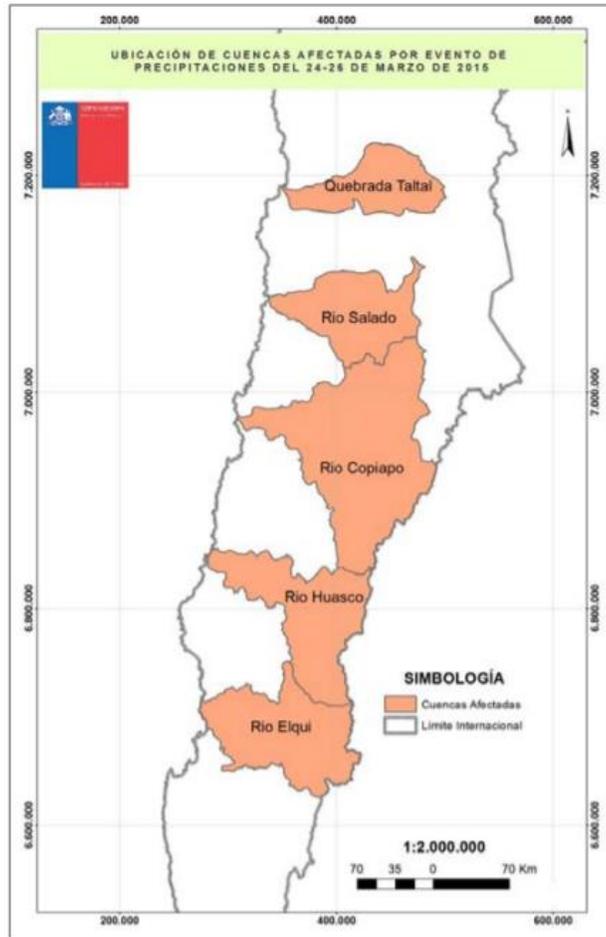
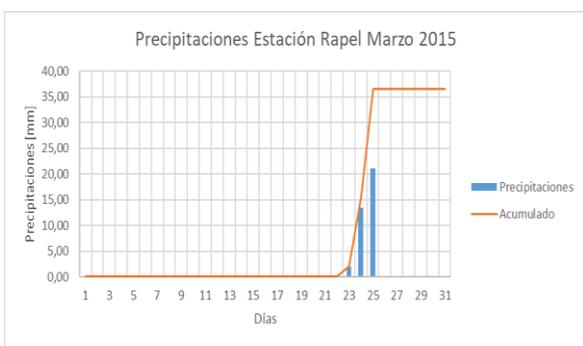
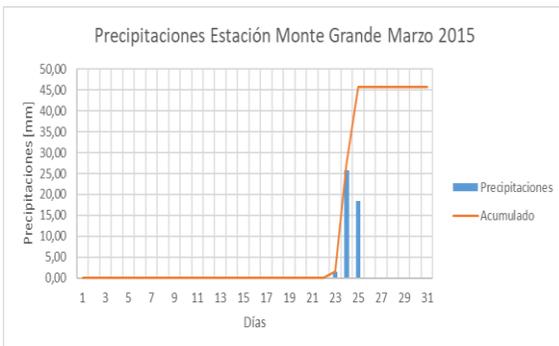
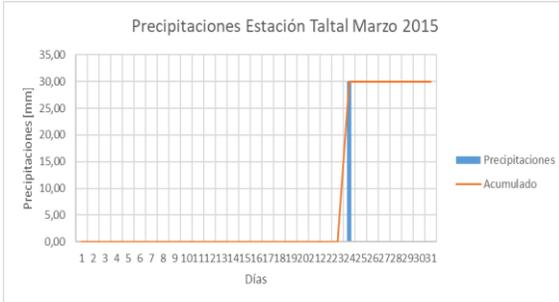


Figura 21: Cuencas afectadas por el evento de precipitaciones del 24-26 de marzo de 2015. (Olea y Arce, 2015)

A pesar de que las cuencas indicadas fueron las más afectadas por fenómenos de remociones en masa, la actividad por precipitaciones se extiende hacia el norte y hacia el sur de las zonas mencionadas.

Para estudiar las precipitaciones de las zonas de estudio se revisaron los datos de recopilados por la Dirección Meteorológica de Chile. Particularmente, se seleccionaron algunas estaciones meteorológicas ubicadas en torno a las zonas de interés para determinar cambios abruptos en la tasa de precipitaciones. Los gráficos acumulados de la Figura 22 indican que durante los días 24, 25 y 26 de marzo hubo una concentración de precipitaciones que superan el promedio anual en cada uno de los días, afectando la estabilidad sedimentológica de cada una de las zonas, donde las cuencas no se enfrentan frecuentemente a eventos erosivos.



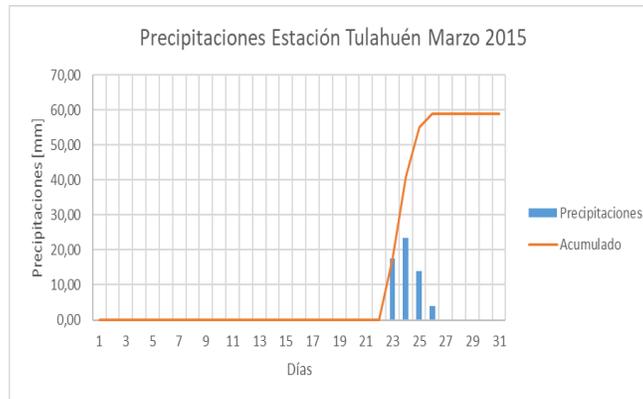


Figura 22: Gráficos de precipitaciones con milímetros caídos por día y precipitaciones acumuladas del mes de marzo de 2015 en localidades de las zonas de estudio. Localidad de Quillagua y Tocopilla para la zona 1; Localidad de Taltal para la zona 2; Localidad de Junta del Carmen y El Tránsito para la zona 3; Localidad de Rivadavia y Monte Grande para la zona 4; Localidad de Rapel y Tuluahuén para la zona 5. Los valores de precipitación diarios para cada una de las localidades se encuentran en el Anexo D. Elaboración propia.

Como se puede ver en las curvas de precipitación acumulada, el evento es abrupto y ocurre en un sector donde el promedio anual de agua caída es considerablemente menor, al punto en que las precipitaciones superan el promedio anual por más del 50% en todos los casos y llegando al doble en los más críticos (Instituto Nacional de Estadísticas, 2017)

La cantidad de agua caída en las estaciones varía en algunos milímetros, aunque el factor más relevante resulta ser la distribución de las precipitaciones entre el 1 y 31 de marzo. Si bien, en algunos casos como los de la zona 3 y zona 5 la distribución de precipitaciones se extiende en más de 2 días, el evento debe considerarse como abrupto al concentrar una cantidad de milímetros mayor al promedio anual.

Con respecto a la actividad sobre los abanicos aluviales, durante los días del evento las estaciones fluviométricas indicaron un alto transporte de sedimentos sin precedentes durante las últimas décadas, con activación simultánea de los depósitos aluviales que se encontraban en las cuencas semiáridas del norte de Chile (ver Figura 23). Particularmente, en el valle del Huasco (que se encuentra en la zona 3 de estudio) hubo una denudación por flujos de detritos y barro de un volumen total de  $1,2 \pm 0,2 \text{ km}^3$  (Aguilar *et al*, 2015).

Eventos de flujos detríticos y de barro de similares características fueron detectados en otras comunas asociadas a cuencas semiáridas como Taltal, donde las

precipitaciones desencadenaron grandes flujos con material predominantemente fino que se transportaron por las quebradas interiores hasta llegar al mar. Las zonas desde donde se tienen mayores registros corresponden al centro poblado de la comuna de Taltal, donde las medidas de mitigación como muros de contención de flujos no fueron efectivas para detener los detritos de mayor tamaño y causaron muchos daños a la población (Díaz *et al*, 2015).

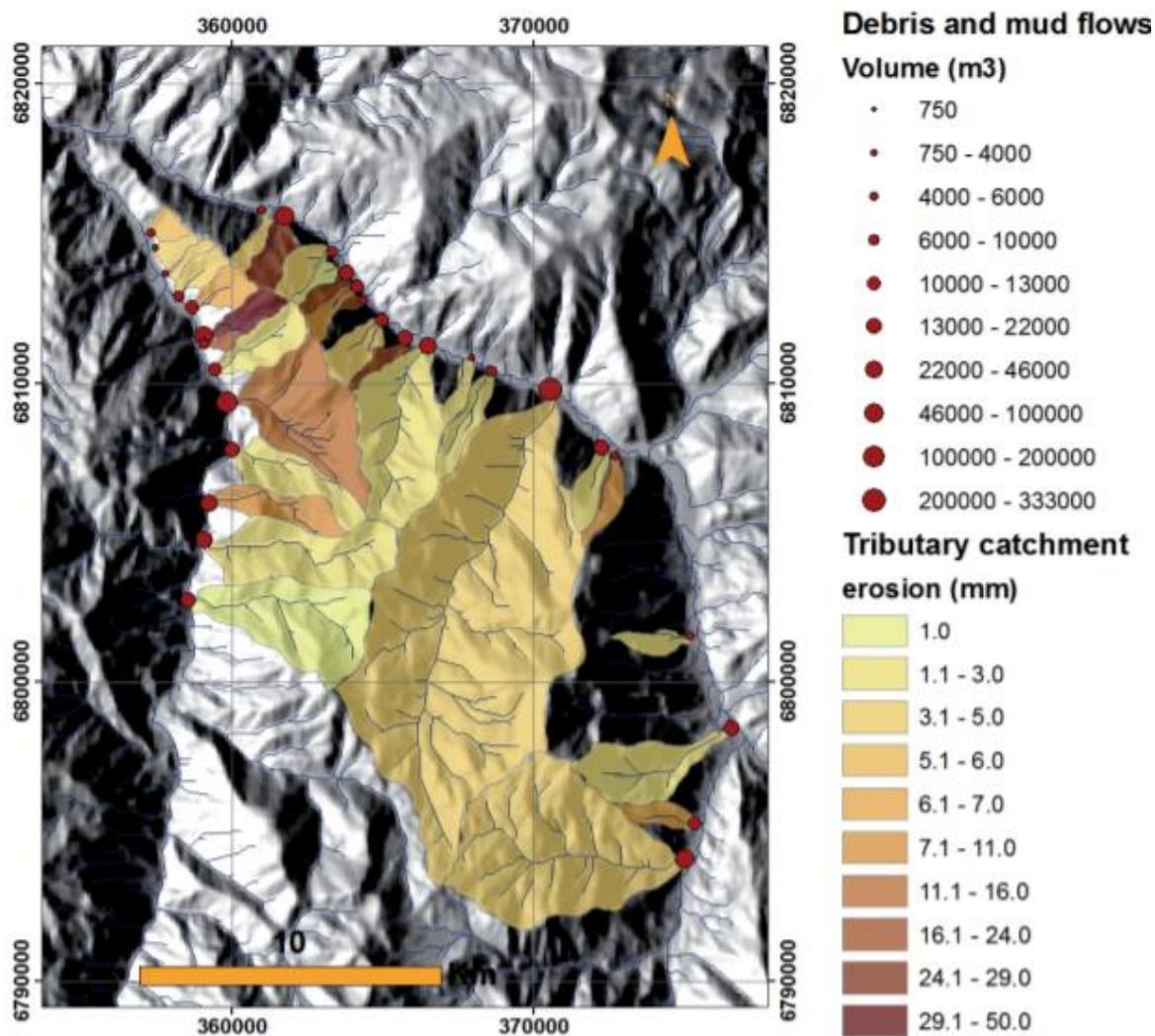


Figura 23: Modelo de elevación digital con erosión y volumen de subcuencas del Valle del Huasco durante las precipitaciones de marzo de 2015 (Aguilar *et al*, 2015).

En la cuarta región, las precipitaciones también desencadenaron una serie de flujo de detritos que afectaron en gran medida los sectores poblados, obstruyendo caminos (ver Figura 24) y dañando hogares que debieron ser evacuados durante los días que se extendieron las lluvias. Una de las áreas más afectadas se ubica en

torno a la localidad de Vicuña, con flujos de hasta 80m de ancho y 3m de alto (Opazo y Velásquez, 2015).



Figura 24: Fotografías de Quebrada Leiva, ubicada al este de la ciudad de Vicuña. Abajo se observa la quebrada previo al evento de precipitación de marzo de 2015, mientras que arriba se puede ver la misma quebrada a unos días del fenómeno (Opazo y Velásquez, 2015).

## 5. Resultados

### 5.1. Selección de zonas de estudio

Las zonas de estudio definidas agrupan distintos ambientes geológico-sedimentarios que permiten la extracción de parámetros morfométricos y características generales necesarias para esta investigación. Por medio de la observación de imágenes satelitales con el software Google Earth se han seleccionado algunas áreas de mayor interés desde las cuales se establecen algunas descripciones generales que posteriormente serán de gran ayuda para definir los mencionados ambientes de formación de abanicos aluviales.

Es importante aclarar que los criterios de selección de estos sectores se basan en observaciones superficiales sin mediciones específicas, donde existe una alta concentración de abanicos aluviales con pendientes, tamaños y regímenes de aporte sedimentario similares. También, algunas de las zonas de estudio se han seleccionado en base a los informes de actividad aluvional del SERNAGEOMIN, con mayor atención sobre aquellas activas durante los eventos de tormenta de los últimos años.

El estudio en detalle de estas y otras características será realizado en la sección de caracterización y clasificación, donde se establecerán similitudes y diferencias entre los abanicos individuales con mayor rigurosidad. Junto con esto, será posible establecer los ambientes que se pueden definir a partir de las zonas seleccionadas y de las características que marquen una diferencia sustancial entre los abanicos de uno y otro sector.

Dicho lo anterior, los ambientes seleccionados (Figura 25) se dividen de la siguiente manera:

#### 5.1.1. Norte Costero de Punta Patillos a El Loa, Región de Tarapacá.

Esta zona comprende toda el área costera de la provincia de Iquique entre las latitudes 20°47' y 21°25' (ver Figura 1). Este sector tiene la particularidad de encontrarse frente al farellón costero, donde las zonas de deposición son escasas y el espacio para la dispersión de los sedimentos se encuentra acotado al oeste por el océano y al este por el muro de roca que representa el farellón. A pesar de esto,

existen sectores donde es posible encontrar depósito de sedimentos aluviales con morfología de abanico sin interrupciones (por erosión o manipulación antrópica).

La zona se encuentra sometida a una constante erosión marina y el aporte de sedimentos que viene desde las cotas más altas varía de acuerdo con las precipitaciones, escasas en toda la zona norte de Chile.

Los abanicos aluviales que se encuentran aquí, cuando hay lugar para su depósito, tienen pendientes que varían entre 17° en sus zonas más altas y 3° en la base. El ancho de los abanicos de este sector no supera los 2 km y no son muy frecuentes, aunque en algunos sectores son lo suficientemente comunes como para dar lugar a morfologías de piedemonte. Cuando se dan en lugares de área deposicional limitada, los depósitos suelen ser muy empinados y de tamaño reducido, con pendientes mayores a 17° y anchos que no superan los 200m.

#### 5.1.2. Norte Costero de Paposo a Taltal, Provincia de Antofagasta, Región de Antofagasta

Esta zona contempla nuevamente un tramo costero, con los depósitos que se encuentran entre el Océano Pacífico y el acantilado costero. Específicamente, la zona de estudio se encuentra entre las latitudes 24°55'S y 25°24'S (ver Figura 2) donde, a diferencia de lo encontrado un poco más al norte en la provincia de Iquique, los depósitos son más frecuentes e identificables a simple vista.

Pese a seguir siendo una zona de clima árido-semiárido, en este sector específico hay una mayor cantidad de cauces que desembocan en la costa, lo que favorece la presencia de flujos y la formación de abanicos aluviales de genética húmeda. Los abanicos de características más detríticas que se pueden encontrar a lo largo de las latitudes indicadas previamente son de un largo promedio de 1,3 km con anchos similares y pendientes promedio que varían entre 7 y 12°.

#### 5.1.3. Precordillera Andina, Provincia de Huasco, Región de Atacama.

El sector de Alto del Carmen corresponde a la zona de encuentro de dos valles importantes en la Provincia de Huasco: los valles Tránsito y El Carmen. La zona de estudio se encuentra entre las latitudes 28°44'S y 29°00'S, longitudes 70°00'W y 70°30'W (ver Figura 3). Estos valles se encuentran muy encajonados con no más

de 200m de ancho donde los depósitos aluviales, si bien son frecuentes, se encuentran erodados por los ríos principales.

Los abanicos aluviales de este sector suelen ser de tamaño reducido, con anchos que no superan los 500m y pendientes pronunciadas, comúnmente sobre 15°. Los flujos de detritos que nacen en las cuencas del sector depositan lóbulos que son arrastrados por los ríos, por lo que no es posible encontrar abanicos de gran tamaño, a pesar del tamaño de las cuencas que aportan los sedimentos.

#### 5.1.4. Valles Transversales, Provincia de Elqui, Región de Coquimbo.

La zona de los valles transversales y hasta la zona precordillerana de la provincia de Elqui se encuentra caracterizada por valles muy angostos y encajonados. En este lugar las precipitaciones son considerablemente más frecuentes y cuantiosas que en los sectores anteriores, por lo que la morfología del paisaje varía constantemente y los depósitos fluviales son muy característicos. Pese a ello, es posible encontrar algunos abanicos aluviales de características diferentes a los anteriores.

En este lugar suelen ser de forma alargada y con una apertura radial menos pronunciada en comparación con el resto del abanico. Sus largos no superan los 500 metros, pero son angostos, menores a 100m en algunos casos. Sus pendientes varían en torno a los 17°. Sin embargo, entre la zona de Elqui y lo que ocurre 20 kilómetros al sur, en Vicuña, cambia levemente por lo que parece ser un aumento del aporte de agua reflejado en la apertura de los valles principales y en la cantidad de localidades con terrenos agrícolas. Se encuentra en torno a la latitud 30°S y las longitudes 70°29'W y 70°49'W (ver Figura 4).

#### 5.1.5. Valles Transversales, Provincia de Limarí, Región de Coquimbo

La provincia de Limarí se caracteriza por tener un entramado de valles transversales por los que circulan ríos activos de varios caudales. En este sector las precipitaciones son más protagonistas permitiendo un mayor transporte de sedimentos y con ello la aparición de geoformas en escalas más pequeñas. De esta manera también se encuentran los abanicos aluviales con tamaños de decenas de metros hasta otros mayores.

Cada uno de estos depósitos aluviales nacen de quebradas que normalmente se encuentran encajonadas pero que al llegar al cauce principal se abren considerablemente, pasando de un cauce de algunas decenas de metros hasta una relación ancho:largo de 2:1. Al ser tan acotado el espacio de depósito (por el encajonamiento y la interacción con los caudales de ríos mayores) las pendientes son más pronunciadas que en la mayoría de los ambientes seleccionados, llegando a los 17° en algunos sectores. La ubicación de estas zonas de depósito se encuentra en torno a la latitud 30°42'S y las longitudes 70°42'W y 71°03'W (ver Figura 5).

Una vez que se han definido los lugares de interés sobre los cuales se hará el análisis de abanicos aluviales, es necesario establecer cuáles son los parámetros utilizados para caracterizar todos los abanicos del estudio.

La caracterización de los abanicos aluviales elegidos se hizo en base a parámetros morfométricos comunes y evaluables por observación de imágenes satelitales. Se han realizado varios estudios de caracterización de abanicos aluviales acotados a sectores particulares (Bull, 1964; Hooke, 1968b; Church y Mark, 1980; Blair y Mcpherson, 2009; Valkanou *et al*, 2017), pero ninguno en esta región de Chile.

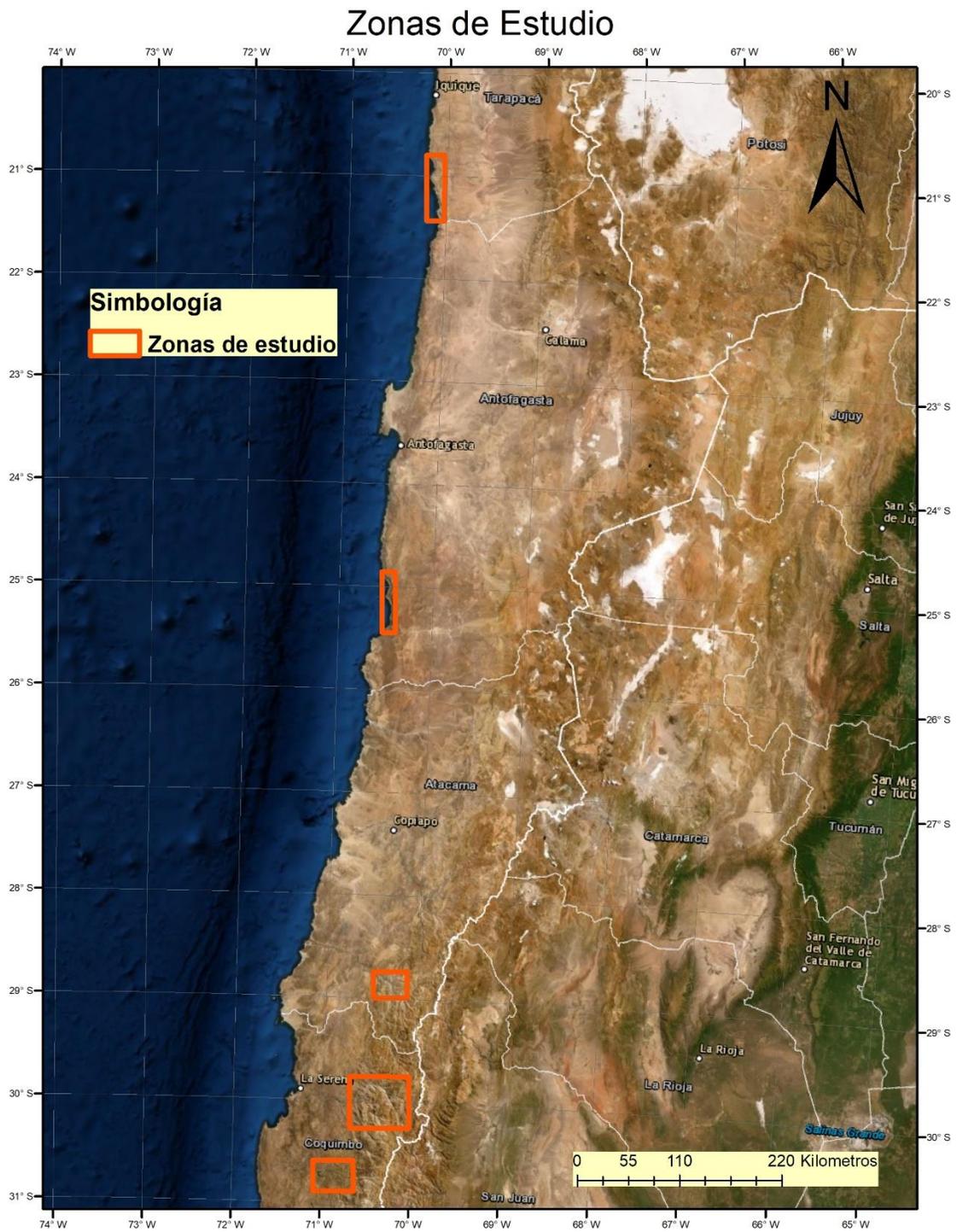


Figura 25: Mapa del norte de Chile que indica cada una de las 5 zonas de estudio.

## 5.2. Abanicos seleccionados por zona

Previo a la utilización de los criterios de caracterización, los abanicos aluviales medidos para esta investigación fueron 131, para los cuales se calcularon largo de abanico, ancho de abanico, pendiente de abanico, distancia desde el ápice, área de abanico, largo de cuenca aportante, ancho de cuenca aportante, área de cuenca aportante, diferencia de altura de cuenca aportante (desde punto más alto hasta contacto con el abanico aluvial) y pendiente de cuenca aportante.

De estos datos y luego del filtro generado por los criterios de selección expuestos en el subcapítulo 3.4, los abanicos que califican como seleccionados son un total de 40.

### 5.2.1. Zona 1: Punta Patillos a El Loa

Para la caracterización de la zona 1 de estudio, así como para todas las zonas estudiadas, se realizaron mediciones de 9 parámetros morfométricos que permiten establecer relaciones entre los abanicos medidos y sus vecinos.

De esta manera, entre la localidad de Punta Patillos y El Loa se realizaron las mediciones para 10 abanicos que se pueden ver en la Tabla 2. A partir de estos valores es posible construir gráficos que muestren la relación entre estas características morfométricas y compararlas con los modelos conocidos.

Tabla 2: Parámetros morfométricos para 8 abanicos seleccionados de la zona de estudio 1.

Código	Largo abanico [m]	Ancho abanico [m]	Pendiente de abanico [°]	Distancia desde ápice [m]	Área abanico [km2]	Largo cuenca aportante [m]	Ancho cuenca aportante [m]	Área cuenca aportante [km2]	Dif. Altura de cuenca aportante [m]	Pendiente Cuenca [°]
ZN-1-02	1318	668	13,4	912,2	0,44	1730	1363	1,01	700	22,03
ZN-1-03	508,9	318,16	17,7	600	0,067	1955	504,16	0,88	440	12,68
ZN-1-04	576	408	14	508,6	0,126	1652	525,7	0,47	510	17,16
ZN-1-05	933	1000	9,86	120	0,491	3501	1227	2,6	530	8,61
ZN-1-07	780,9	444,5	8,97	175,3	0,191	3185	571	1,35	580	10,32
ZN-1-08	903	424,9	8,9	109	0,215	1174	507	0,4	335	15,93
ZN-1-09	633	586,8	15,8	0	0,17	1124	542,1	0,297	270	13,51
ZN-1-10	817,5	827,2	7,26	223,5	0,36	1406,4	864,8	0,5	500	19,57

Es importante mencionar que, de los 10 abanicos estudiados, hubo algunos que se encontraban alterados por la erosión marina, característica particular de las zonas 1 y 2 del estudio, por lo que fueron descartados de la medición original.

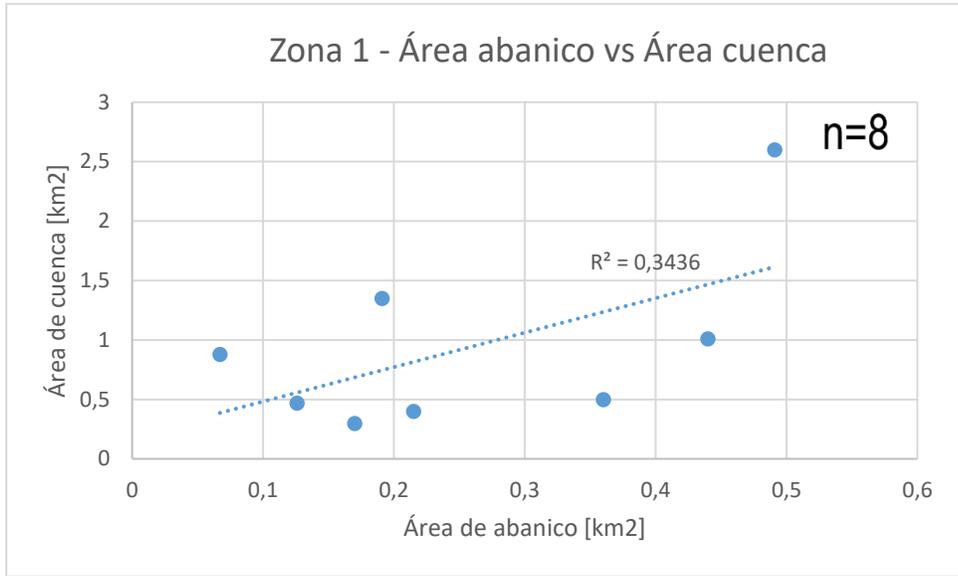


Figura 26: Gráfico de área de abanico aluvial vs área de cuenca aportante respectiva, para abanicos seleccionados de la Zona 1 de estudio.

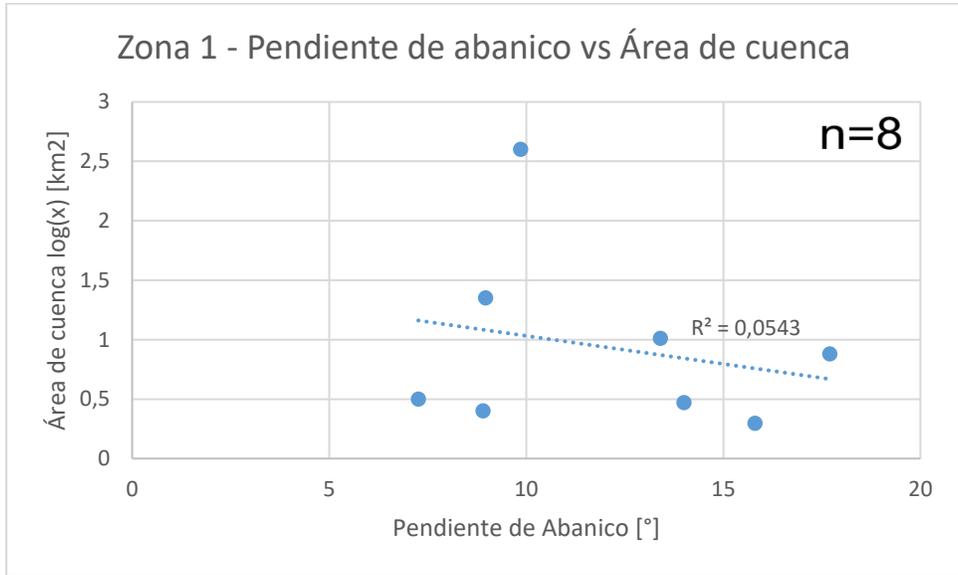


Figura 27: Gráfico de pendiente de abanico aluvial vs área de cuenca aportante respectiva, para abanicos seleccionados de la Zona 1 de estudio.

A priori es posible ver que las tendencias predichas sí se cumplen, aunque la dispersión de los datos no entrega un resultado demasiado confiable. En este caso las 10 mediciones de la zona 1 no son suficientes para aseverar la tendencia en los abanicos de la costa norte de Chile.

## 5.2.2. Zona 2: Paposo a Taltal

La zona 2, ubicada entre Paposo y Taltal, es de similares características que la zona 1. En particular estas dos zonas costeras son de las pocas que cuentan con área de depósito suficiente (menos restringida) para la formación de abanicos aluviales, además de ser abanicos más bien detríticos (distinto a lo que ocurre en sectores cercanos como Chañaral). La Tabla 3 muestra las mediciones que fue posible lograr, a partir de las observaciones de imágenes satelitales, donde se seleccionaron 8 abanicos.

Tabla 3: Parámetros morfométricos para 8 abanicos de la zona de estudio 2.

Código	Largo abanico [m]	Ancho abanico [m]	Pendiente de abanico [°]	Distancia desde ápice [m]	Área abanico [km2]	Largo cuenca aportante [m]	Ancho cuenca aportante [m]	Área cuenca aportante [km2]	Dif. Altura de cuenca aportante [m]
ZN-2-01	1860	1417,9	7,4	0	1,3	6375	2040	9,5	1350
ZN-2-02	2136	1646	6,9	0	1,57	4447	1653	4,18	1060
ZN-2-03	1323	1044	7,53	0	0,72	3704	1623	3,08	870
ZN-2-04	1578	646	12,82	0	0,4	2114	440	0,56	560
ZN-2-05	1660	774	10,6	0	0,6	1935	551	0,62	600
ZN-2-06	595	322	9,9	0	0,1	2723	1173	1,41	950
ZN-2-07	579	377	9,46	0	0,09	1298	631	0,37	660
ZN-2-08	1100	532	10,8	0	0,3	1508	761	0,36	560

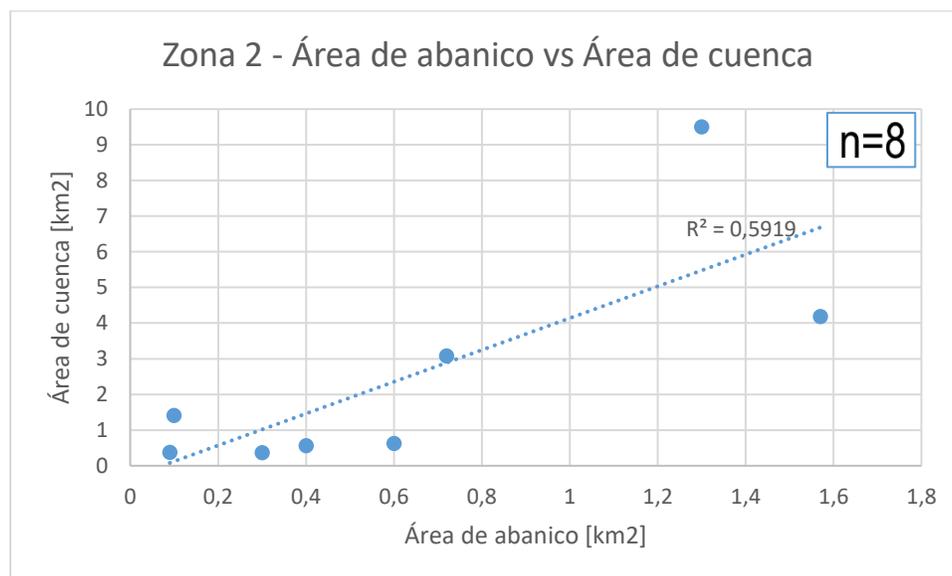


Figura 28: Gráfico de área de abanico aluvial vs área de cuenca aportante respectiva, para abanicos seleccionados de la Zona 2 de estudio.

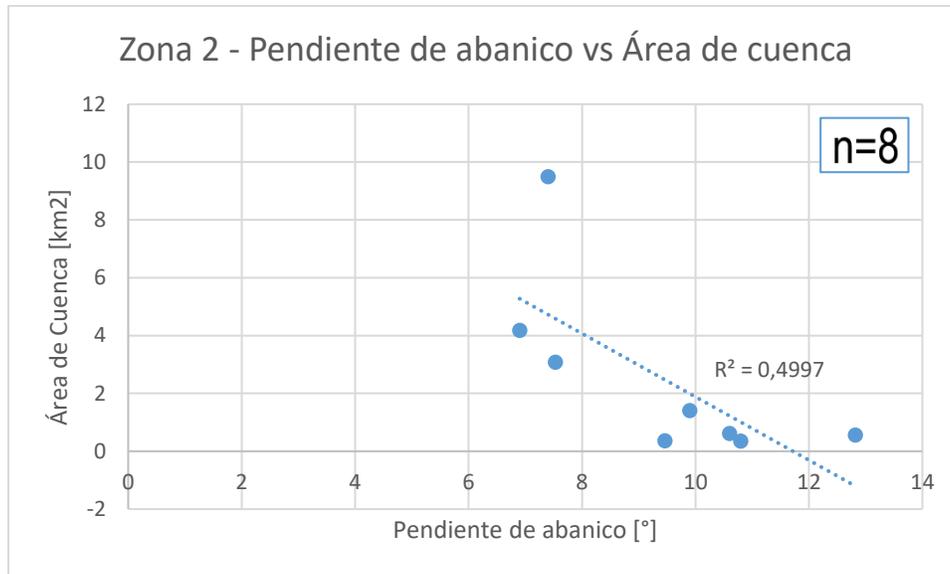


Figura 29: Gráfico de pendiente de abanico aluvial vs área de cuenca aportante respectiva, para abanicos seleccionados de la Zona 2 de estudio.

Tal y como se puede observar en la Figura 28 y Figura 29, las tendencias predichas se mantienen en los gráficos de las Figuras 26 y 27, aunque la dispersión de los datos no da la seguridad para aseverar que las tendencias son siempre ciertas en este tipo de ambientes.

De todas maneras, una forma de mejorar el análisis tomando en cuenta la similitud entre las dos zonas es graficar los datos de ambos sectores, respaldados en que el ambiente de depósito sigue siendo norte costero semiárido para ambas zonas.

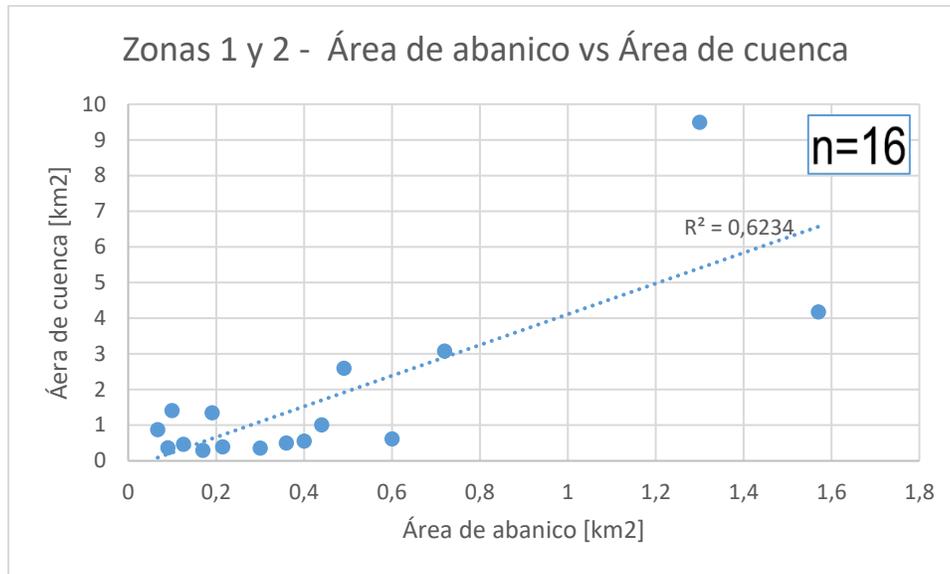


Figura 30: Gráfico de área de abanico aluvial vs área de cuenca aportante respectiva, para abanicos seleccionados de las Zonas 1 y 2 de estudio.

Con los datos obtenidos en ambos ambientes, bajo el criterio de que son similares en sus características geomorfológicas y climáticas, se obtiene un coeficiente de correlación más confiable y la relación área cuenca versus área de abanico se confirma.

### 5.2.3. Zona 3: Alto del Carmen

La zona 3 de estudio se encuentra en torno a la localidad de Alto del Carmen en la Región de Atacama. Esta zona se diferencia de las dos anteriores al encontrarse en la franja precordillerana y se compone de valles transversales, espacio donde los sedimentos de origen aluvial se depositan con mucha frecuencia. Tal vez el factor de mayor relevancia, además de la latitud es que, si bien en la costa las áreas de depósito eran poco frecuentes y no muy amplias, en el caso de los valles transversales de la cuenca de Huasco (así como en Elqui y Limarí), las áreas deposicionales son extremadamente reducidas y se encuentran en constante alteración producto de la circulación de ríos. Aquellas que no se encuentran afectadas recientemente por erosión fluvial son retrabajadas por obras civiles y de agricultura, lo que dificulta su observación y mediciones. A pesar de ello, es posible encontrar algunos abanicos aluviales sin alteración aparente, aunque los que se conservan son más recientes con superficies que no muestran evidencias de antigüedad como desarrollo de vegetación o intervención humana. En esta zona se seleccionaron 13 abanicos, en la tabla 4 se muestran sus parámetros.

Tabla 4: Parámetros morfométricos para 11 abanicos de la zona de estudio 3.

Código	Largo abanico [m]	Ancho abanico [m]	Pendiente de abanico [°]	Distancia desde ápice [m]	Área abanico [km <sup>2</sup> ]	Largo cuenca aportante [m]	Ancho cuenca aportante [m]	Área cuenca aportante [km <sup>2</sup> ]	Dif. Altura de cuenca aportante [m]	Pendiente Cuenca [°]
ZN-3-01	132,9	57,9	28,3	0	0,0046	448,1	133,7	0,035	270	31,07
ZN-3-02	314,48	316,4	9,8	0	0,041	4823,7	1292,9	3,33	1700	19,41
ZN-3-04	263,6	293,2	12,5	0	0,032	3210,7	945,4	1,606	1230	20,96
ZN-3-05	348,5	153,3	13,2	0	0,022	2854	1221,4	1,57	1240	23,48
ZN-3-06	252	285,5	15,8	0	0,041	1417,7	366,5	0,29	790	29,13
ZN-3-07	217,6	193,1	16,2	0	0,016	3865,9	1041	2,15	2650	34,43
ZN-3-08	960,4	428,1	7,6	0	0,13	5895,6	2271,9	7,9	1600	15,18
ZN-3-10	169,5	116,1	24,6	0	0,007	1033	272,4	0,19	690	33,74
ZN-3-11	92,1	171,3	17,2	417,4	0,006	3435,2	1073,8	1,4	1750	27,00
ZN-3-12	304	246,3	20,7	245,2	0,037	1488,2	404,56	0,3	990	33,63
ZN-3-13	295,2	291,9	8,6	0	0,036	3818,6	1699,6	3,68	1120	16,35

Como se puede observar en la Tabla 4, a pesar de las restricciones que implica la imposibilidad de determinar claramente cuáles de los abanicos se encuentran realmente conservados, es posible medir una serie de datos morfométricos para comparar de la misma manera que en los casos anteriores.

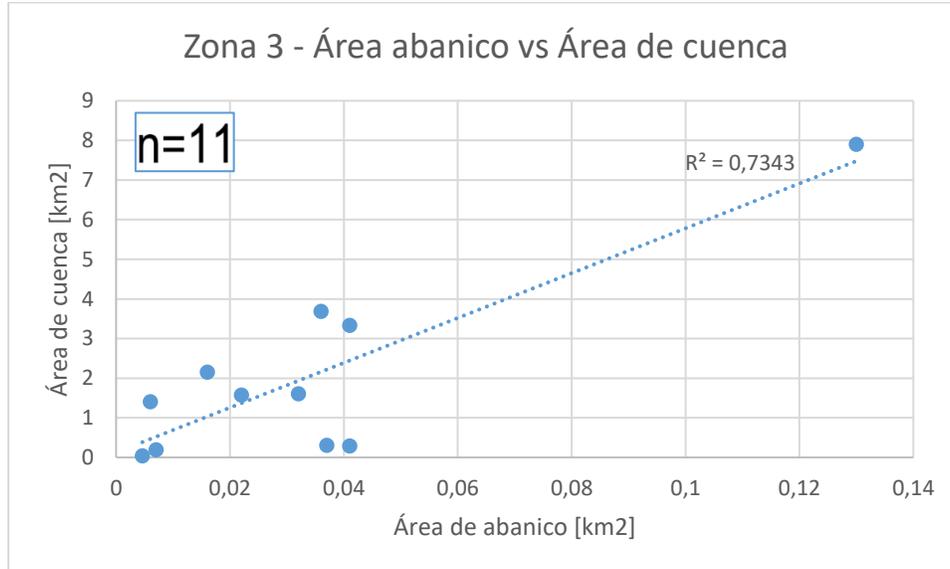


Figura 31: Gráfico de área de abanico aluvial vs área de cuenca aportante respectiva, para abanicos seleccionados de la Zona 3 de estudio.

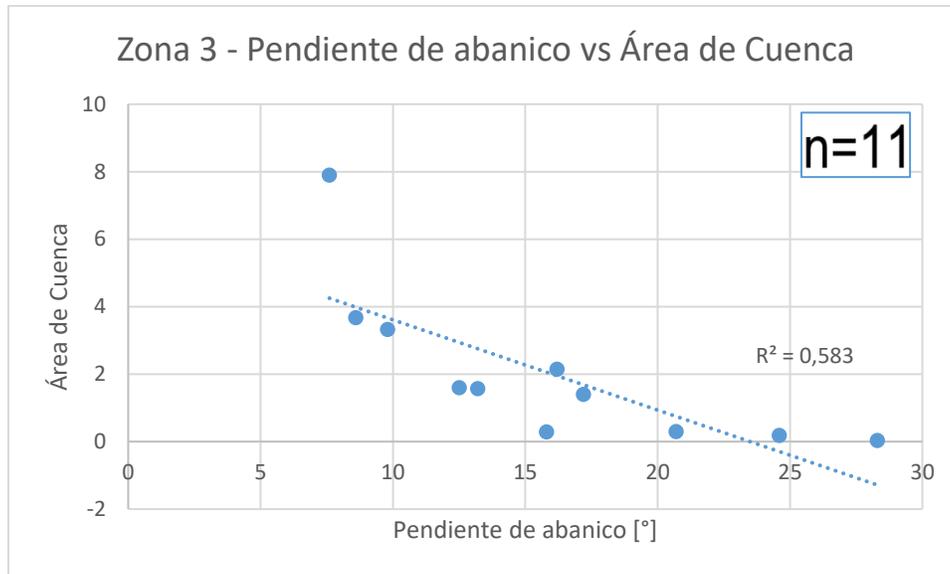


Figura 32: Gráfico de pendiente de abanico aluvial vs área de cuenca aportante respectiva, para abanicos seleccionados de la Zona 3 de estudio.

Como se puede ver en las figuras 31 y 32, la correlación de los datos de áreas de abanico y cuencas respectiva es más alta que en los casos anteriores lo que sugiere que, en primer lugar, los criterios de selección son más efectivos y las imágenes satelitales y mapas de elevación son certeros a la hora de seleccionar los abanicos más representativos. También para el caso de las pendientes de los abanicos, la relación inversa con las áreas de las cuencas marca una tendencia más precisa lo que indica que, bajo los criterios de selección, los abanicos aluviales de la zona 3 muestran una dependencia más significativa del tamaño de las cuencas aportantes. A pesar de ello, la variable de mayor relevancia parece seguir siendo el espacio de acomodación para el depósito de sedimentos.

#### 5.2.4. Zona 4: Elqui

La zona 4 de estudio se encuentra ubicada en la provincia de Elqui de la región de Coquimbo. Al igual que la zona 3, este sector corresponde a la precordillera y los depósitos seleccionados se ubican en los valles transversales de la cuenca de Elqui. De la misma manera que en la zona anterior, los espacios de depósito de los sedimentos aluviales son escasos y se ven frecuentemente erosionados por la actividad fluvial.

Considerando que la zona 4 se encuentra más al sur, es claro que los efectos climáticos parecen influir de mayor manera en los flujos haciendo que la erosión de

los ríos sea más potente y los abanicos aluviales sean más escasos que en los casos anteriores. Este último factor dificulta de manera considerable la selección de abanicos que cumplan los criterios propuestos, incluso aún más que los que se ubican en la zona 3.

Además del aumento en la erosión fluvial, los abanicos más potentes y de mayor extensión se encuentran modificados por la presencia de construcciones y agricultura en mayor medida que en Alto del Carmen. A pesar de ello, es posible reconocer algunos abanicos conservados, aunque sus medidas son posiblemente las menos confiables de todos los sectores de estudio. Mismo caso ocurre con la Zona 5 por lo que, para efectos gráficos y estadísticos, en muchos casos las mediciones de ambas zonas (4 y 5) serán consideradas dentro del mismo grupo, ya que por la cercanía de estos dos sectores y la similitud de los valles que las conforman permiten encontrar elementos que pueden ubicarse en la misma clasificación. Se seleccionaron 7 y 5 abanicos, respectivamente.

Tabla 5: Parámetros morfométricos para 12 abanicos seleccionados de las zonas de estudio 4 y 5.

Código	Largo abanico [m]	Ancho abanico [m]	Pendiente de abanico [°]	Distancia desde ápice [m]	Área abanico [km2]	Largo cuenca aportante [m]	Ancho cuenca aportante [m]	Área cuenca aportante [km2]	Dif. Altura de cuenca aportante [m]	Pendiente Cuenca [°]
ZN-4-01	404,7	357,1	23,9	0	0,035	1250,3	244,2	0,15	760	31,29
ZN-4-02	267,8	242,3	23,4	0	0,022	1827	519,9	0,43	1100	31,05
ZN-4-03	577	349,5	14,5	0	0,061	4847,2	1393,8	4,11	2410	26,44
ZN-4-04	235,1	168,9	22,9	0	0,012	1185,6	524,2	0,33	850	35,64
ZN-4-05	624,2	220,6	18,1	0	0,044	3629,3	1101	1,89	1750	25,74
ZN-4-06	332,6	236,9	20,2	0	0,029	1191,4	319,3	0,22	680	29,72
ZN-4-07	700,8	292,4	18,5	0	0,079	1069,3	328,4	0,19	550	27,22
ZN-5-01	318,1	161,9	7,6	0	0,023	1146,6	637,3	0,36	480	22,72
ZN-5-02	190,6	136,8	26,5	0	0,01	1387	400,9	0,32	850	31,50
ZN-5-03	874,1	884,7	6,7	0	0,2	6992,7	4041,5	11,78	2100	16,72
ZN-5-04	430,22	680,2	12,2	305	0,13	3096,5	1121,8	1,72	1380	24,02
ZN-5-05	478,3	285,8	16,8	186	0,05	1519,7	358,6	0,32	780	27,17

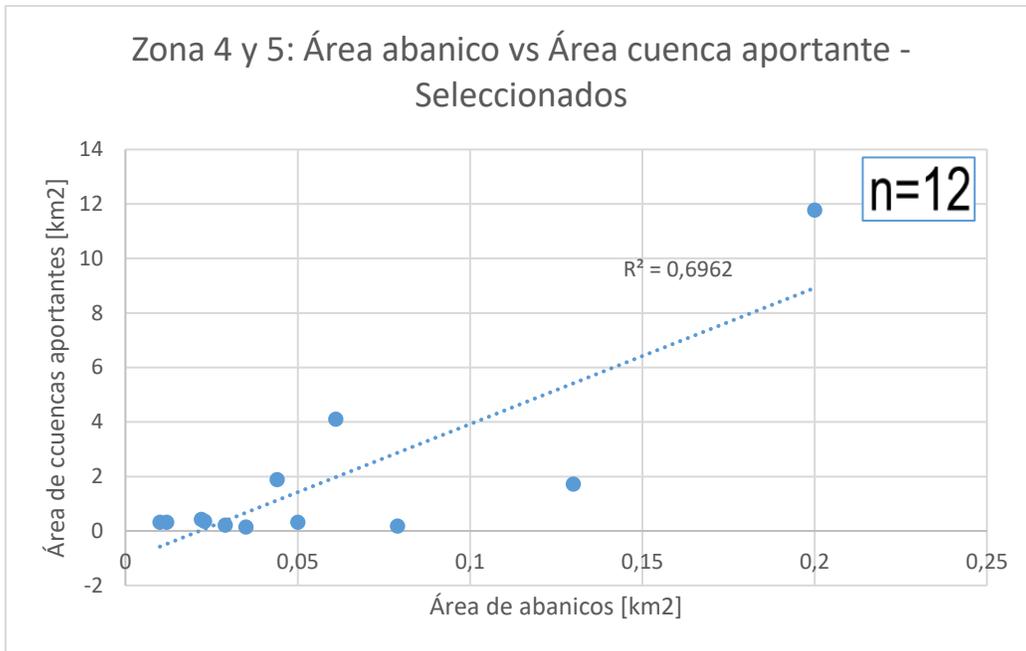


Figura 33: Gráfico de área de abanico aluvial vs área de cuenca aportante respectiva, para abanicos seleccionados de las Zonas 4 y 5 de estudio.

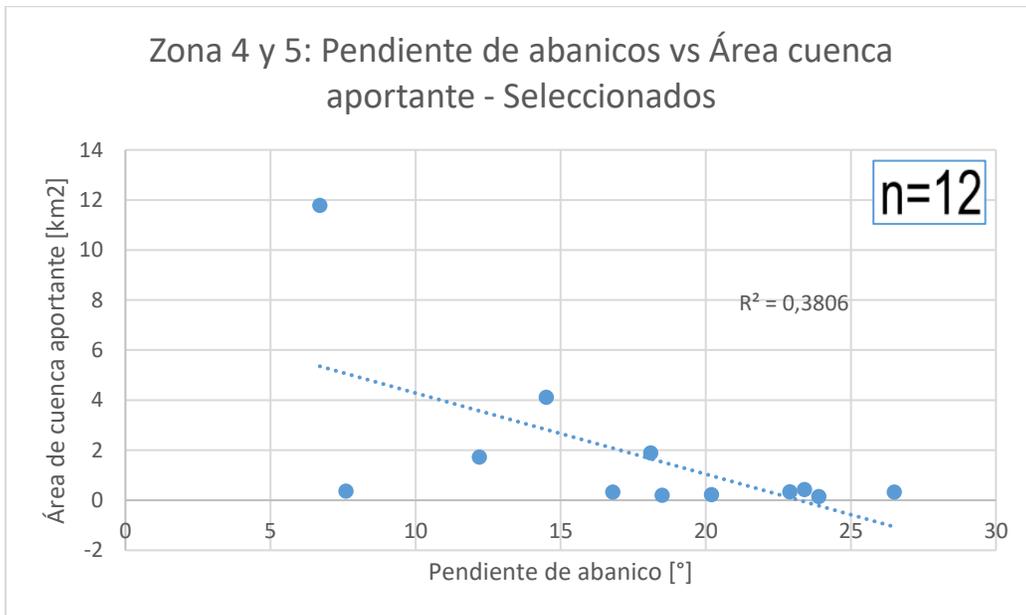


Figura 34: Gráfico de pendiente de abanico aluvial vs área de cuenca aportante respectiva, para abanicos seleccionados de las Zonas 4 y 5 de estudio.

Las Figuras 29 y 30 indican que existe una buena correlación directa de los datos de las zonas 4 y 5, extraídos de la Tabla 5, cuando se analizan en conjunto. A pesar de ello, La dispersión es importante y la tendencia de los gráficos debe entenderse de la misma manera que en el caso de la zona 3, donde el factor de mayor incidencia en el desarrollo de abanicos aluviales para estas zonas es el espacio de depósito disponible entre la desembocadura de sedimento desde las laderas y el margen erosivo que representan los ríos de estos valles transversales.

### 5.2.5.Zona 5: Limarí

La zona 5 corresponde a los valles precordilleranos que se ubican en la provincia de Limarí, en la región de Coquimbo. Al este de Ovalle se puede encontrar un escenario similar a lo que ocurre en la zona 4, con valles angostos y depósitos aluviales en las laderas de los valles que se ven enfrentados a la erosión fluvial de los ríos de la cuenca de Limarí. Como se ha mencionado previamente, es difícil encontrar abanicos aluviales que cumplan con las condiciones de estudio debido al poco espacio de depósito y a la erosión constante. Esto es aún más notable en sectores habitados, donde estos no se conservan por influencia humana.

A partir de la Figura 33 de los 12 abanicos seleccionados para las zonas 4 y 5 se desprende que existe una clara relación directa entre área de abanicos y área de cuencas de la misma manera que en los casos anteriores que utilizan datos “seleccionados”. Por otro lado, en el caso de la relación entre las pendientes de los abanicos y las áreas de las cuencas de aporte de sedimentos, existe una proporcionalidad inversa también vista en los datos de abanicos seleccionados de todas las zonas de estudio.

### 5.3. Abanicos no seleccionados por zona

Para complementar la información entregada por los datos seleccionados, también se realizó una medición de los abanicos que producto de los criterios de selección corresponden al grupo de los no seleccionados. El objetivo de este análisis es comprobar si, a pesar de considerarse estos abanicos como incompletos y/o alterados, los abanicos aluviales no seleccionados de cada una de las zonas muestran un comportamiento similar a los seleccionados en algunos aspectos.

Se presume que el encontrarse ubicados en las mismas regiones no implica que su comportamiento sea similar, dado que las áreas y pendientes de abanicos y cuencas aportantes dependen directamente de que cada depósito particular refleje completamente los procesos deposicionales y de sedimentación, condición que no

se cumple si los abanicos no seleccionados son secciones incompletas de abanicos generados por procesos de remociones previos a las condiciones de erosión actuales.

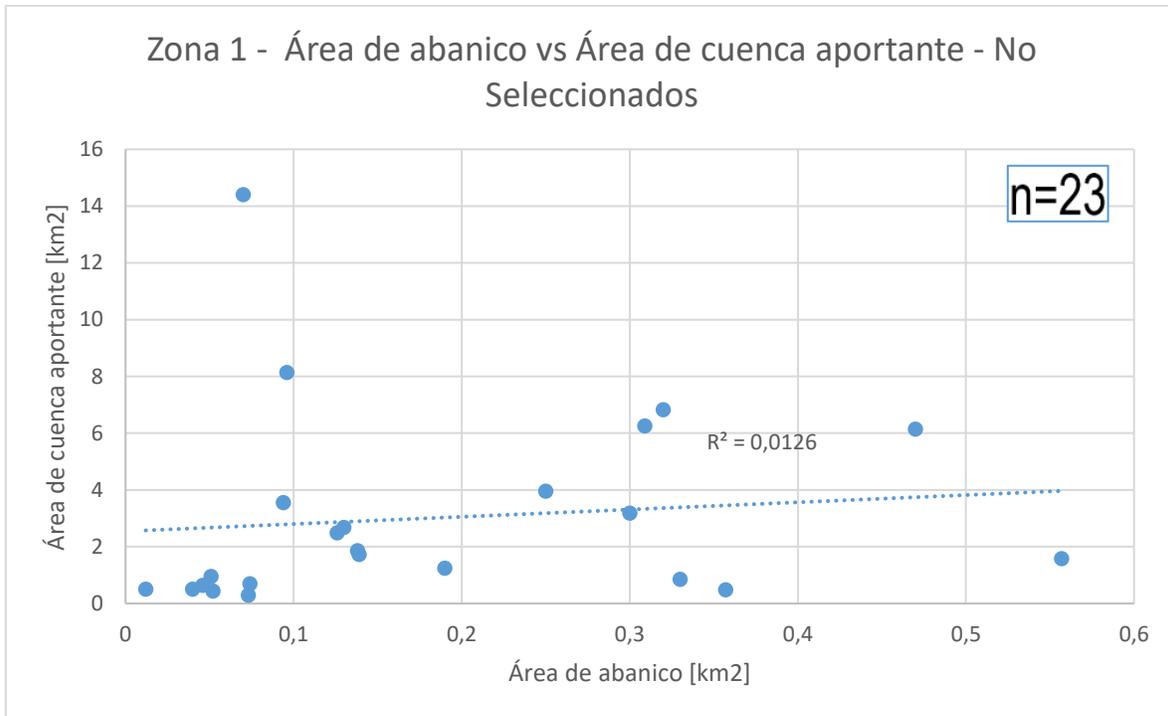


Figura 35: Gráfico de área de abanico vs área de cuenca aportante para los abanicos aluviales no seleccionados de la zona 1.

Como se puede ver en la Figura 35, los datos obtenidos de los 23 abanicos no seleccionados de la zona 1 muestran una gran dispersión y, por lo tanto, un coeficiente de correlación muy bajo (menor a 0,05). Los datos de esta zona y de las 4 siguientes muestran dispersiones altas que impiden determinar tendencias marcadas. Dicho de otra manera, no es posible determinar si el comportamiento de los abanicos no seleccionados es similar o distinto a las tendencias marcadas de los abanicos seleccionados.

Otro punto para considerar en este análisis es que, si los datos no seleccionados mostraran una tendencia marcada distinta a lo que se ve en los seleccionados, esta se podría asociar a procesos deposicionales más antiguos que, de todas maneras, escapan del objetivo principal de este estudio, pero dan pie a una nueva investigación en base a los descartados.

Al mantener todos los datos de los abanicos aluviales medidos bajo el primer criterio de selección (capítulo 3.4), las correlaciones de los datos no seleccionados por zona no superan un  $R^2$  de 0,26. Al corregir algunos de los valores más extremos, se obtienen valores de correlación similares y con una tendencia similar a los abanicos seleccionados. Tomando como ejemplo el caso de los abanicos de la zona 2 (ver Figura 36), se observa que el comportamiento de los dos sets de datos es similar

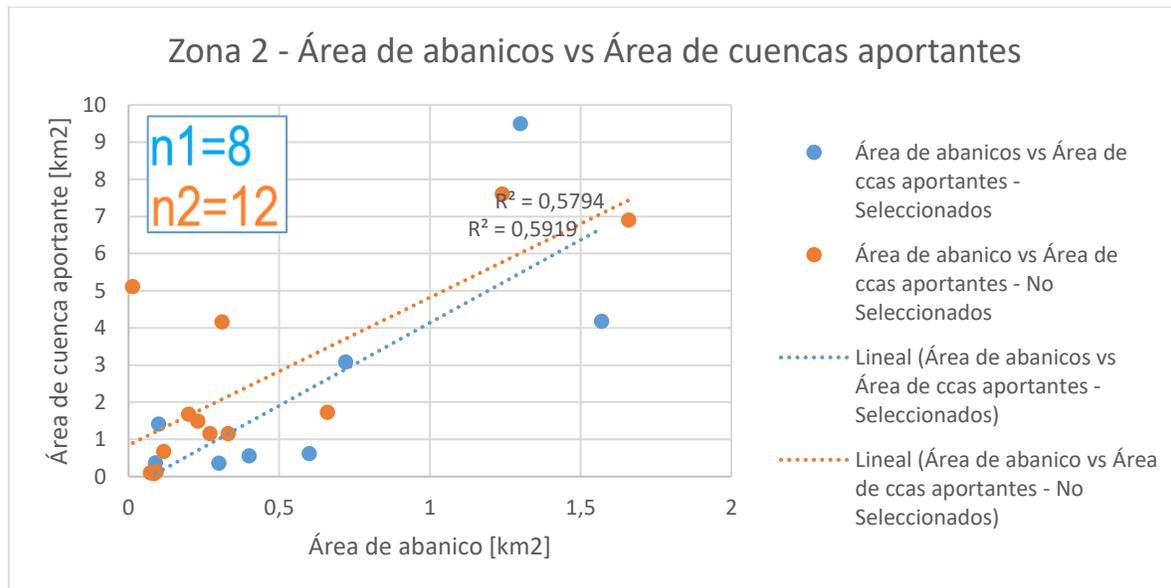


Figura 36: Gráficos de área de abanico vs área de cuenca aportante para abanicos seleccionados de zona 2 y abanicos no seleccionados, con corrección de datos, de la zona 2.

Este gráfico sirve para reafirmar la idea de que los criterios de selección mejoran la correlación de los datos y permiten evaluar comportamientos de los abanicos de una zona en particular a nivel general. Por otro lado, no es claro si los abanicos seleccionados de otras zonas tendrán un comportamiento similar o distinto, ya que aún con la corrección de los valores aberrantes las dispersiones siguen siendo muy altas y difíciles de interpretar.

La delimitación de los abanicos no seleccionados y la composición litológica de las cuencas de drenaje respectivas se encuentran en los Anexos A-6, A-7, A-8, A-9 y A-10. De la misma manera, la medición de parámetros morfométricos para cada uno de los abanicos aluviales no seleccionados se encuentra en el Anexo B.

#### 5.4. Clasificación de Abanicos Aluviales

Como parte de la investigación, considerando las mediciones e interpretaciones de los abanicos vistos en cada una de las zonas de estudio, se han agrupado los

distintos tipos de abanicos en tres clasificaciones mayores que permitan enlazar los parámetros morfométricos, características geomorfológicas dominantes y otras variables geográficas determinantes en ellos. La primera clasificación se describe de la siguiente manera:

#### 5.4.1. Clasificación I: Abanicos aluviales costeros del norte de Chile

Este caso corresponde a los abanicos que se encuentran ubicados entre el acantilado costero y la línea de costa, en la zona norte de Chile. Específicamente, estos abanicos corresponden a los marcados en las zonas 1 y 2 del estudio. En primer lugar, el criterio de caracterización principal para este caso es la ubicación geográfica que para las zonas 1 y 2 se ubican entre las latitudes  $21^{\circ}00' S - 21^{\circ}42' S$  y  $24^{\circ}30' S - 25^{\circ}17' S$  respectivamente. Si bien, para la caracterización de abanicos aluviales se admite y evidencia que existe una variación considerable con el cambio de latitud, en este caso los abanicos aluviales para las zonas 1 y 2 son de características muy similares, sobre todo en las más determinantes como las áreas y pendientes de los abanicos y sus cuencas aportantes respectivas. Las diferencias generales entre ambos grupos serán notadas, pero manteniendo la noción de una clasificación única para los dos casos.

De acuerdo con lo que se puede interpretar a partir de la medición de parámetros morfométricos, para el caso de los abanicos de norte costero, existe una clara relación directa entre el área de los abanicos y el área de sus cuencas respectivas. Esto ocurre tanto para abanicos seleccionados como para abanicos no seleccionados. Si bien, los coeficientes de correlación en las regresiones lineales de los datos indican valores que no son absolutamente confiables ( $R^2$  de abanicos zona 1 es de 0,34 y  $R^2$  de abanicos de zona 2 es de 0,59), se debe considerar que la magnitud de la dispersión de los datos se encuentra dentro de lo esperable dadas las condiciones de depósito de los sedimentos y las limitantes metodológicas, punto que será abordado con más detalle en la sección de discusiones de la investigación. Debe entenderse en este caso que un índice inferior a 0,5 es bajo, mientras que uno entre 0,5 hacia arriba es de moderado a alto.

Al estudiar las líneas de tendencia en regresiones lineales para los datos seleccionados de todas las zonas, es posible identificar una tendencia que separa en dos grupos las mediciones. Como se puede observar en la Figura 37, los datos seleccionados de zonas 1 y 2 se ubican en la misma zona del gráfico mientras que los de las zonas 3, 4 y 5 (también seleccionados) con una tendencia también marcada pero distinta a las primeras dos.

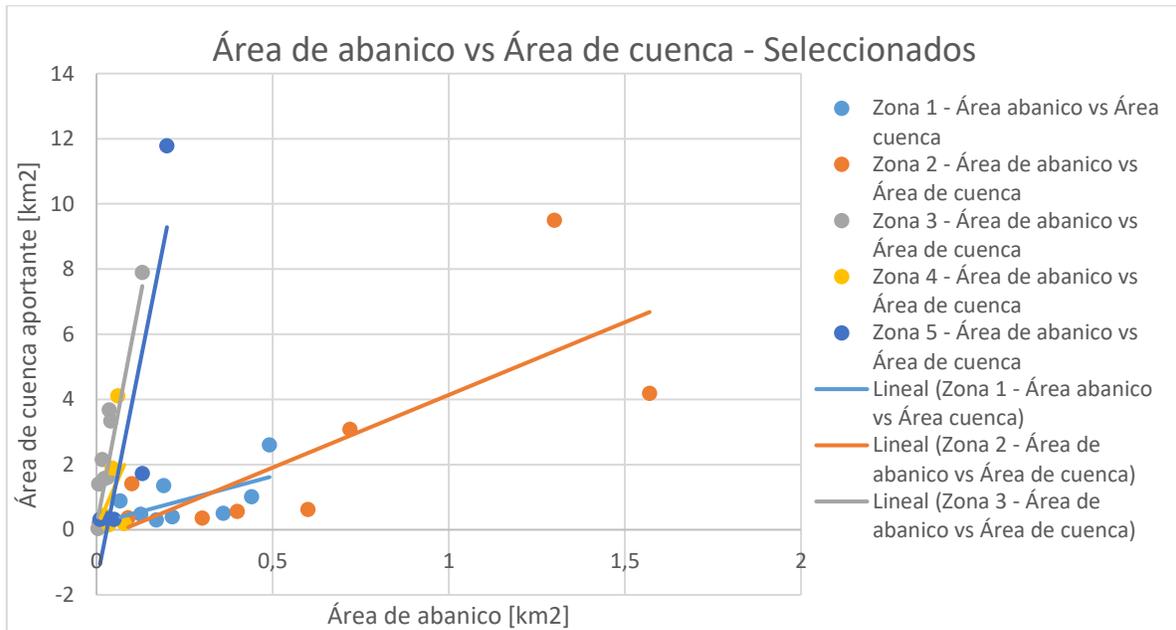


Figura 37: Gráfico de área de abanico vs área de cuencas aportantes respectiva de los abanicos seleccionados de las 5 zonas de estudio.

De acuerdo con la relación de áreas de abanicos y cuencas aportantes, se observa que para los casos de las zonas 1 y 2 las áreas de los abanicos varían más significativamente con respecto a las áreas de las cuencas aportantes. Posiblemente, el factor de mayor relevancia y el que marca esta diferencia entre ambas tendencias es el espacio de sedimentación de los depósitos, que para esta clasificación es mayor que para los depósitos aluviales de la precordillera.

Como se ha mencionado en varias ocasiones previas, la zona de depósito de abanicos costeros se encuentra acotada por el borde costero, aunque en los casos relevantes, como los que se cuentan en este gráfico, los criterios de selección permiten trabajar únicamente con los abanicos completos y que poseen áreas que no exceden el espacio de depósito, aun cuando las áreas de cuencas aportantes sean mayores. En otras palabras, aquellos abanicos formados a partir de cuencas aportantes de gran tamaño son aquellos que cuentan con el espacio de depósito necesario para su desarrollo y preservación.

Otro factor relevante para este tipo de abanicos es que, en las zonas 1 y 2 los asentamientos humanos son escasos, por lo que el factor de alteración de depósitos

por intervención urbana no es importante y no se ve reflejado en las mediciones, como sí ocurre en los casos de las zonas 3,4 y 5.

Con respecto a otros parámetros morfométricos, el estudio de la pendiente de los abanicos resulta la segunda relación más importante para abanicos y cuencas aportantes. Existe una relación inversa entre la pendiente de un abanico aluvial y el área de su respectiva cuenca aportante. Esta relación establecida por varios autores (Bull, 1964;Hooke, 1968) se cumple en todas las zonas de estudio, aunque con variaciones importantes asociadas a los cambios litológicos, factor que será detallado posteriormente.

Los abanicos de las zonas 1 y 2 tienen pendientes que varían en torno a los 10° promedio, un punto que es muy importante considerando que las variaciones de pendiente para los abanicos precordilleranos ocurren en torno a los 16°. Con respecto a los abanicos no seleccionados, la pendiente varía en torno a 11,5°, aunque con una dispersión más alta producto de la no utilización de los criterios de selección previamente descritos. Este será un punto relevante para más de una zona de estudio, aunque la existencia de estos datos permite caracterizar de mejor manera el contexto de depósito y las condiciones de sedimentación dominantes en cada caso.

Con respecto a la geología predominante, las cuencas aportantes de los abanicos seleccionados están conformadas principalmente por afloramientos de la Formación La Negra y por intrusivos dioríticos y granodioríticos indiferenciados, de acuerdo con la información de mapeo geológico indicada en la Hoja Quillagua de la Carta Geológica de Chile (Skarmeta M., J. ; Marinovic S., 1981). La Formación La Negra está compuesta principalmente por rocas volcánicas andesíticas amigdaloidales y se encuentra ocasionalmente intercalada de unidades sedimentarias marinas. Estas rocas volcánicas jurásicas y las cretácicas granodioríticas sugieren que, bajo condiciones de transporte de sedimentos regulares, los depósitos aluviales serán predominantemente clásticas y, por lo tanto, del interés de esta investigación. La composición litológica de cada una de las cuencas se puede observar en los Anexos A-1 y A-2.

A pesar de que, dada la metodología utilizada, no es posible caracterizar detalladamente cada uno de los depósitos aluviales estudiados en esta investigación, existen trabajos previos que permiten analizar índices de erodabilidad por litología a gran escala (Moosdorf *et al*, 2018), lo que facilita la diferenciación de las zonas de estudio de acuerdo a la composición litológica de las cuencas aportantes. En el caso de los abanicos costeros, las cuencas siguen un comportamiento similar a los depósitos de Sierra Nevada en Estados Unidos (en base a pendientes promedio y litologías asociadas), lo que indica un índice de

erodibilidad de 1 para rocas plutónicas de ácidas a intermedias (factor de normalización) y de 1.3 para volcánicas intermedias (ver Tabla 6). Por sí solos, estos índices no entregan mucha información, pero quedarán como un factor más de la caracterización de este tipo de abanicos.

Tabla 6: Índices de erodibilidad globales para litologías en zonas con tasa de alzamiento baja.

Región	Tasa de alzamiento	Rango de alzamiento	Pendiente promedio	Índice de erodibilidad (sin unidad)										
				mt	pa+	pb	sc	sm	ss	sssh	ssss	su	va	vb+
Alpes	baja	<1	20.6	0.8	1*	0.8								
Himalaya	baja	<1	25.8	1.1	1*	1.1	1.0	1.0	1.6	1.2	1.2	5.1	1.0	1.1
Mediterraneo	baja	<1	11.3	0.9	1*	0.6	0.9	1.4	1.4		0.8	2.7		
Sierra Nevada	baja	<0.5	10.8	0.8	1*	1.0	0.8	1.2	1.0	1.0	1.5	3.3	1.1	1.3
Taiwan MT	baja	<10	19.1	1*		2.4		1.1	1.7	1.5		3.5		1.3

mt: Rocas metamórficas, principalmente gneiss.

pa+: rocas plutónicas ácidas e intermedias, principalmente granito y sienita

sc: rocas sedimentarias ricas en carbonato, principalmente caliza y dolomita.

sm: rocas sedimentarias mezclas de carbonato y siliciclásticas.

ss: rocas sedimentarias siliciclásticas, mezclas o tamaño de grano desconocido.

sssh: rocas sedimentarias siliciclásticas, grano fino, principalmente limolita o esquistos finos.

ssss: rocas sedimentarias siliciclásticas, grano grueso, principalmente arenisca o conglomerado.

su: rocas sedimentarias no consolidadas, todos los tamaños de grano.

va: rocas volcánicas ácidas, principalmente riolita.

vb+: rocas volcánicas básicas e intermedias, principalmente basalto y andesita.

\*: clase litológica usada para normalizar, el índice de erodibilidad es 1 por definición.

Volviendo a las características morfométricas de los abanicos costeros del norte de Chile, los depósitos tienden a ser alargados. Para los abanicos seleccionados ocurre casi en todos los casos, mientras que para los abanicos no seleccionados el resultado tiende a variar en mayor medida. En promedio, el largo de los abanicos aluviales de las zonas 1 y 2 es un 60% mayor que el ancho tanto para abanicos seleccionados como no seleccionados.

Existen correlaciones entre algunos de los parámetros morfométricos que se dan en todos los casos, por lo que el análisis de aquellos no es relevante a la hora de marcar diferencias entre una y otra clasificación. Estos casos son, por ejemplo, las correlaciones directas entre el largo y el área de los abanicos, así como también el ancho y el área de los abanicos. Mismo caso ocurre para las cuencas aportantes, donde largo y ancho son directamente proporcionales al área de la cuenca respectiva. A pesar de ello, se distinguen ciertas diferencias de tamaño, donde algunas cuencas superan el área promedio, que serán marcadas cuando sea pertinente.

Con respecto a los abanicos costeros, el área parece estar mayormente influenciada por el ancho de los abanicos más que por su largo, aunque la condición relevante para este tipo de análisis se encuentra en la geometría de los depósitos, es decir, la relación entre largos y anchos de los abanicos aluviales en su conjunto para cada zona.

#### 5.4.2. Clasificación II: Abanicos aluviales de valles transversales en zonas semiáridas

La segunda clasificación corresponde a la de abanicos aluviales de valles transversales en zonas dominadas por clima semiárido. Es importante hacer la mención de que, tanto esta como la clasificación III, corresponden a sectores precordilleranos de condiciones similares. Sin embargo, los abanicos aluviales que se incluyen en la presente clasificación se desarrollan en un ambiente exclusivamente semiárido, con las condiciones climáticas y geológicas que las latitudes de este dominio climático representan.

La clasificación II, que define los abanicos aluviales precordilleranos encontrados en la zona 3 de estudio, agrupa a aquellos que se depositan en los valles transversales de la cuenca de Huasco, específicamente en los alrededores de la localidad de Alto del Carmen entre latitudes 28°44' S - 29°00' S y longitudes 70°00' W - 70°30' W.

Al igual que en la clasificación I, la relación morfométrica más importante corresponde a la relación directa de área de abanicos y área de las cuencas aportantes respectivas. Estudiando los datos obtenidos de los abanicos seleccionados en el sector se obtiene la correlación de datos más alta de este estudio con un coeficiente de correlación de 0.74, valor que se ha considerado como confiable a partir de los parámetros (mayores a 0,5) expuestos en esta investigación y que se asocia a lo efectivo del criterio de selección para este tipo de casos. Posiblemente, esta regularidad se debe a que los abanicos aluviales completos distinguidos en base a los criterios de selección son de igual o mayor tamaño a lo observado, mientras que los pulsos más frecuentes se ajustan al espacio de depósito disponible.

La clasificación II alberga a los abanicos aluviales que se ubican en el segundo grupo de datos del gráfico área de abanico versus área de cuenca aportante (ver Figura 37). Al observar la figura 37 se desprende que, a diferencia de los abanicos agrupados en la clasificación I, los de la clasificación II presentan áreas de cuencas aportantes con mayor variación que las áreas de abanicos. El área de los abanicos

aluviales es más estable por el espacio disponible para el depósito de sedimentos. Las laderas de los valles transversales se encuentran en constante actividad, por lo que los abanicos aluviales que superan el espacio de depósito disponible no se conservan producto de la erosión fluvial. La diferencia de condiciones entre los abanicos costeros y precordillerano será abordada en la sección de discusiones.

Como ocurre en todas las zonas precordilleranas estudiadas en esta investigación, los abanicos de valles transversales se encuentran en contacto con asentamientos urbanos. Esto implica que los pulsos detríticos más recientes que se depositan en torno a los sectores de influencia humana son alterados rápidamente, ya sea con el traslado de los sedimentos a sectores libres de ocupación o con la modificación de los depósitos para trabajos agrícolas. Estos depósitos aluviales se evidencian y analizan en el apartado de abanicos no seleccionados, entregando valores de mayor dispersión y que en la mayoría de los casos se encuentran incompletos.

Volviendo a los datos morfométricos, la pendiente de los abanicos seleccionados varía en torno a los  $15.8^\circ$ , lo que se considera alta pendiente en comparación con los abanicos de la clasificación I. Esta diferencia se explica por laderas de pendiente mucho más empinada (de  $16^\circ$  a  $25^\circ$ , promedio), así como también porque abanicos que no sobrepasen la zona de depósito disponible deben ser de mayor pendiente para contener un volumen de sedimentos relativo a las cuencas aportantes (Campbell, 1975). Desde luego, otro factor que influye directamente en las pendientes de los abanicos es la litología que, dependiendo del grado de erodibilidad en las litologías de la cuenca aportante, permitirá el aporte de mayor cantidad de sedimentos y de si estos son transportables eficientemente hasta el depósito aluvial.

La geología predominante en las cuencas aportantes corresponden a tonalitas, granodioritas y dioritas de la Unidad Guanta, sucesiones volcánicas andesíticas de la Unidad Estratos del Verraco, esquistos cuarzo-muscovíticos del Complejo Metamórfico El Tránsito y dioritas cuarcíferas de los Dioritoides Cerro los dos José. Todas estas unidades geológicas de acuerdo al mapeo geológico de la Hoja Guanta (Nasi y Moscoso, 1986) y la Hoja El Tránsito (Moscoso *et al.*, 2010) publicadas en la Carta Geológica de Chile por el Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN). Las rocas plutónicas y volcánicas en este caso poseen índices de erodibilidad de 1 y 1.3, respectivamente. Adicionalmente a esto, las rocas metamórficas presentan un índice de 0.9 y 1.5 (ver Tabla 6) para las graníticas básicas de la unidad Guanta (Moosdorf *et al.*, 2018). La composición geológica de cada una de las cuencas se puede observar en el Anexo A-3.

Los valores morfométricos de largo y ancho para los abanicos indican depósitos más bien alargados, con abanicos aluviales un 36% más largos que anchos, para

abanicos seleccionados. Sin embargo, al considerar los abanicos no seleccionados los resultados indican depósitos aluviales más regulares, con un largo superior en 17% al ancho. Este dato es relevante si se considera que los abanicos de la clasificación II son claramente más pequeños que los anteriores. En este caso, las áreas de los abanicos varían en torno a los 0.034 km<sup>2</sup>, mientras que los de la clasificación I son un orden de magnitud más grandes.

#### 5.4.3. Clasificación III: Abanicos aluviales de valles transversales en zonas de transición de clima semiárido a húmedo.

Esta clasificación agrupa los abanicos aluviales precordilleranos de las zonas 4 y 5 del estudio. Estos pertenecen al dominio climático semiárido del norte de Chile, aunque dada su ubicación geográfica, se encuentran expuestos a mayores variaciones climáticas que las clasificaciones anteriores. Los abanicos que se encuentran en las provincias de Elqui y Limarí evidencian este cambio en la actividad fluvial de los valles, con ríos activos que erosionan con mayor frecuencia e intensidad los depósitos adyacentes a las laderas.

Específicamente, los valles estudiados en la zona 4 se encuentra en torno a la latitud 30°S y longitudes 70°29'W - 70°49'W, mientras que los de la zona 5 se encuentran en torno a la latitud 30°42'S y las longitudes 70°42'W - 71°03'W. Dada la cercanía entre las dos zonas de estudio resulta casi intuitivo el agruparlas dentro del mismo sector, aunque esta decisión se respalda en las similitudes geológicas, climáticas y de procesos de depósito aluvial.

Al igual que en los casos anteriores, existe una clara relación directa entre el área de los abanicos y el área de las cuencas aportantes (ver Figura 33), con un coeficiente de correlación lineal de 0.69, lo que es considerado como una correlación de moderada a alta. Esta regularidad en las mediciones se encuentra respaldada por los criterios de selección que permiten trabajar únicamente con los abanicos completos y sin evidencias de alteración significativa.

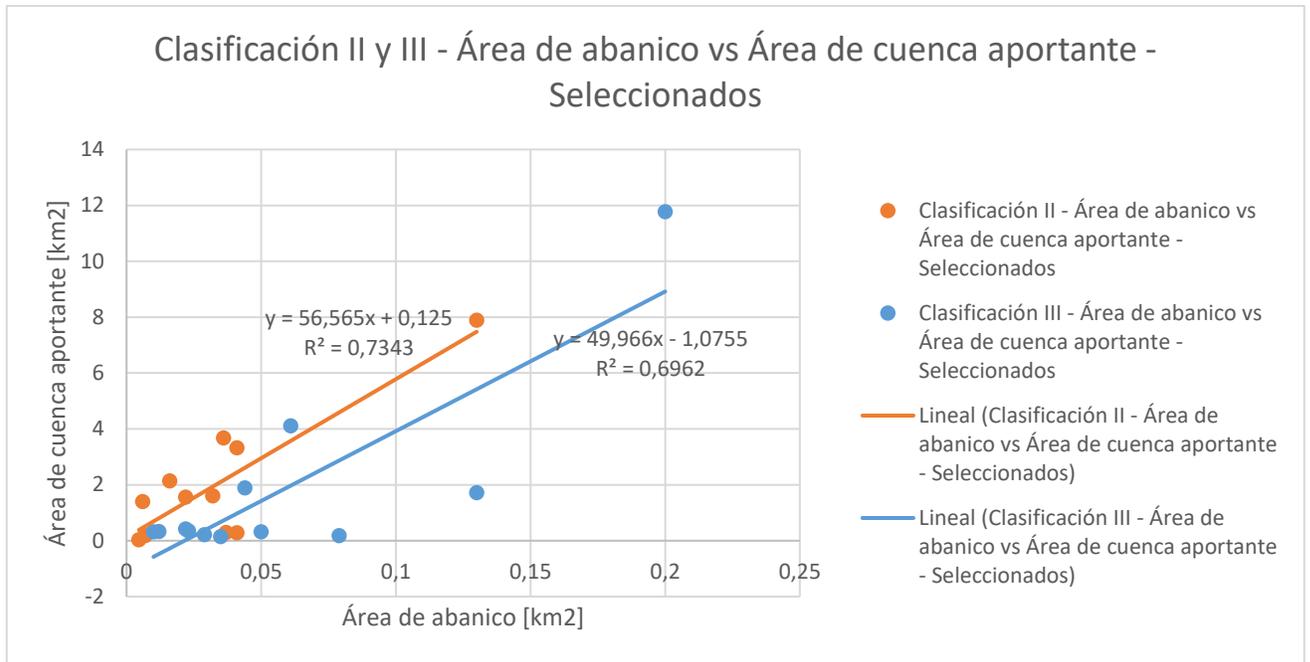


Figura 38: Gráfico de área de abanico vs área de cuenca aportante para los abanicos aluviales de las clasificaciones II y III.

Como se observa en la Figura 38, las líneas de tendencia tienen un comportamiento similar, aunque es claro que las cuencas de las zonas 4 y 5 que se muestran en la clasificación III tienen menor tamaño relativo a abanicos de tamaños similares en la clasificación II. Esta diferencia puede explicarse por la relación inversa existente entre la pendiente de los abanicos y el área de las cuencas aportantes que se observa en la Figura 39. La pendiente de los abanicos de la clasificación III varía en torno a los 17,6°, lo que tiene sentido si se considera que el espacio de depósito es menor en los valles de Elqui y Limarí, producto de una mayor actividad fluvial.

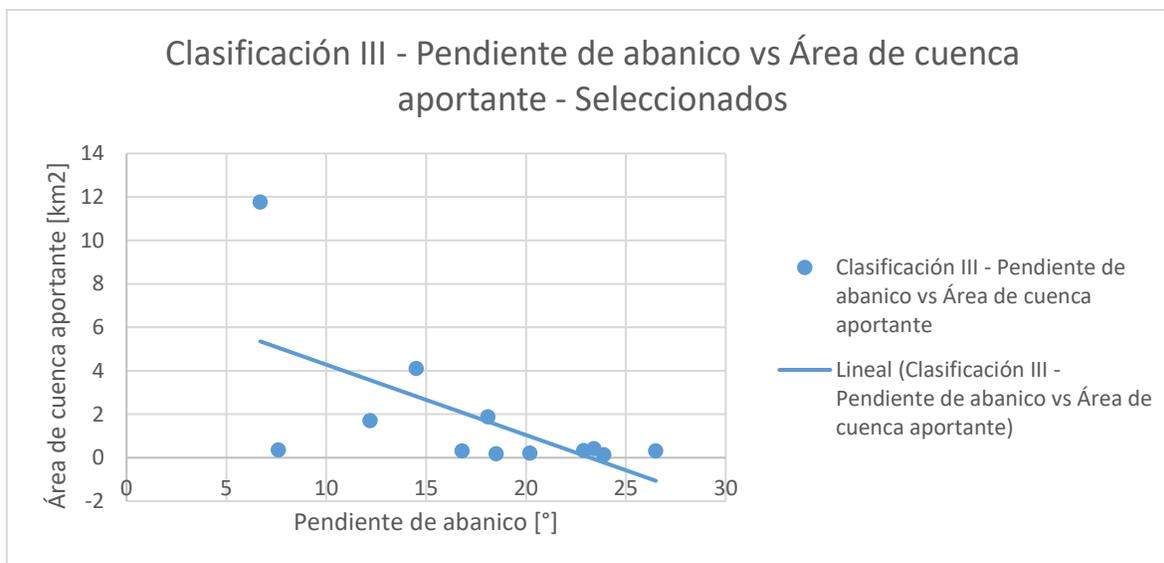


Figura 39: Gráfico de pendiente de abanico vs área de cuenca aportante respectiva para los abanicos aluviales seleccionados de la clasificación III.

Dicho de otra manera, los cuerpos de agua que fluyen por los valles de estos sectores ocupan más espacio, por lo que los abanicos seleccionados (completos y sin alteraciones significativas) serán aquellos que se desarrollan en estos espacios acotados.

De igual manera que en la clasificación II, los flujos de detritos que conforman los abanicos se encuentran en contacto con los asentamientos urbanos, por lo que no todos los depósitos aluviales adyacentes a las laderas son estudiables con el mismo criterio. Las modificaciones antrópicas, tanto agrícolas como habitacionales, alteran superficialmente los depósitos y haciendo que las mediciones no sean representativas de las condiciones de sedimentación dominantes, factor que se observa en el estudio de datos de abanicos no seleccionados.

Las litologías predominantes en las cuencas de drenaje de los abanicos en esta clasificación son rocas plutónicas básicas del Plutón Chapilca y la Unidad Cochiguas, además de rocas plutónicas de ácidas a intermedias de La Unidad Guanta, Unidad León y Unidad Fredes. Estos datos se obtienen del mapeo geológico presente en la Hoja Guanta (Nasi y Moscoso, 1986), Hoja Pisco Elqui (Mpodozis, 1986), Mapa geológico de Condoriaco - Rivadavia (Emparan, 1999) y el Mapa geológico de la carta Montepatria – El Maqui (Pineda, 2008). Estas presentan índices de erodibilidad de 1 para las plutónicas ácidas y de 1.5 (ver Tabla 6) para las plutónicas básicas y siliciclásticas (Moosdorf *et al.*, 2018). La composición litológica de las cuencas se puede observar en los Anexos A-4 y A-5.

Con respecto a la relación geométrica del largo y ancho de los abanicos, los depósitos aluviales de la clasificación III son predominantemente alargados, con largos de un 54% mayores a los anchos, en promedio. Este valor disminuye considerablemente si se consideran los abanicos no seleccionados, pero en este caso no es prudente contar con estas mediciones ya que estos se encuentran inmediatamente erosionados por los ríos. Se supone entonces que aquellos que resultan ser más equidimensionales deberían ser aún más alargados sin la erosión fluvial.

Los elementos principales de cada clasificación se pueden ver en la Tabla 7, a continuación:

Tabla 7: Tabla resumen de características principales de cada clasificación de abanicos aluviales estudiados en este trabajo.

Clasificación	Zonas de estudio	Áreas deposicionales	Relación de áreas	Pendiente promedio	Litologías dominantes	Otros
I	Zona 1 y Zona 2	Tendencia marcada distinta al resto de las zonas.	Mayor variabilidad de áreas de abanicos respecto a áreas de cuencas aportantes.	10°	Volcánicas intermedias y plutónicas ácidas.	Erosión marina limita espacio de depósito.
II	Zona 3	Abanicos restringidos por área deposicional.	Áreas de abanicos más estables con respecto a las áreas de las cuencas respectivas.	15,8°	Plutónicas ácidas y básicas, volcánicas intermedias y metamórficas.	Susceptibles a erosión fluvial.
III	Zona 4 y Zona 5	Abanicos restringidos por área deposicional.	Áreas de abanicos más estables con respecto a áreas de cuencas respectivas.	17,6°	Plutónicas básicas y plutónicas de ácidas a intermedias.	Más susceptibles a erosión fluvial que abanicos de clasificación II.

## 5.5. Relación de regresiones de cada clasificación

Una vez que se han definido las tres clasificaciones, se realizaron regresiones matemáticas de la misma manera que la bibliografía muestra los resultados, únicamente para los abanicos seleccionados.

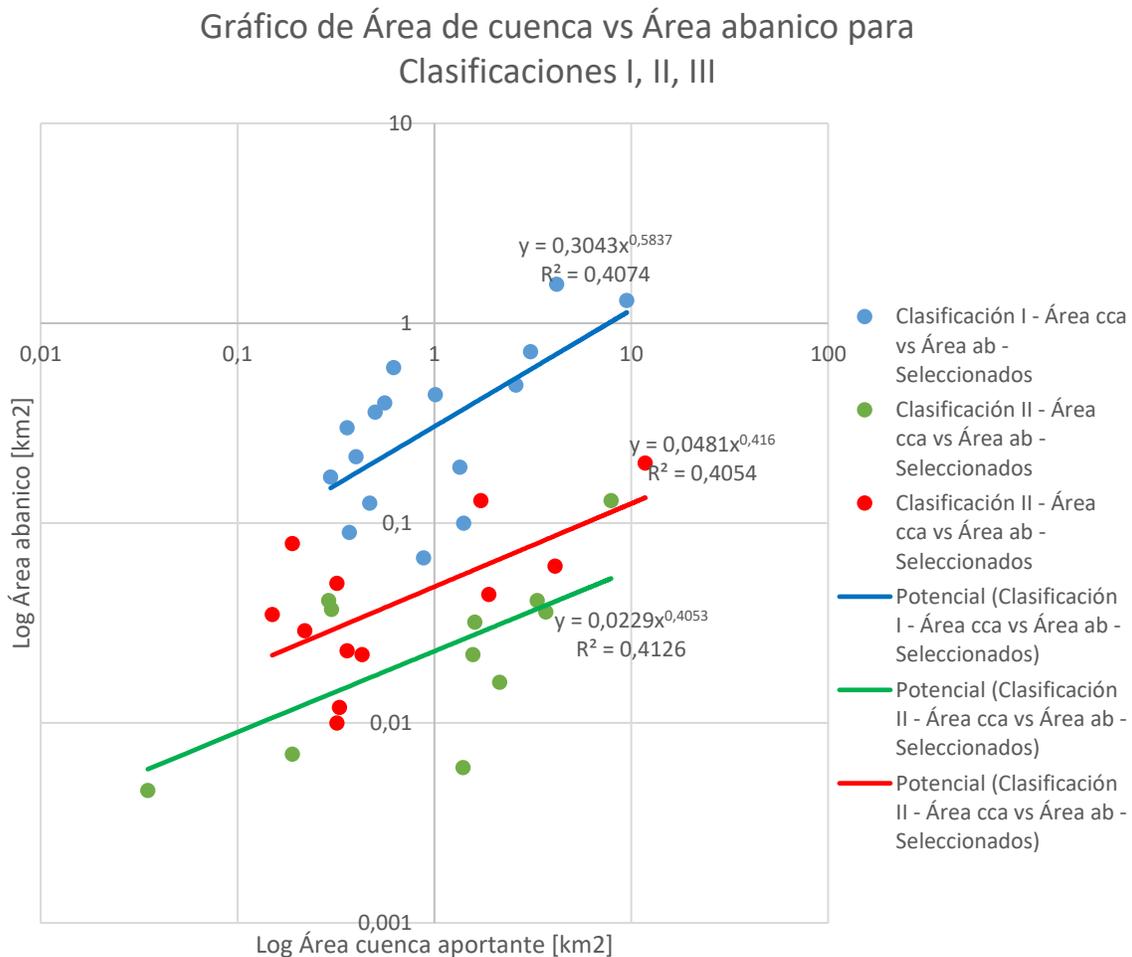


Figura 40: Gráfico de regresiones potenciales para datos seleccionados de tres clasificaciones

Al estudiar la Figura 40, es posible observar que la clasificación I tiene un comportamiento distinto a las clasificaciones II y II que, a su vez, presentan diferencias en cuanto al tamaño de las variables medidas. De acuerdo a lo indicado por Bull (1964), las ecuaciones que se obtienen de las regresiones permiten analizar individualmente las constantes de cada una de las ecuaciones.

Tabla 8: Regresiones potenciales para las tres clasificaciones del estudio

	Regresión $Ab=c*Ac^n$	c = relación área deposicional/área erosionada	n= factor de ambiente de depósito
Ec 1	$0,3043x^{0,5837}$	0,3043	0,5837
Ec 2	$0,0481x^{0,416}$	0,0481	0,416
Ec 3	$0,0229x^{0,4053}$	0,0229	0,4053

La función  $Ab = c * Ac^n$  es la que representa el comportamiento de áreas de abanicos y cuencas aportantes respectivas con:

Ac: Área de cuenca aportante

Ab: Área de abanico aluvial

c: Constante que indica relación entre área deposicional y área erosionada (empírica)

n: constante que indica el factor de ambiente deposicional (empírica)

Como se puede observar en la Tabla 8, los valores c de las clasificaciones II y III (0.04 y 0.02, respectivamente) son un orden de magnitud más pequeño. De acuerdo con lo que se puede interpretar de la constante c, esto indica que, para los abanicos de las dos clasificaciones mencionadas, las áreas deposicionales se encuentran más restringidas. En otras palabras, el depósito de sedimentos en las zonas de estas clasificaciones se encuentra marcadamente restringido por el espacio para el depósito de sedimentos. Se presume, de acuerdo con las características de los valles transversales, que el factor más determinante en las clasificaciones de este tipo es entonces el espacio deposicional.

Con respecto a la constante n, se observa que el valor de esta constante para las clasificaciones II y III es muy similar, mientras que ambas son considerablemente distintas de la clasificación I. Esta diferencia en los valores indica que los abanicos aluviales generados en zonas como las que se encuentran indicadas en las clasificaciones II y III se desarrollan en base a procesos sedimentarios similares y distintos a los de la zona I. El factor n es una constante empírica comparativa que, dado el valor n de la regresión de datos de una o más zonas de estudio, permite relacionar ambientes de depósito distintos. Valores n similares para regresiones distintas implican ambientes deposicionales similares. También, cuando la constante n es pequeña (menor a 1) esto implica que la actividad de las cuencas

aportantes no es efectiva. En otras palabras, que el volumen de sedimentos depositados por cuencas grandes es proporcionalmente menor al depositado por cuencas más pequeñas. Esto podría explicarse por la inactividad de algunos canales alimentadores dentro de las mismas cuencas de gran tamaño, así como también que el recubrimiento de sedimentos mantenga inactivo algunos sectores, impidiendo la erosión y transporte de parte de los sedimentos.

## 5.6. Evaluación de procesos aluviales ocurridos entre el 24 y 26 de marzo de 2015 en el norte de Chile

Una vez que se realizó la caracterización de los abanicos, es posible conectar las características generales de cada una de las clasificaciones con los fenómenos de remociones en masa asociados a la formación de los depósitos.

El definir tres clasificaciones de abanicos aluviales permite establecer criterios de zonificación superficial comunes entre los abanicos aluviales pertenecientes a una misma clasificación. Así, el estudio de eventos de remociones en masa sobre abanicos costeros es distinto al de abanicos precordilleranos ya que los criterios de mapeo son distintos para cada grupo de abanicos.

Durante los días 24, 25 y 26 de marzo del año 2015, un evento climatológico particular desencadenó precipitaciones concentradas en gran parte de la zona norte de Chile. A partir de estas precipitaciones, las cuencas de drenaje de las zonas afectadas se activaron, generando transporte de sedimentos y alteraciones superficiales en los depósitos aluviales.

Usando las imágenes satelitales entregadas por el mapa base de ArcGis, se determinó que una manera de conectar la caracterización de los depósitos aluviales con un evento precipitaciones como el de marzo de 2015, es desarrollar una zonificación que permita identificar las zonas de alteración recientes y, por lo tanto, las de reactivación más segura. lo cual se realizó para los eventos de 2015 identificados.

### 5.6.1. Zona reciente de cada depósito

Determinar una zonificación general resulta complicado ya que, a pesar de compartir criterios generales, cada abanico presenta características particulares dependiendo de la litología de las cuencas de drenaje, zona de depósito y actividad

reciente. Una manera eficiente para utilizar las características comunes del conjunto de abanicos de una clasificación es describir las distintas zonas que se distinguen superficialmente en cada uno de los depósitos.

Como los datos estudiados en esta investigación no son suficientes para realizar una zonificación de susceptibilidad, se ha determinado que la definición de “Zona reciente” en cada clasificación es un buen primer acercamiento a una zonificación de susceptibilidad de remociones en masa a escala general. Se define como “reciente” a aquellas zonas de los depósitos que han presentado actividad durante las últimas décadas, producto de anomalías climáticas lo suficientemente intensas como para generar alteraciones superficiales en los abanicos.

A continuación, se presentan las zonificaciones realizadas para cada tipo de abanico aluvial, de acuerdo con su clasificación (I, II o III).

#### 5.6.2. Zonificación de eventos recientes para abanicos tipo I

Para la clasificación I, los abanicos aluviales presentan características que permiten hacer una diferenciación de zonas con temporalidad relativa utilizando algunos criterios que son útiles tanto para los abanicos de la zona 1 y zona 2.

Si bien, el color del depósito depende de la litología predominante, en la mayoría de los casos existe un nivel base de color rojizo a marrón en el que no se distinguen lobulaciones ni irregularidades específicas. Al estudiar el perfil topográfico de estas zonas se obtiene una superficie regular y casi ausente de quiebres. Por otro lado, y comúnmente concentrados en el cuerpo de los abanicos, existen sectores con irregularidades topográficas marcadas por conjuntos de canales meándricos abandonados, normalmente con una coloración notablemente distinta a la del nivel base. Este nivel temporal se asocia a eventos de ocurrencia única o a los depósitos ocasionales con descargas potentes que generan las huellas de avulsión en la superficie de los depósitos y es identificado como el nivel intermedio de esta clasificación (ver Figura 41).

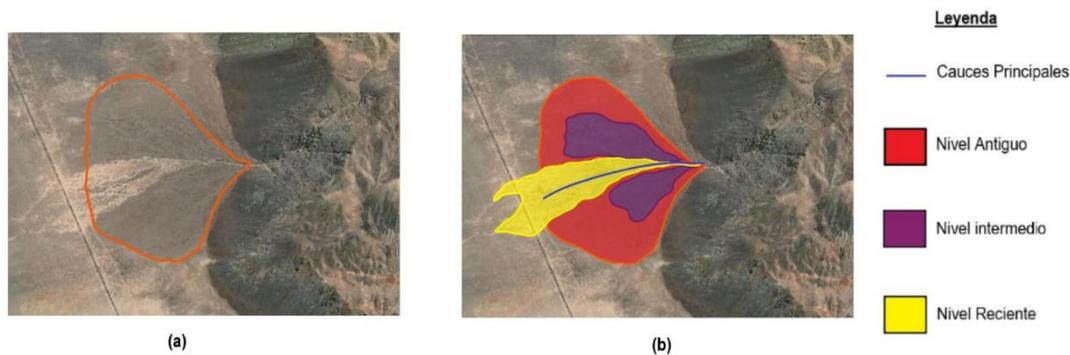


Figura 41: Abanico ZN-1-01 de la Clasificación I. A la izquierda se observa el abanico delimitado en el mapeo general mientras que, a la derecha, se observa el mismo abanico con la zonificación de 3 niveles de temporalidad relativa. El resto de las zonificaciones de abanicos de la clasificación II se encuentra en la sección de anexos C-1. Elaboración propia.

Finalmente, los sectores recientes se reconocen principalmente por su marcada diferencia de color. En la mayoría de los casos los pulsos recientes tienden a ser blanquecinos o gris claro, contrastando fuertemente con los dos niveles posteriores. Únicamente en los casos donde las litologías predominantes sean principalmente leucocráticas, los pulsos recientes destacarán de igual manera pero por ser más oscuros. En todos los casos los pulsos recientes se ubican sobre y en torno al o los cauces principales, especialmente a partir del ápice más reciente, posterior al atrincheramiento.

### 5.6.3. Zonificación de eventos recientes para abanicos tipo II

En el caso de la clasificación II, los abanicos aluviales que se encuentran considerados son de tamaño reducido ( $0.03 \text{ km}^2$ , promedio), por lo que la calidad de las imágenes satelitales no permite reconocer irregularidades superficiales con gran claridad.

Los depósitos aluviales seleccionados de la clasificación II presentan un nivel base más antiguo en todas las zonas del depósito que no son lobulares o lingüiformes. Esta suele ser monocromática, con un color que depende de la litología predominante en la cuenca aportante, aunque en casi todos los casos es de color gris a marrón.

En algunos casos es posible reconocer un nivel intermedio, más reciente que el anterior, de zonas lobulares con superposición de flujos monocromáticos, distintos a los del nivel base. Estos presentan formas irregulares y se deben principalmente a depósitos de canales en abandono y posiblemente a episodios aislados de alto transporte de sedimentos.

Finalmente, los depósitos recientes se reconocen en flujos delgados y aislados que, casi en todos los casos, se depositan en torno al canal principal. Se observa además que el nivel más antiguo se encuentra erosionado y el canal principal se atrinchera con mayor intensidad, lo que provoca una dispersión radial de sedimentos en las zonas del cuerpo y hacia los pies de los abanicos (ver Figura 42), sobrepasándolos en lo que parecen ser sedimentos finos con comportamiento más bien fluvial.

Cuando el depósito reciente no tiene apariencia fluida (producto de flujos hiperconcentrados), se les atribuye a flujos de detritos que en todos los casos se depositan en torno al canal principal.

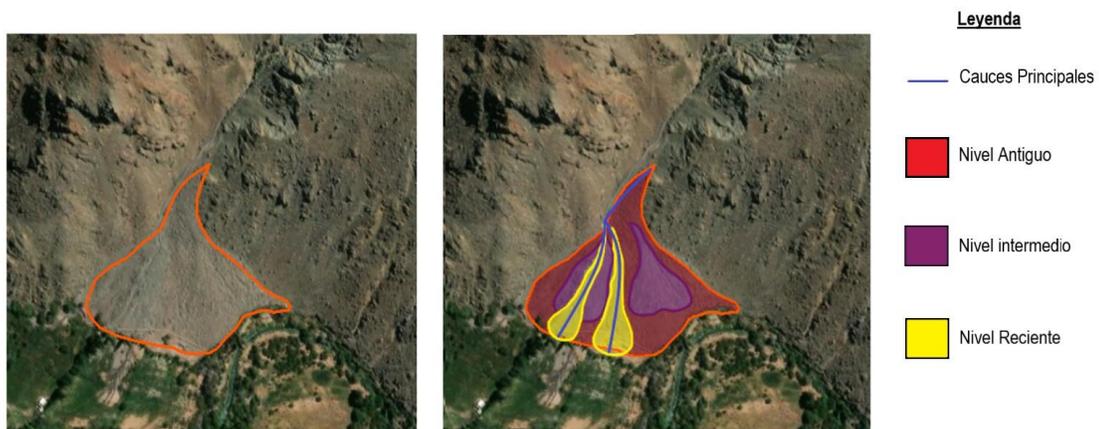


Figura 42: Abanico ZN-3-04 de la Clasificación II. A la izquierda se observa el abanico delimitado en el mapeo general mientras que, a la derecha, se observa el mismo abanico con la zonificación de 3 niveles de temporalidad relativa. El resto de las zonificaciones de abanicos de la clasificación II se encuentra en la sección de anexos C-2. Elaboración propia.

#### 5.6.4. Zonificación de eventos recientes para abanicos tipo III

Los abanicos aluviales de la clasificación III tienen una restricción de análisis que impide una zonificación tan clara como la que se ha propuesto para las clasificaciones anteriores. La resolución de los mapas de elevación digital, así como también la de las imágenes satelitales no permite distinguir en una primera instancia

secciones con temporalidad relativa diferentes entre sí, aunque la utilización de otros marcadores de actividad reciente ayuda a separar lo que se supone es la zona más activa de cada abanico.

El primero de ellos es la presencia de un canal principal. No es posible en todos los casos encontrar el canal ya que la mayoría de los abanicos, especialmente los seleccionados de la zona 4, presentan uniformidad superficial y cromática. Aun así, cuando el canal es distinguible, suele estar acompañado de los depósitos más recientes sobre el abanico, destacados también por el siguiente marcador.

El segundo marcador es la presencia/ausencia de vegetación sobre los abanicos aluviales. Dentro de la uniformidad superficial visible de los abanicos, en algunos casos se distinguen zonas con ausencia de vegetación, lo que sugiere que son estas las zonas de mayor actividad reciente que arrastran o impiden el crecimiento de vegetación (ver Figura 43). Para todos los casos de la clasificación III, este es el marcador más importante. Se distingue también en base a esto que las zonas con mayor tiempo de inactividad serán más antiguas, por lo que, si existen diferencias en densidad de vegetación dentro de un mismo abanico, es prudente considerar dos niveles de antigüedad relativa.

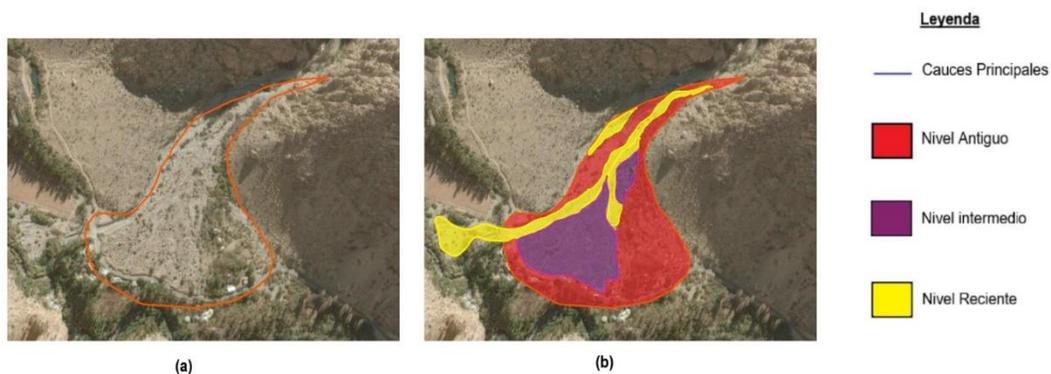


Figura 43: Abanico ZN-4-03 de la Clasificación III. A la izquierda se observa el abanico delimitado en el mapeo general mientras que, a la derecha, se observa el mismo abanico con la zonificación de 3 niveles de temporalidad relativa. El resto de las zonificaciones de abanicos de la clasificación II se encuentra en la sección de anexos C-3. Elaboración propia.

A pesar de lo mencionado, en casos aislados de los abanicos no seleccionados, se distingue un nivel intermedio similar a lo que se describe para las zonificaciones anteriores. En este caso particular, el nivel intermedio de temporalidad relativa es una versión “antigua” de los depósitos catalogados como recientes. Son aquellos de colores más blanquecinos (sujeto a la litología de origen) pero con presencia de

vegetación. Con este tipo de zonas se reconoce que no todos los abanicos estudiados en la clasificación III presentan actividad reciente.

### 5.7. Actividad sobre zonificación reciente en casos relevantes.

Para verificar la validez de la zonificación expuesta previamente, se observa si existen cambios superficiales sobre las secciones de los depósitos que se han catalogado como recientes. La temporalidad relativa que se menciona en las secciones de cada uno de los abanicos se encuentra asociada a eventos geológicos y climáticos de distinto calibre, aunque no es posible determinar qué tan intenso debe ser el fenómeno particular para gatillar coberturas aluviales distintas. Junto con esto, las zonas más antiguas podrían asociarse a regímenes climáticos distintos a los actuales, lo que dificulta la comparación con fenómenos de los cuales se tiene registro.

Para determinar si las zonas recientes de los abanicos seleccionados son susceptibles a cambios superficiales, se han revisado las imágenes satelitales de libre acceso para cada una de las clasificaciones. A pesar de que imágenes como las de los proyectos Landsat y Sentinel proveen fotografías satelitales de fechas previas y posteriores a fenómenos de alta precipitación (como el de marzo de 2015), la resolución que en algunos casos llega a 20 metros por pixel no es suficiente para observar claramente los cambios de los depósitos aluviales.

Ante esta limitante, las plataformas de observación del globo como Google Earth permiten observar cambios a través del tiempo con una mejor resolución. La dificultad en este caso existe cuando se busca una fecha precisa, ya que las imágenes satelitales observables en Google Earth para Chile, por lo general, tienen una diferencia de tres años para cualquier punto observado.

Las imágenes obtenidas para cada clasificación muestran lo siguiente:

- Clasificación I:

En la figura 42 se pueden observar tres de los abanicos que corresponden a la clasificación I, donde es posible apreciar que existen variaciones superficiales sobre los depósitos aluviales seleccionados. A pesar de que las imágenes muestran cambios evidentes sobre una zona donde los eventos climatológicos son escasos y los ocurridos durante marzo de 2015 son más bien únicos, la calidad de las imágenes puede alterar la percepción de cambios sobre los depósitos.

A pesar de ello, de acuerdo con las zonificaciones del anexo C-1, es posible observar que las zonas “recientes” de cada uno de los depósitos fue activada durante el período de tiempo entre ambas imágenes. Este cambio debe atribuirse al evento de precipitación anómalo ocurrido en marzo de 2015.



Figura 44: Imágenes de los abanicos ZN-01-04, ZN-01-05 y ZN-01-08 de la clasificación I para las fechas 15 de julio de 2013 (a la izquierda) y 3 de marzo de 2016 (a la derecha). Digital Globe imagery desde Google Earth.). Al centro mapeo de cambio sobre abanico Zn-01-05.

- Clasificación II

La figura 43 indica que hubo un cambio superficial en los depósitos mostrados en las imágenes durante el periodo de tiempo de ambas capturas. De acuerdo con la zonificación expuesta en el anexo C-2, parece haber una activación de las zonas "recientes". En este caso, las precipitaciones son más frecuentes que en el caso de la clasificación I, aunque dado que el evento de precipitación más importante es el de marzo de 2015, los cambios sobre los canales principales y la erosión sobre terrenos plantados debe atribuirse a este evento mayor.

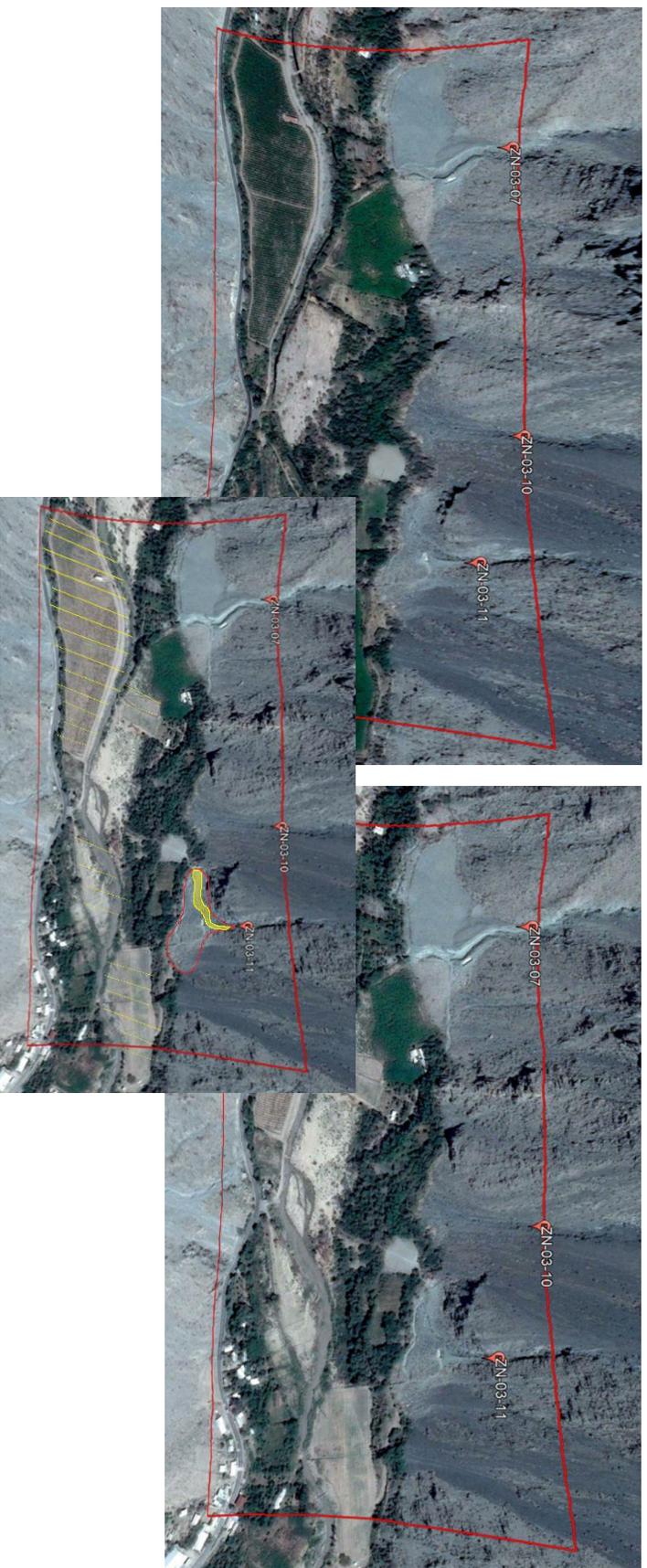


Figura 45: Imágenes de los abanicos ZN-03-7, ZN-03-10 y ZN-03-11 de la clasificación II para las fechas 3 de octubre de 2013 (a la izquierda) y 11 de octubre de 2016 (a la derecha). Digital Globe Imagery desde Google Earth. Al centro, mapeo de zona activa de abanico ZN-03-11 y achurado sobre plantaciones removidas.

- Clasificación III

Dado que las imágenes utilizadas para esta investigación son de libre acceso, la disponibilidad de imágenes de alta calidad para observar cambios sobre los depósitos no es suficiente para determinar si la zonificación de temporalidad relativa de los abanicos es efectiva (Ver Figura 44). En el caso de la clasificación III, ninguno de los abanicos seleccionados se ubica en una zona donde sea posible determinar cambios importantes. Esto es una dificultad que limita la cantidad de interpretaciones que se pueden hacer sobre este tipo de abanicos.

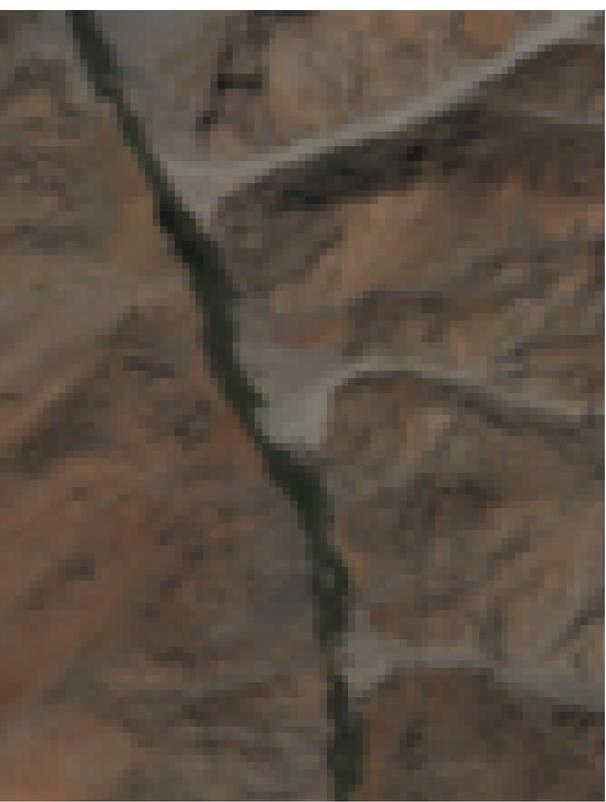
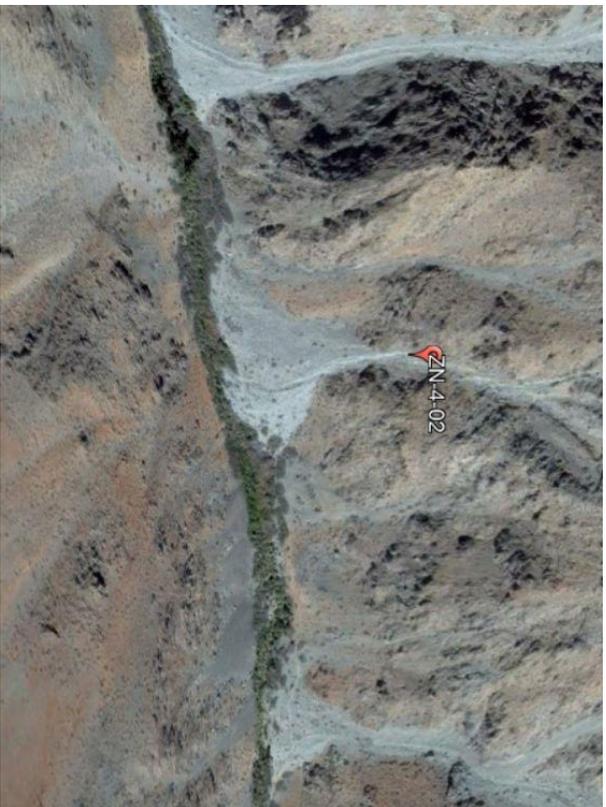


Figura 46: Imágenes del abanico ZN-04-2 de la clasificación III el 2 de enero de 2013 (a la izquierda) y 31 de octubre de 2016 (a la derecha). Digital Globe imagery desde Google Earth y Sentinel 2-A imagery.

## 6. Discusiones

### 6.1. Datos morfométricos y comparación con imágenes satelitales

Uno de los resultados más importantes de esta investigación corresponde a la similitud entre la interpretación de los datos morfométricos y lo observable en las imágenes satelitales de las zonas de estudio.

Las regresiones lineales de los datos de cada zona de estudio presentan coeficientes de correlación que, por lo general, varían entre 0,3 y 0,5. Estos valores son considerados como una correlación moderada para esta investigación. Con la observación de los abanicos aluviales en las imágenes satelitales es claro que existen similitudes de tamaño y de morfología que invitan a agrupar ciertos abanicos aluviales. Un ejemplo de esto son los abanicos costeros, la similitud entre los dos grupos de abanicos de estas características y los diferentes que son de los abanicos precordilleranos.

A pesar de que algunos elementos de información de las zonas estudiadas parezcan comparables, se requiere de una herramienta cuantitativa para determinar las similitudes que la observación indica. El uso de los parámetros morfométricos seleccionados previamente en el capítulo 3, particularmente los datos de pendiente y área para abanicos aluviales y sus cuencas respectivas, permite establecer las regresiones con distintos grupos de valores (ver de figura 22 a figura 30).

El mejoramiento en los coeficientes de correlación, así como la distribución bimodal (ver figura 31) de las cinco zonas de estudio, comprueba las fuertes diferencias que se presumen desde el inicio. Los datos indican que existen dos “clases” de abanicos en la investigación y que estas clases se comportan de manera distinta variando la pendiente de sus curvas de tendencia. Los abanicos aluviales que se ubican en la precordillera tienen una variación de tamaño de cuenca de drenaje mucho más grande que la de los abanicos que se encuentran en la costa. Las líneas de tendencia de los dos tipos de abanicos se separan de acuerdo con la dependencia que poseen los abanicos aluviales a las restricciones de área de depósito.

La separación en dos tipos de datos no es incidental, ya que los dos grupos de datos corresponden a abanicos costeros y precordilleranos. Si bien, se mencionan dos

clases de datos, existen tres clasificaciones que nacen al estudiar con mayor detalle uno de los parámetros de variabilidad más sensibles. La pendiente de los abanicos de todas las zonas de estudio, en promedio, tiene un comportamiento más discreto que continuo. Dicho en otras palabras, los valores de pendiente promedio ( $10^\circ$ ,  $15.8^\circ$  y  $17.6^\circ$ ) se concentran en tres grupos que son los que definen las clasificaciones establecidas en el punto 5.4. y que permiten encontrar otras diferencias cualitativas entre ellas, como las relaciones de áreas de abanicos y sus cuencas respectivas, además de diferencias litológicas para cada clasificación.

Analizando los datos individuales de cada una de las zonas, en algunos casos es posible observar que existen valores alejados de la tendencia. Los datos de las zonas 1 y 2 presentan valores con cuencas de tamaños mucho mayores al promedio o que no se correlacionan directamente con el tamaño de los abanicos aluviales asociados a ellas (ver figuras 22, 24, 26 y 29). Particularmente, los valores de las áreas de cuencas aportantes para el caso de la zona 1 llega a  $2.6 \text{ km}^2$  en el caso anómalo,  $9.5 \text{ km}^2$  en el caso de la zona 2,  $7.9 \text{ km}^2$  en el caso de la zona 3 y  $11.7 \text{ km}^2$  en los casos de las zonas 4 y 5. Estos valores anómalos se encuentran dentro de los abanicos seleccionados ya que cumplen con los criterios de selección que se establecen en el punto 3.4 del estudio. Una de las posibles razones para que estos abanicos se comporten de manera similar a pesar de que las diferencias de tamaño sean tan pronunciadas es que, producto de la erosión asociada a cada una de las zonas, los abanicos no se encuentren completos ni en un 50% pero la misma erosión les da la forma abanicoide.

Los procesos erosivos marinos y fluviales que actúan sobre los abanicos aluviales no permiten que se observen la totalidad del depósito en algunos de los casos. La naturaleza de los procesos erosivos hace que casi siempre se pueda identificar cuándo se han erodado de manera importante, pero los casos particulares donde una observación remota de las zonas no lo deja claro hace que algunos datos anómalos puedan caer dentro del grupo. Estos valores que podrían quedar fuera si se establecieran límites de tamaño de cuencas para la toma de datos se comportan de la misma manera que el resto del set de datos, comprobando que los criterios de selección siguen siendo útiles aún frente a este tipo de limitantes propias de la metodología. El mejoramiento de las fuentes de información (DEMs) posiblemente permitiría distinguir de mejor manera las irregulares superficiales y los quiebres topográficos sobre los mismos depósitos, lo que haría que los abanicos aluviales de tamaños anómalos pero de alta conservación aparente fueran descartables. De la misma manera, se podría integrar una mayor cantidad de datos “no seleccionados” por los criterios del capítulo 3.

Se presume que la eliminación de estos datos por otros filtros generaría un mejoramiento de los coeficientes de correlación al considerar una mayor cantidad de datos efectivos para las regresiones, pero no alteraría las tendencias expuestas en los gráficos ni las interpretaciones que se hacen a partir de ellas.

Como se puede ver en la figura 41, la eliminación del dato anómalo (9,5 km<sup>2</sup> de área de cuenca) aumenta considerablemente la correlación de datos para una regresión lineal. Sin embargo, al realizar una regresión potencial con los ejes expresados en logaritmo base 10 (figura 48), misma forma en la que se expresan las regresiones potenciales que sirven para relacionar las clasificaciones, existe una disminución en el coeficiente de correlación (de 0,4 a 0,35). Esto ocurre porque la regresión potencial es más sensible a la extracción de un valor y sería necesario reemplazarlo por otro que respete los mismos criterios de selección.

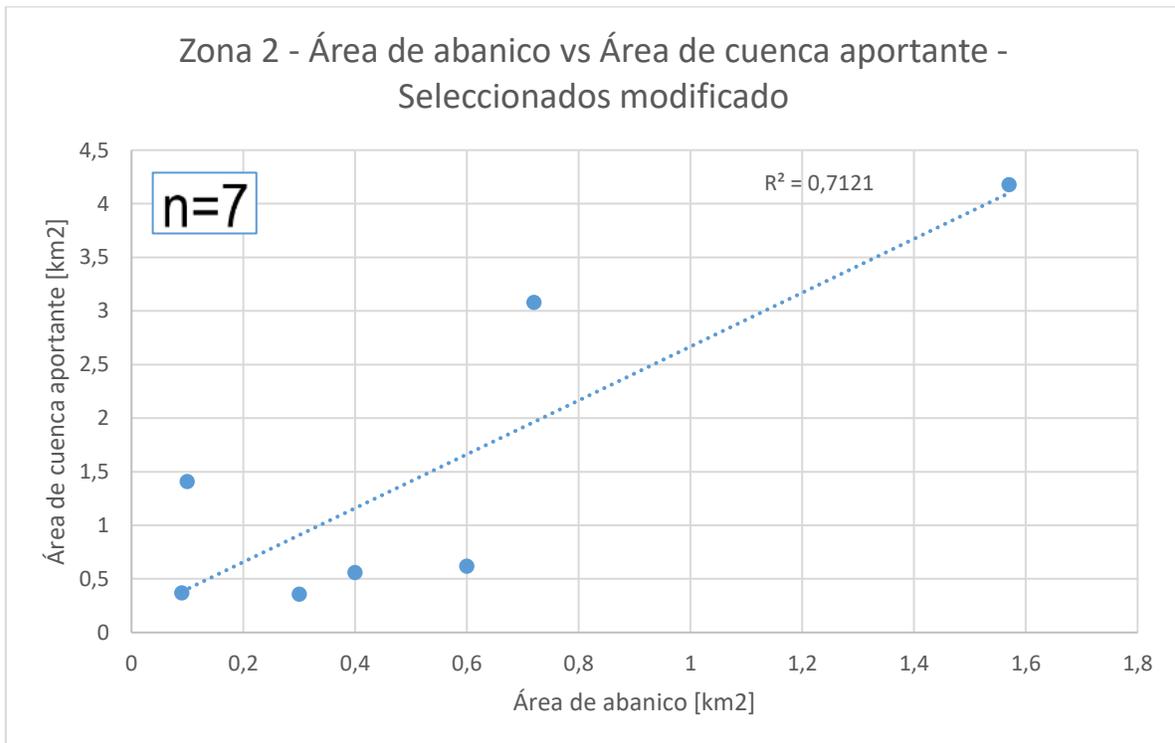


Figura 47: Área de abanico vs área de cuenca aportante de abanicos seleccionados con corrección de datos de la zona 2 de estudio.

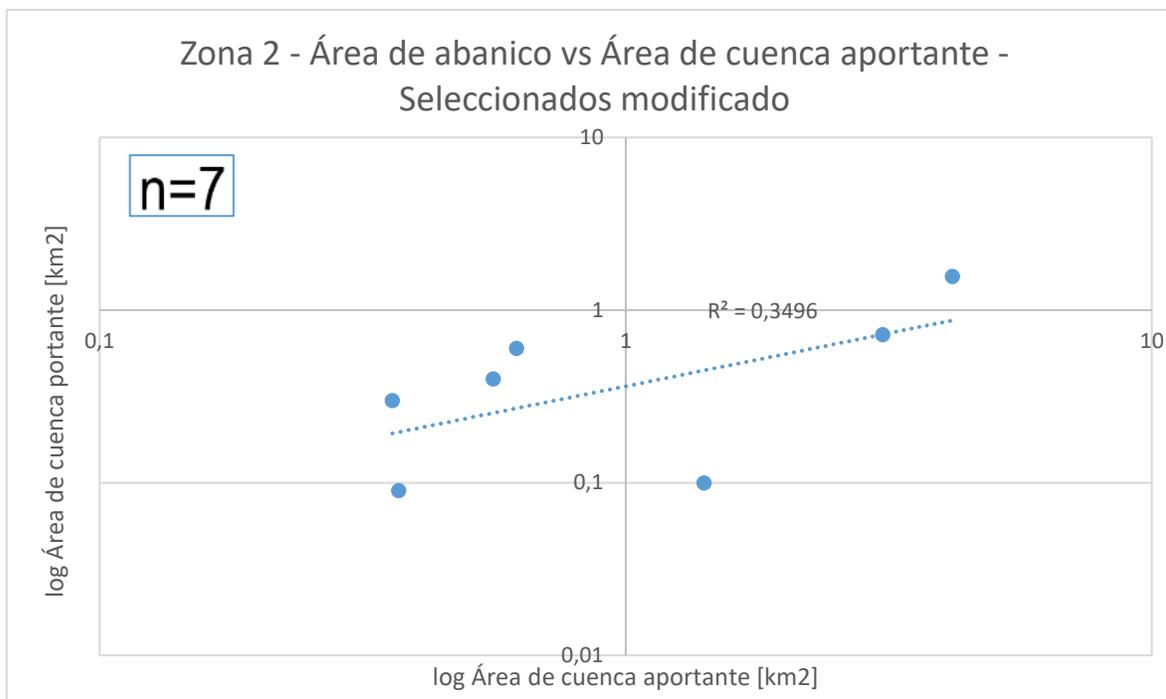


Figura 48: Área de abanico vs área de cuenca aportante de abanicos seleccionados con corrección de datos de la zona 2 de estudio. Los datos se muestran con ejes en función logarítmica y regresión potencial.

## 6.2. Zonificación superficial de abanicos aluviales

Una forma de aprovechar el desarrollo de clasificaciones para los abanicos aluviales del norte de Chile es explorar las diferencias que se pueden identificar entre una y otra clasificación y hasta qué punto es posible extraer información de ello. Al establecer que cada una de las clasificaciones presenta claras diferencias se puede trabajar cada uno de los grupos de datos de manera individual.

Una zonificación superficial de los abanicos aluviales es una manera de reclasificar los abanicos con otro tipo de características. En este caso, netamente superficiales a partir de las imágenes satelitales de “Basemap” de ArcGis.

El desarrollo de criterios de zonificación asociados a cada una de las clasificaciones comprueba que estos grupos de datos se comportan de manera similar entre ellos y distintos a los otros grupos, reforzando la idea de que una clasificación de abanicos aluviales es muy útil para el estudio de los depósitos aluviales del norte de Chile tanto a nivel general como particular.

Para que una zonificación de temporalidad relativa como la que se ha propuesto en esta investigación sea útil en trabajos futuros, es necesario que la delimitación de los abanicos aluviales seleccionados sea lo más estricta posible y siga los criterios de selección establecidos previamente. Una zonificación de temporalidad relativa que se realiza principalmente con la observación de imágenes satelitales resulta engorrosa si dentro del polígono que se ha trazado como límite del abanico se encuentran sectores erodados o con alteraciones antrópicas (ver figura 49). En esos casos es más complejo determinar las zonas de actividad reciente, por lo que el grado de tolerancia a este tipo de fenómenos debe estar claramente establecido.

|Zonificación | Zona 3 | |ZN-3-09|

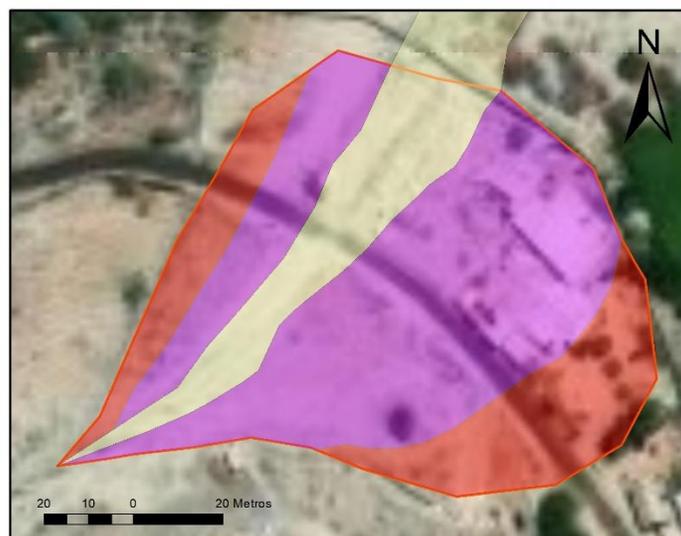


Figura 49: Zonificación de temporalidad relativa para abanico ZN-3-09 de la zona 3 de estudio.

El criterio de tolerancia especificado en este caso (en el subcapítulo 3.4) que establece que los abanicos deben encontrarse conservados al menos en un 80%, se encuentra respaldado por las regresiones potenciales de las clasificaciones, aunque trabajos complementarios podrían reafirmar lo establecido en esta investigación y fortalecer el mapeo de temporalidad relativa.

En algunos casos, los abanicos seleccionados contarán con alteraciones superficiales que los criterios de mapeo (irregularidades topográficas, color o densidad de vegetación) no consideran. La forma más efectiva de determinar estas diferencias superficiales sería con mapas de elevación digital de la resolución adecuada para cada caso. Aun así, la agrupación de las zonas y los criterios de mapeo de temporalidad relativa posteriores son suficientes para determinar con un alto grado de certeza que las zonas recientes de cada abanico son las más susceptibles en una evaluación de susceptibilidad de remociones que se realice a partir de estos mapeos.

### 6.3. Alcances y limitantes de la metodología

Como parte del análisis de cada uno de los abanicos aluviales, la metodología de estudio que determina las herramientas para medir los parámetros morfométricos tiene algunas restricciones que podrían disminuir la validez de los resultados.

La caracterización de las zonas de estudio y de los elementos particulares de estas, se realizó con imágenes satelitales remotas que dejan fuera del análisis datos que podrían ser de ayuda a la hora de delimitar los depósitos sedimentarios y determinar algunos parámetros específicos. Esto ocurre ya que la resolución de las imágenes satelitales no entrega la misma precisión que una observación de terreno y algunos elementos, como las características sedimentarias y estratigráficas del abanico, quedan fuera del análisis producto de la naturaleza de la metodología.

Existen algunos parámetros morfométricos que fueron medidos con los datos entregados por los ráster de elevación, de una resolución de alta precisión, pero que en algunos casos no permite determinar si los depósitos que se han definido como “seleccionados” se encuentran incompletos o con alteraciones superficiales que pudieran modificar las mediciones.

De la misma manera, un estudio de imágenes satelitales no permite dimensionar empíricamente cuánto influye la litología de las cuencas de drenaje en la morfología y en la densidad de los depósitos. Es posible que la morfología esté determinada por la forma de los clastos y por estructuras locales que no han sido consideradas para esta investigación.

El trabajo estadístico de los datos indica que los abanicos seleccionados y no seleccionados presentan diferencias que los hacen incomparables, limitando la cantidad de datos efectivos para el análisis. Esta disminución de la base de datos se traduce en lo que se observa como coeficientes de correlaciones moderados. A

pesar de que existen tendencias y los datos de cada zona se correlacionan correctamente, es probable que la calidad de los resultados mejore con actividades complementarias que aumenten la base de datos y descarten aquellos que en el estudio de imágenes y mapas de elevación parecen entrar en la clasificación sin ser representativos de los criterios de selección. Los datos obtenidos y las interpretaciones de las regresiones son lo suficientemente claras como para aportar información valiosa sobre los abanicos aluviales del norte de Chile.

El uso de datos de libre acceso permite la caracterización general de zonas amplias con regímenes sedimentarios similares. Es en este punto donde una clasificación de abanicos aluviales resulta de gran utilidad si se desea interpretar la actividad de ciertos depósitos, y a partir de ello, las características comunes de cada depósito sedimentario individual con los de su entorno. Sin embargo, se debe tener en cuenta que podría restringir la cantidad de información recopilable, ya que mapas satelitales de baja resolución entregan datos de menor precisión y confiabilidad.

Los datos obtenidos en la sección de resultados corresponden a mediciones que se correlacionan mejor con datos más precisos. Junto con esto, el principal recurso para determinar si la selección de estos datos es correcta radica en la interpretación de imágenes satelitales con fechas identificables y, por lo tanto, comparables.

La variable temporal es importante si se desea observar cambios como se ha propuesto en la zonificación de temporalidad relativa de los abanicos, por lo que el uso de las imágenes de alta calidad obtenidas desde la base de datos de Google limita la cantidad de interpretaciones que es posible hacer a partir de un fenómeno climatológico como el de marzo de 2015, abarcado en esta investigación.

Como parte de los resultados más relevantes, las regresiones matemáticas, que permiten establecer comparaciones y diferencias entre las tres grandes clasificaciones expuestas previamente, se sostienen sobre un valor de correlación moderado. A pesar de esto, las constantes empíricas que resultan de las regresiones indican un comportamiento similar al que se puede observar con la interpretación de imágenes satelitales, por lo que los valores numéricos pueden ser mejorados con las recomendaciones expuestas en el capítulo 8. Dicho de otra manera, las regresiones matemáticas son válidas dentro de las zonas de estudio y se encuentran a la espera de un mejoramiento del material de investigación y no de la metodología que permitió calcularlas.

La información de libre acceso permite establecer relaciones a escala general que aportan a un mejor entendimiento de los procesos geomorfológicos y sedimentarios de la zona norte de Chile.

## 7. Conclusiones

El estudio de zonas con alta concentración de abanicos aluviales puede ser abordado por medio de la observación de imágenes satelitales, lo que provee información valiosa para la caracterización geomorfológica de cualquier ambiente. Si bien, estas observaciones se encuentran sujetas al nivel de detalle de las imágenes, al ser complementadas con la medición de parámetros morfométricos (medidos a partir de mapas de elevación digital), es posible generar una base de datos que permite establecer relaciones claras entre áreas de depósitos, morfologías y la ubicación de los mismos abanicos aluviales. A su vez, los parámetros morfométricos permiten realizar regresiones matemáticas que le otorgan características particulares a cada grupo de abanicos.

Las regresiones matemáticas de este trabajo fueron obtenidas mediante el análisis de 131 abanicos aluviales. Estas regresiones permiten identificar que las zonas de estudio seleccionadas en esta investigación son agrupables al compartir características particulares, lo que facilita una zonificación de temporalidad relativa al unificar criterios de mapeo. Con esto, se ha determinado que los abanicos detríticos del norte de Chile se pueden ubicar en tres clasificaciones de acuerdo con la pendiente de los depósitos, litologías predominantes y su relación de tamaño de áreas de depósito y cuencas de drenaje asociadas. La clasificación I posee una mayor variabilidad de áreas de abanicos respecto a áreas de cuencas aportantes, pendientes en torno a  $10^\circ$  y litologías volcánicas intermedias y plutónicas ácidas. La clasificación II posee áreas de abanicos más estables con respecto a las áreas de las cuencas respectivas, pendientes en torno a  $15^\circ$  y litologías plutónicas de ácidas a básicas, volcánicas intermedias y metamórficas. La clasificación III también posee áreas de abanicos más estables con respecto a áreas de cuencas respectivas, pendientes en torno a  $18^\circ$  y litologías plutónicas de básicas a ácidas.

La descripción de las clasificaciones de abanicos aluviales indica que existen diferencias marcadas entre los abanicos costeros y los precordilleranos. La gradiente climática, que pasa de zonas áridas a otras con mayor humedad y precipitaciones, muestra que los regímenes erosivos afectan considerablemente tanto el tamaño de los abanicos aluviales como la conservación de aquellos que se enfrentan directamente a la erosión marina y fluvial, dependiendo de cada caso. Así los abanicos costeros se caracterizan por la erosión marina y los precordilleranos por erosión fluvial y las restricciones de área de depósito que dominan en los valles transversales.

A partir de la zonificación de temporalidad relativa, mediante la comparación de imágenes satelitales previas y posteriores a la fecha de un determinado fenómeno climático, se identificaron las zonas más activas dentro de abanicos de las clasificaciones I, II y III, que se caracterizan por ser marcadamente diferentes al resto del depósito con respecto a las tonalidades de colores que presentan y su ubicación en torno a los canales principales de los mismos. En el caso de la clasificación I, los depósitos recientes tienden a ser más claros, contrastando con el resto del abanico y se ubican sobre y en torno a los cauces principales. Los depósitos recientes de la clasificación II son delgados, aislados y se ubican en los canales principales casi en todos los casos, con una distribución radial hacia la base del abanico producto de una pérdida del atrincheramiento en el cuerpo del depósito aluvial. En la clasificación III, los depósitos recientes se reconocen al ser las únicas secciones de los abanicos donde la vegetación ha sido removida producto del paso de los flujos de detritos. Todos estos corresponderían a zonas susceptibles de ser afectadas por procesos futuros.

El proceso metodológico para la caracterización de abanicos aluviales expuesto en esta investigación entrega información valiosa para un mejor entendimiento de los procesos geomorfológicos y sedimentarios de la zona norte de Chile, además de ser una herramienta económica y replicable en otras investigaciones de características similares.

## 8. Recomendaciones

La metodología de trabajo utilizada en esta investigación depende fuertemente de la calidad de las imágenes satelitales que se utilizan para delimitar los abanicos aluviales, así como también de la resolución de los mapas de elevación digital que permiten la observación de los perfiles topográficos de cada depósito aluvial.

Se sugiere que una forma de mejorar la calidad de la información, y así obtener mejores coeficientes de correlación para los sets de datos de cada zona de estudio, es utilizar DEMs e imágenes satelitales de mayor resolución.

En el caso de las imágenes satelitales, es necesario obtener imágenes de alta calidad y de fechas específicas que permitan observar cambios sobre los depósitos antes y después de un fenómeno climatológico particular. Esto permitiría determinar de mejor manera si los límites de abanico geológico son los delimitados en esta

investigación y si el mapeo de susceptibilidad realizado es efectivo para cada uno de los abanicos seleccionados de cada clasificación.

En el caso de los mapas de elevación digital, DEMs de resolución métrica permitirían identificar irregularidades superficiales sobre los depósitos, lo que es útil para determinar si los criterios de selección de abanicos son más efectivos y fortalecer los criterios de zonificación de temporalidad relativa.

Finalmente, la información de los depósitos aluviales obtenible por medio de la observación remota es limitada, por lo que trabajos de terreno complementarios que permitan caracterizar los abanicos aluviales a nivel litológico, estratigráfico y sedimentario, permitirían robustecer la descripción de las clasificaciones y también determinar con mayor eficacia las zonas recientes y de mayor actividad sobre cada abanico aluvial.

## 9. Bibliografía

- Arattano, M., Conte, R., Franzi, L., Giordan, D., Lazzari, A., and Luino, F. (2010). Risk management on an alluvial fan: a case study of the 2008 debris-flow event at Villar Pellice (Piedmont, N-W Italy), *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 10, 999-1008.
- Blair T.C., McPherson J.G. (1994). Alluvial Fan Processes and Forms. In: Abrahams A.D., Parsons A.J. (eds) *Geomorphology of Desert Environments*. Springer, Dordrecht.
- Aguilar, G., A. Cabré, C. Guaita, F. González, F. O., Carretier, S., & Comte., R. R. D. (2015). Denudación por flujos de detritos durante las lluvias torrenciales de marzo de 2015 en Atacama. *Geology*, 43(5), 391–394. <https://doi.org/10.1130/G36507.1>
- Alarcón, M. (2015). Petrotectónica, deformación y grado de metamorfismo de las rocas del Carbonífero-Pérmico de la Cordillera de la Costa entre los 28°30' y 29°10' S, Región de Atacama y Región de Coquimbo, Chile (Thesis). <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1434.3769>
- Alaska Satellite Facility. (2018). Dataset: © JAXA/METI ALOS PALSAR L1.0 2011. Accessed through ASF DAAC 20 December 2018.
- Blair, T C, & McPherson, J. G. (1994). Alluvial fans processes and forms. *Geomorphology of Desert Environments*. <https://doi.org/10.1007/978-1-4020->

5719-9J4

- Blair, Terence C, & Mcpherson, J. G. (2009). Processes and Forms of Alluvial Fans. <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-5719-9J4>
- Blissenbach, E. (1954). Geology of alluvial fans in semiarid regions. *Bulletin of the Geological Society of America*, 65(2), 175–190. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1954\)65\[175:GOAFIS\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1954)65[175:GOAFIS]2.0.CO;2)
- Bluck, B. J. (1965). the Sedimentary History of Some Triassic Conglomerates in the Vale of Glamorgan, South Wales. *Sedimentology*, 4(3), 225–245. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.1965.tb01290.x>
- Bull, W. B. (1964). Alluvial Fans and Near-Surface Subsidence in Western Fresno County California, 71.
- Bull, William B. (1977). The alluvial-fan environment. *Progress in Physical Geography*, 1(2), 222–270. <https://doi.org/10.1177/030913337700100202>
- Bull, William B. (1962). Relation of textural (CM) patterns to depositional environment of alluvial-fan deposits. *Journal of Sedimentary Research*, 32(2), 211–216. <https://doi.org/10.1306/74d70c7c-2b21-11d7-8648000102c1865d>
- Bull, William B. (1977). *Progress in Physical Geography* by. <https://doi.org/10.1177/030913337700100202>
- Calvache, M. L., Viseras, C., & Fernández, J. (1997). Controls on fan development - Evidence from fan morphometry and sedimentology; Sierra Nevada, SE Spain. *Geomorphology*, 21(1), 69–84. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(97\)00035-4](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(97)00035-4)
- Campbell, R. H. (1975). Soil Slips, Debris Flows, and Rainstorms in the Santa Monica Mountains and Vicinity, Southern California. U.S. Geological Survey Professional Paper 851, 51 pages. Retrieved from <http://pubs.usgs.gov/pp/0851/report.pdf>
- Church, M., & Mark, D. M. (1980). On size and scale in geomorphology. *Progress in Physical Geography* (Vol. 4). <https://doi.org/10.1177/030913338000400302>
- Clarke, J. D. A. (2006). Antiquity of aridity in the Chilean Atacama Desert. *Geomorphology*, 73(1–2), 101–114. <https://doi.org/10.1016/j.entcs.2005.12.035>
- Colombo, F. (2010a). Abanicos aluviales: procesos de transporte y acumulación de materiales detríticos, (May), 85–130.
- Colombo, F. (2010b). Abanicos aluviales: procesos de transporte y acumulación de materiales detríticos, (November 2010), 85–130.
- Colombo, Ferran. (2010). Abanicos aluviales: secuencia y modelos de sedimentación. *Sedimentología: Del Proceso Físico a La Cuenca Sedimentaria*, (May), 131–224.

- Díaz, N. S., Soto, A. A., Villa, V., & Lienlaf, M. (2015). Área afectada y caracterización de los flujos aluvionales del 24 , 25 y 26 de marzo de 2015 en la comuna de Taltal, 801–804.
- Dunai, T. J., González López, G. A., & Juez-Larré, J. (2005). Oligocene-Miocene age of aridity in the Atacama Desert revealed by exposure dating of erosion-sensitive landforms. *Geology*, 33(4), 321–324. <https://doi.org/10.1130/G21184.1>
- Emparan C., P. G. (1999). Mapa Condoriaco-Rivadavia. Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN).
- Eppes, M. C., & Keanini, R. (2017). Mechanical weathering and rock erosion by climate-dependent subcritical cracking. *Reviews of Geophysics*, 55(2), 470–508. <https://doi.org/10.1002/2017RG000557>
- European Space Agency. (2018). Copernicus Sentinel data 2015. Retrieved from ASF DAAC 20 December 2018, processed by ESA.
- Freie Universität Berlin. (2019). Weathering and erosion: Mountains breakup. Berlin: Department of Earth Science, Freie Universität Berlin.
- Geertsema, M., Schwab, J. W., Jordan, P., Millard, T. H., & Rollerson, T. P. (2002). Hillslope Processes. *Landslides*, 55(Weir), 213–274.
- Giles, P. T., Whitehouse, B. M., & Karymbalis, E. (2018). Interactions between alluvial fans and axial rivers in Yukon, Canada and Alaska, USA. *Geological Society Special Publication*, 440(1), 23–43. <https://doi.org/10.1144/SP440.3>
- Harvey, A. (2005). Differential effects of base-level, tectonic setting and climatic change on Quaternary alluvial fans in the northern Great Basin, Nevada, USA. *Geological Society, London, Special Publications (Vol. 251)*. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.2005.251.01.09>
- Harvey, A. M. (1987). Alluvial fan dissection: relationships between morphology and sedimentation. *Geological Society, London, Special Publications*, 35(1), 87–103. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1987.035.01.07>
- Harvey, A. M. (2005). Differential effects of base-level, tectonic settings and climatic change on Quaternary alluvial fans in the northern Great Basin, Nevada, USA., (Fig 1), 117–131.
- Hooke, R. L. (1967). Processes on Arid-Region Alluvial Fans. *The Journal of Geology*, 75(4), 438–460. <https://doi.org/10.1086/627271>
- Hooke, R. L. B. (1968a). Steady-state relationships on arid-region alluvial fans in closed basins. *American Journal of Science*, 266(October), 609–629. <https://doi.org/10.2475/ajs.266.8.609>
- Hooke, R. L. B. (1968b). Steady-state relationships on arid-region alluvial fans in closed basins. *American Journal of Science*, 266(August), 609–629. <https://doi.org/10.2475/ajs.266.8.609>

- Instituto Nacional de Estadísticas. (2017). Medio Ambiente, Informe Anual 2017. Santiago de Chile: Instituto Nacional de Estadísticas.
- Iverson, R. M. (2014). Debris flows: Behaviour and hazard assessment. *Geology Today*, 30(1), 15–20. <https://doi.org/10.1111/gto.12037>
- Johnson, C. G., Kokelaar, B. P., Iverson, R. M., Logan, M., Lahusen, R. G., & Gray, J. M. N. T. (2012). Grain-size segregation and levee formation in geophysical mass flows. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 117(1), 1–23. <https://doi.org/10.1029/2011JF002185>
- Kesel, R. H. (1985). Alluvial fan systems in a wet-tropical environment, Costa Rica. *National Geographic Research*, 1, 450–469.
- Malatesta, L. C., & Lamb, M. P. (2018). Formation of waterfalls by intermittent burial of active faults. *Bulletin of the Geological Society of America*, 130(3–4), 522–536. <https://doi.org/10.1130/B31743.1>
- McGowen, J.H., and Groat, C. G. (1971). *Van Horn Sandstone, West Texas: An Alluvial Fan Model for Mineral Exploration*, Austin, Texas.
- Moosdorf, N., Cohen, S., & Hagke, C. Von. (2018). A global erodibility index to represent sediment production potential of different rock types. *Applied Geography*, 101(July 2017), 36–44. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2018.10.010>
- Moscoso R., Mpodozis C., Nasi C., Ribba L., A. V. (2010). Hoja El Tránsito. Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN).
- Mpodozis C., C. P. (1986). Hoja Pisco Elqui. Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN).
- Naranjo, A. (2015). Efectos geológicos del evento meteorológico de marzo de 2015 : Descargas de flujos aluviales durante la tormenta del 24 al 26 DE MARZO DE 2015 Asistencia solicitada por : Subdirección Nacional de Geología, (Tabla 1).
- Nasi C., Moscoso R., M. V. (1986). Hoja Guanta. Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN).
- Olea, P., & Arce, S. (2015). Caracterización de las principales cuencas afectadas durante el evento meteorológico del 24 y 25 de Marzo de 2015, 1–24. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Opazo, E., & Velásquez, R. (2015). FOTOINTERPRETACIÓN DE LOS EFECTOS DE REMOCIONES EN MASA DEL 24 AL 26 DE MARZO DE 2015 EN LAS COMUNAS DE VICUÑA Y PAIHUANO: ÁREAS AFECTADAS Y ZONAS PROPUESTAS PARA EVACUACIÓN Y ACOPIO. Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN).
- Pineda G., C. M. (2008). Carta Montepatria El Maqui. Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN).
- Quezada, J., Cerda, J. L., & Jensen, A. (2010). Efectos de la tectónica y el clima en

- la configuración morfológica del relieve costero del norte de Chile. *Andean Geology*, 37(1), 78–109. <https://doi.org/10.4067/S0718-71062010000100004>
- Servicio Nacional de Geología y Minería, S. (2003). MAPA GEOLOGICO DE CHILE : VERSION DIGITAL Leyenda Geológica.
- Seyfried, H., Worrier, G., Uhlig, D., Kohler, I., & Calvo, C. (1998a). Introducción a La Geología Y Morfología De Los Andes En El Norte De Chile. Chungará (Arica). <https://doi.org/10.4067/S0717-73561998000100002>
- Seyfried, H., Worrier, G., Uhlig, D., Kohler, I., & Calvo, C. (1998b). Introducción a La Geología Y Morfología De Los Andes En El Norte De Chile. Chungará (Arica). <https://doi.org/10.4067/S0717-73561998000100002>
- SHARP, R. P., & NOBLES, L. H. (1953). MUDFLOW OF 1941 AT WRIGHTWOOD, SOUTHERN CALIFORNIA. *GSA Bulletin*, 64(5), 547–560. Retrieved from [http://dx.doi.org/10.1130/0016-7606\(1953\)64\[547:MOAWSC\]2.0.CO](http://dx.doi.org/10.1130/0016-7606(1953)64[547:MOAWSC]2.0.CO)
- Skarmeta M., J.; Marinovic S., N. (1981). Hoja Geológica Quillagua. Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN).
- Tapia, J., González, R., Townley, B., Oliveros, V., Álvarez, F., Aguilar, G., ... Calderón, M. (2018). Geology and geochemistry of the Atacama Desert. *Antonie van Leeuwenhoek, International Journal of General and Molecular Microbiology*, 111(8), 1273–1291. <https://doi.org/10.1007/s10482-018-1024-x>
- Tosdal, R. M., Clark, A. H., & Farrar, E. (1984). Cenozoic polyphase landscape and tectonic evolution of the Cordillera Occidental, southernmost Peru. *Geological Society of America Bulletin*, 95(11), 1318–1332. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1984\)95<1318:CPLATE>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1984)95<1318:CPLATE>2.0.CO;2)
- Tunbridge, I. P. (1983). Alluvial fan sedimentation of the Horseshoe Park Flood, Colorado, U.S.A., July 15th, 1982. *Sedimentary Geology*, 36(1), 15–23. [https://doi.org/10.1016/0037-0738\(83\)90018-0](https://doi.org/10.1016/0037-0738(83)90018-0)
- Valkanou, K., Karymbalis, E., Papanastassiou, D., Gaki-Papanastassiou, K., & Giles, P. (2017). Analysis of relationships among coastal alluvial fans and their contributing catchments in North Evoikos Gulf (Central Greece). *Bulletin of the Geological Society of Greece*, 47(1), 344. <https://doi.org/10.12681/bgsg.10961>
- Viseras, C., & Fernandez, J. (1995). THE ROLE OF EROSION AND DEPOSITION IN THE CONSTRUCTION OF ALLUVIAL-FAN SEQUENCES IN THE GUADIX FORMATION (SE SPAIN). *Geologie En Mijnbouw*.
- Weinert, H. H. (1965). Climatic factors affecting the weathering of igneous rocks. *Agricultural Meteorology*, 2(1), 27–42. [https://doi.org/10.1016/0002-1571\(65\)90033-6](https://doi.org/10.1016/0002-1571(65)90033-6)
- Wasson R.J. (1977). Last-glacial alluvial fan sedimentation in the Lower Derwent Valley, Tasmania. *Sedimentology* (1977) 24, pp. 781- 799

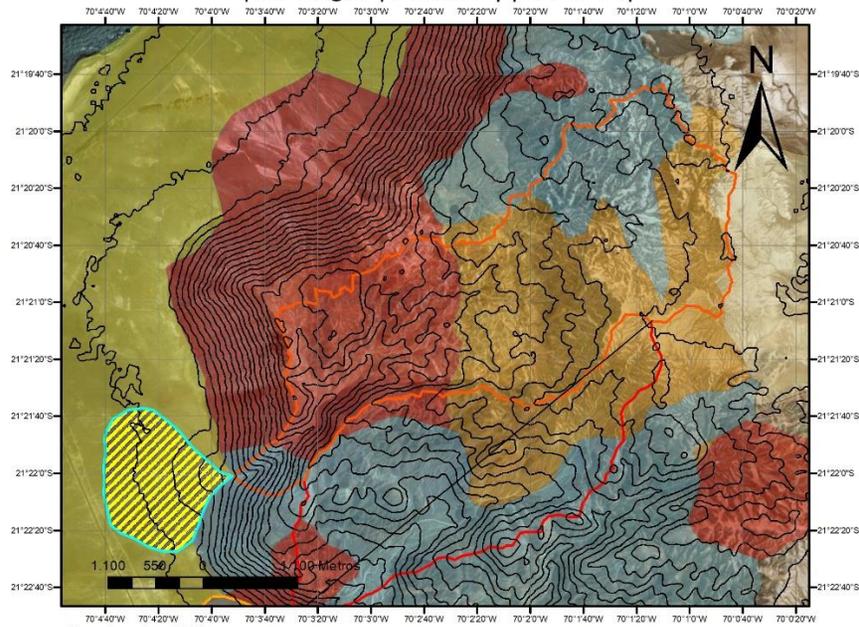
Wieczorek G.F., Glade T. (2005). Climatic factors influencing occurrence of debris flows. In: Debris-flow Hazards and Related Phenomena. Springer Praxis Books. Springer, Berlin, Heidelberg

## Anexos

Anexo A: Mapeo geológico de abanicos aluviales

Anexo A-1: Mapeo geológico de abanicos aluviales seleccionados de la zona 1

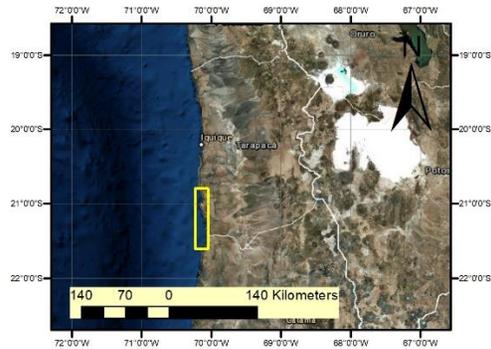
|Geología | Zona 1 | |ZN-1-01|



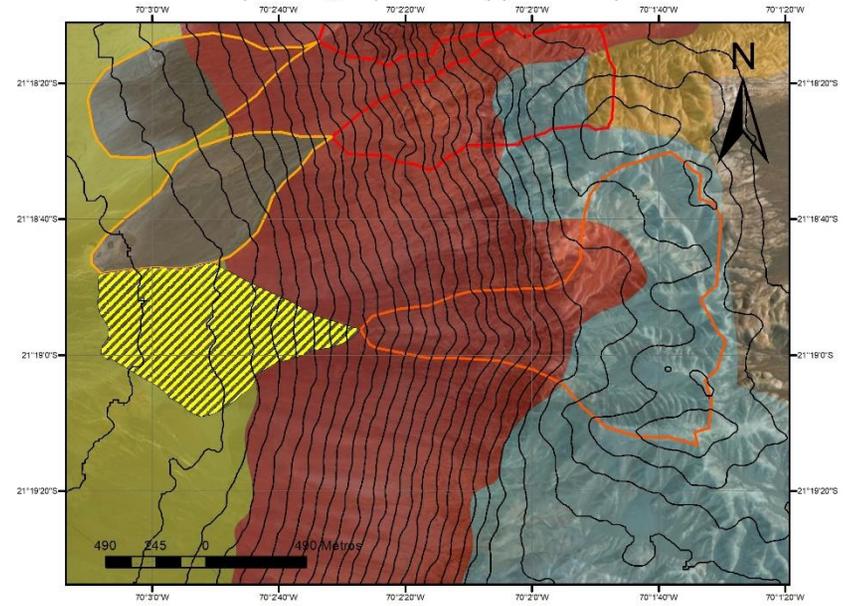
Geología 30k

Código

- Jln
- Kgd
- Qac
- Qal
- Qpd
- abanicos zona 1
- Curvas\_40m



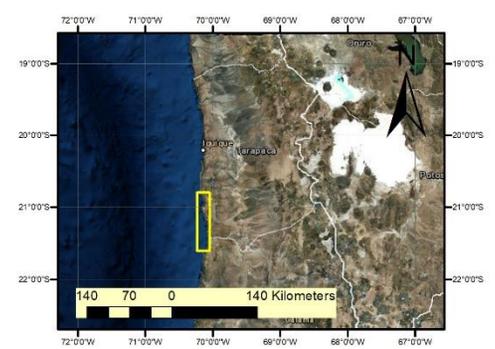
|Geología | Zona 1 | |ZN-1-02|



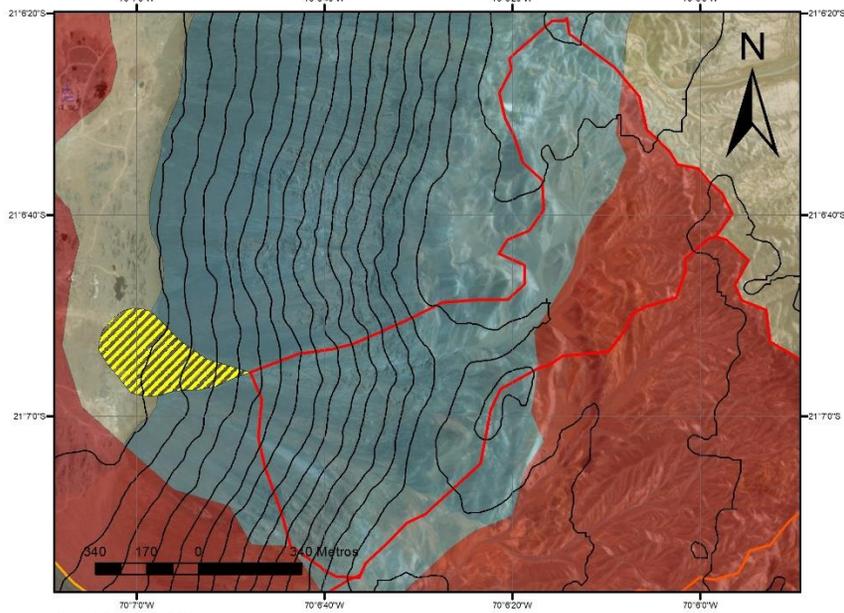
Geología 30k

Código

- Jln
- Kgd
- Qac
- Qpd
- abanicos zona 1
- Curvas\_40m



|Geología | Zona 1 | |ZN-1-03|

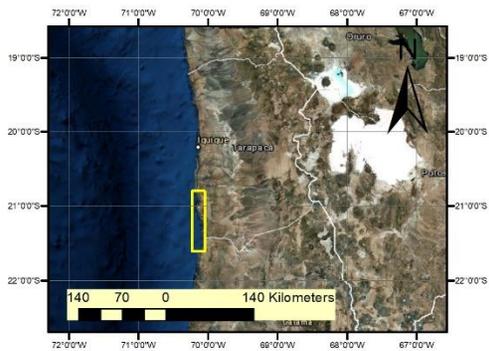


Geología 30k

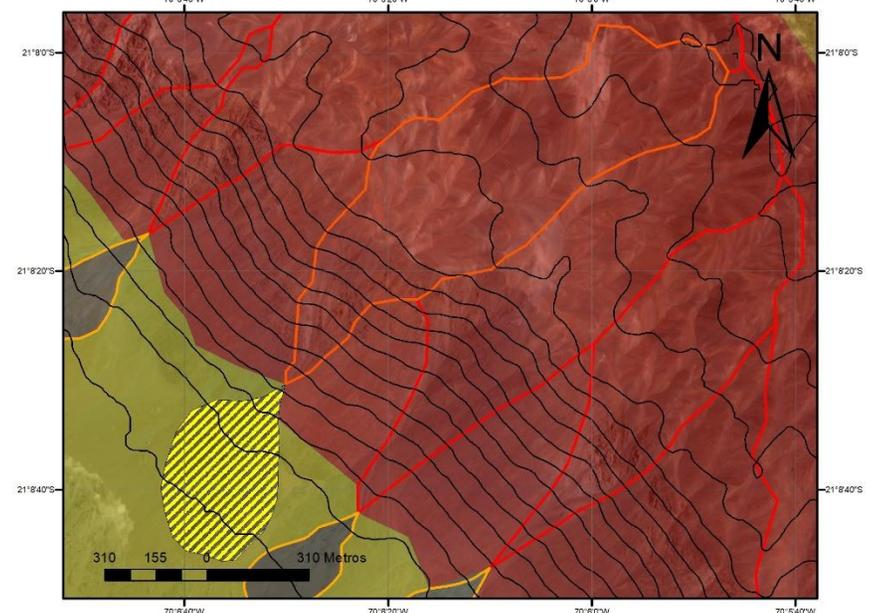
Código

- JIn
- Kgd
- Qal
- Qpd
- abanicos zona 1

— Curvas\_40m



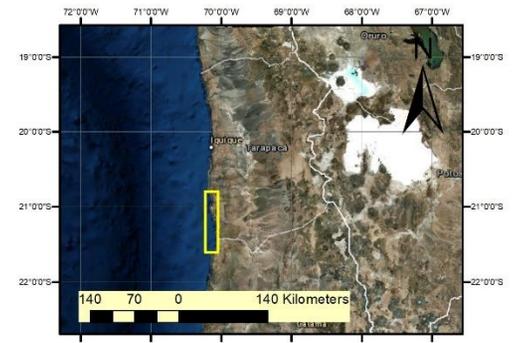
|Geología | Zona 1 | |ZN-1-04|



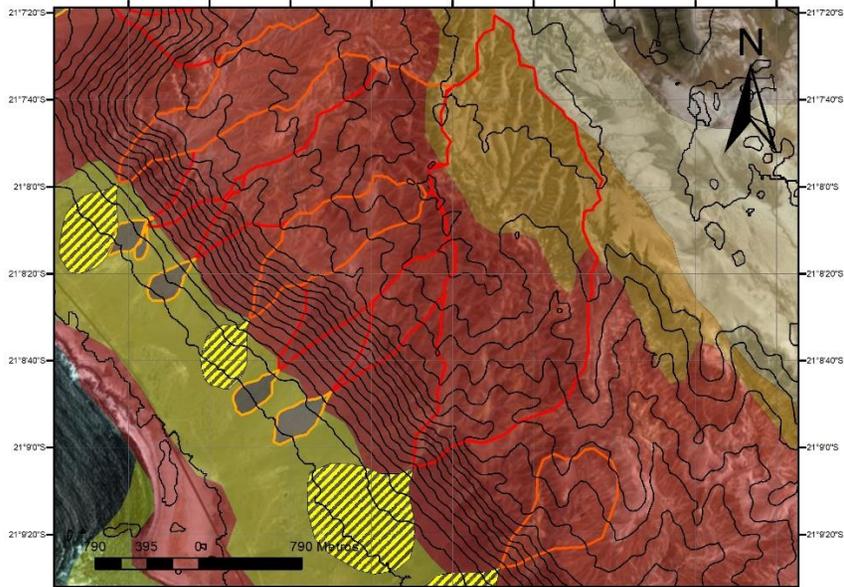
Geología 30k

Código

- Kgd
- Qac
- Qpd
- abanicos zona 1
- Curvas\_40m



|Geología | Zona 1 | |ZN-1-05|

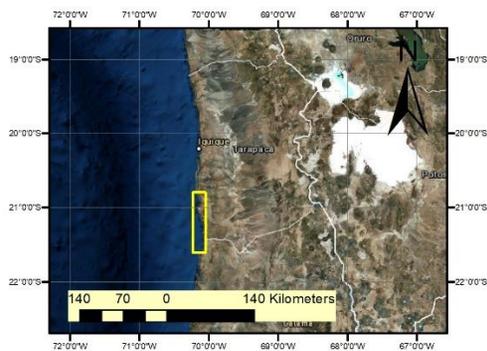


Geología 30k

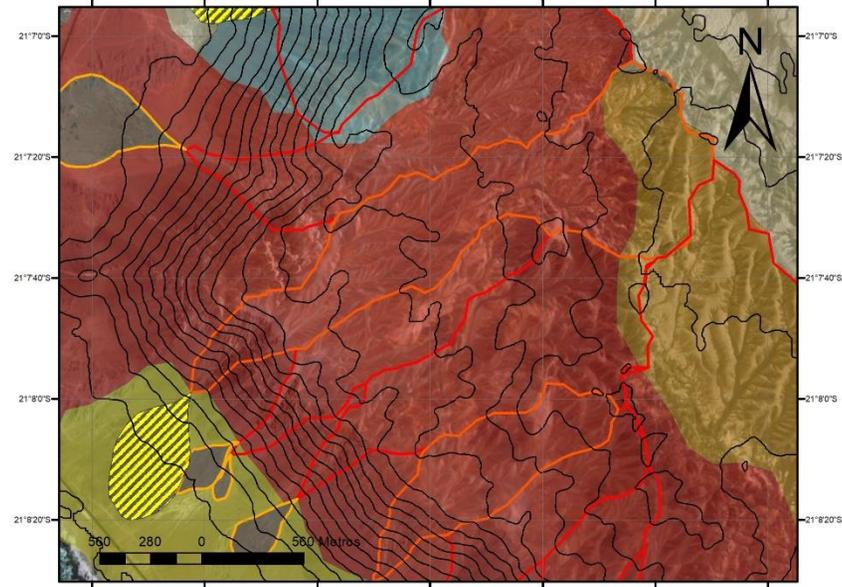
Código

- Kgd
- Qac
- Qal
- Qpd
- abanicos zona 1

— Curvas\_40m



|Geología | Zona 1 | |ZN-1-07|

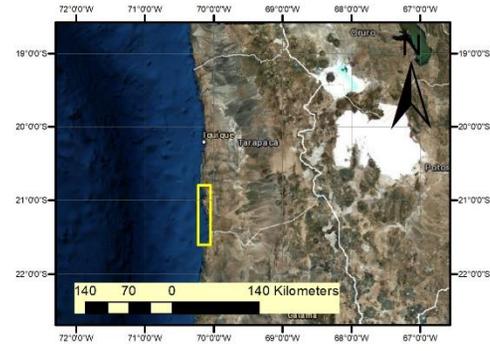


Geología 30k

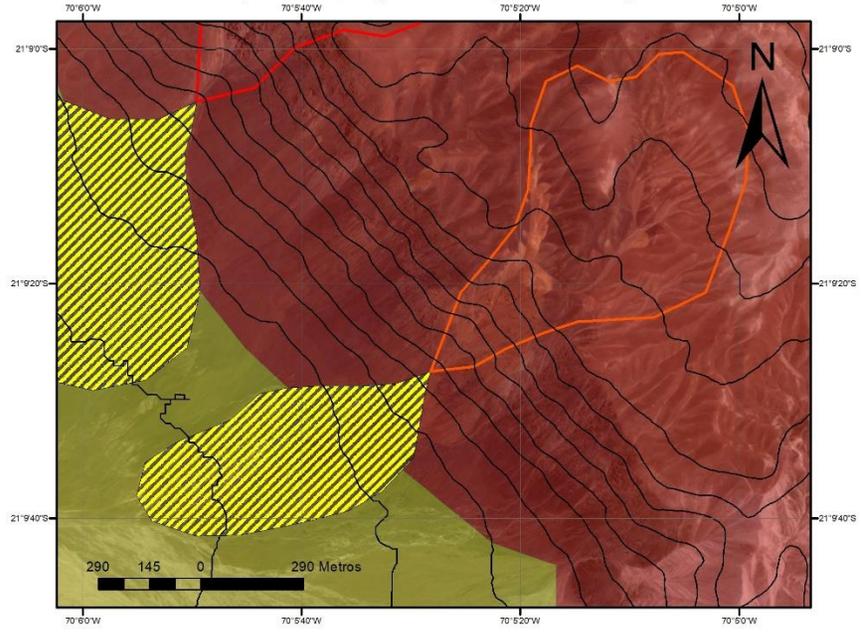
Código

- Jln
- Kgd
- Qac
- Qal
- Qpd
- abanicos zona 1

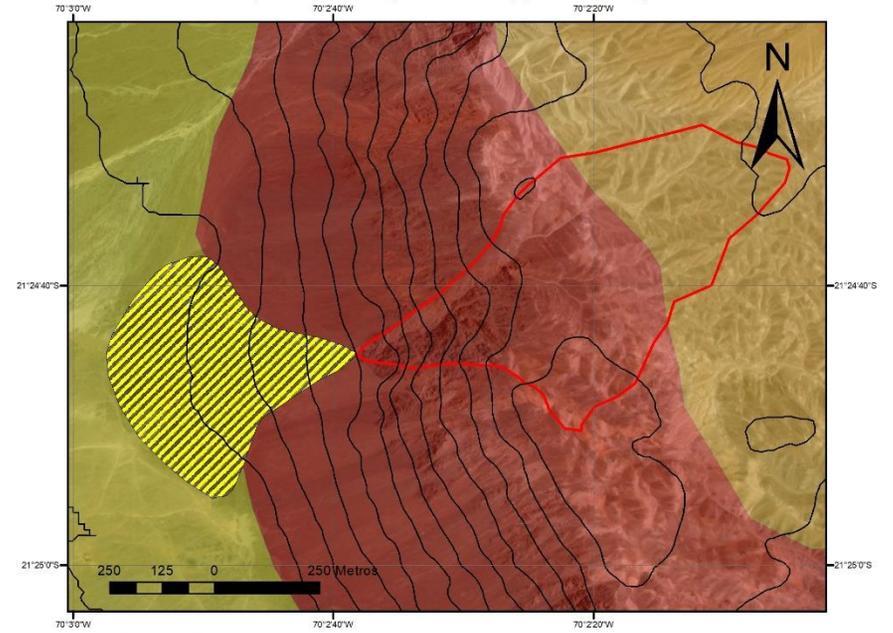
— Curvas\_40m



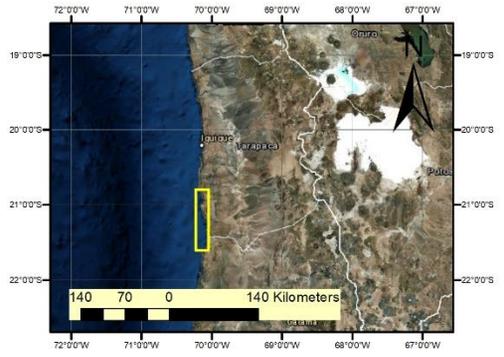
|Geología | Zona 1 | |ZN-1-08|



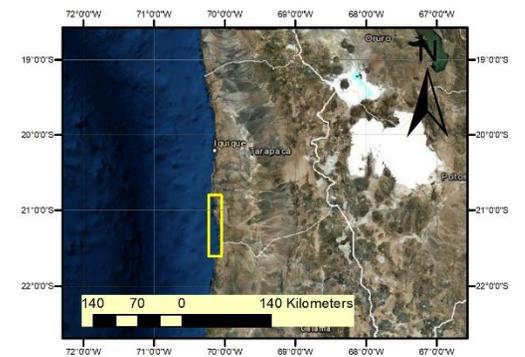
|Geología | Zona 1 | |ZN-1-09|



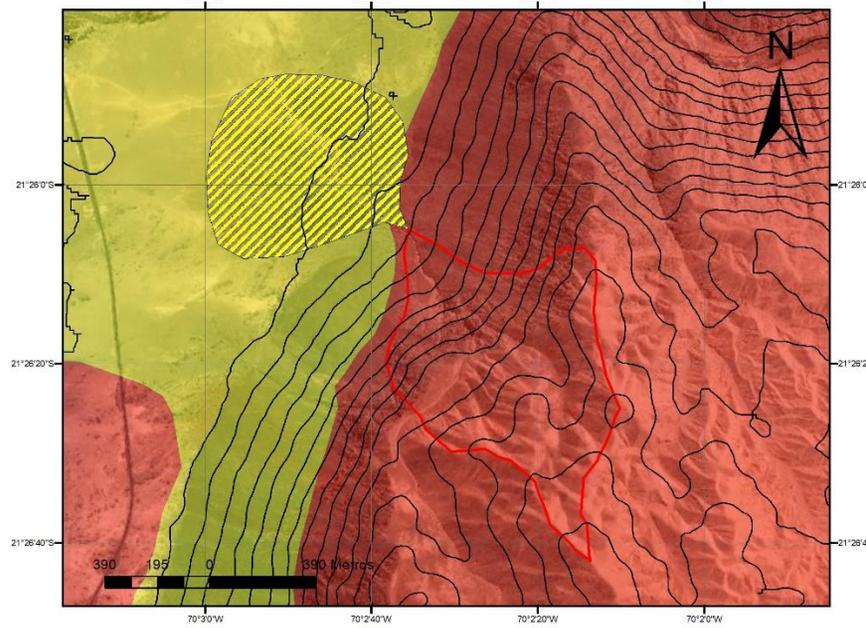
- Geología 30k**
- Código**
- Kgd
  - Qac
  - abanicos zona 1
  - Curvas\_40m



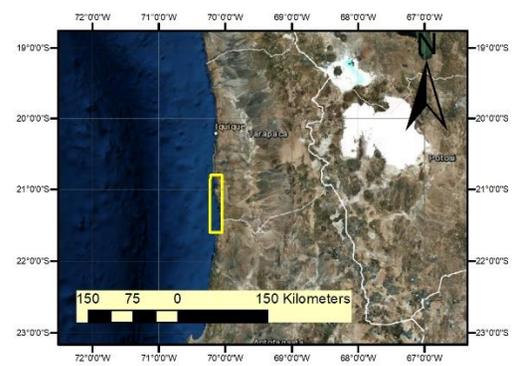
- Geología 30k**
- Código**
- Kgd
  - Qac
  - Qpd
  - abanicos zona 1
  - Curvas\_40m



|Geología | Zona 1 | |ZN-1-10|

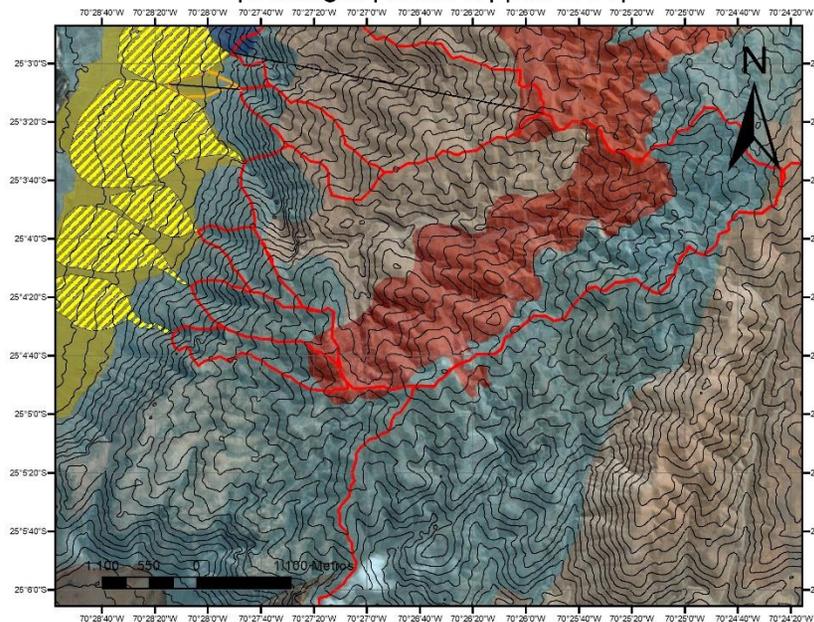


- Geología 30k**
- Código**
- Kgd
  - Qac
  - abanicos zona 1
  - Curvas\_40m



Anexo A-2: Mapeo geológico de abanicos aluviales seleccionados de la zona 2.

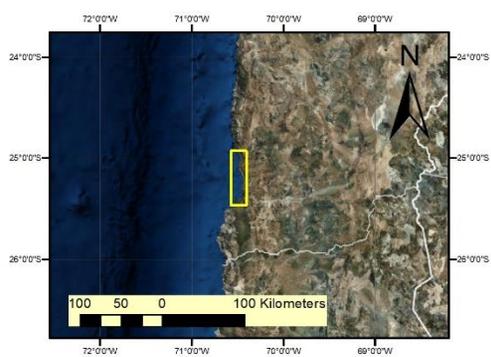
**|Geología | Zona 2 | |ZN-2-01|**



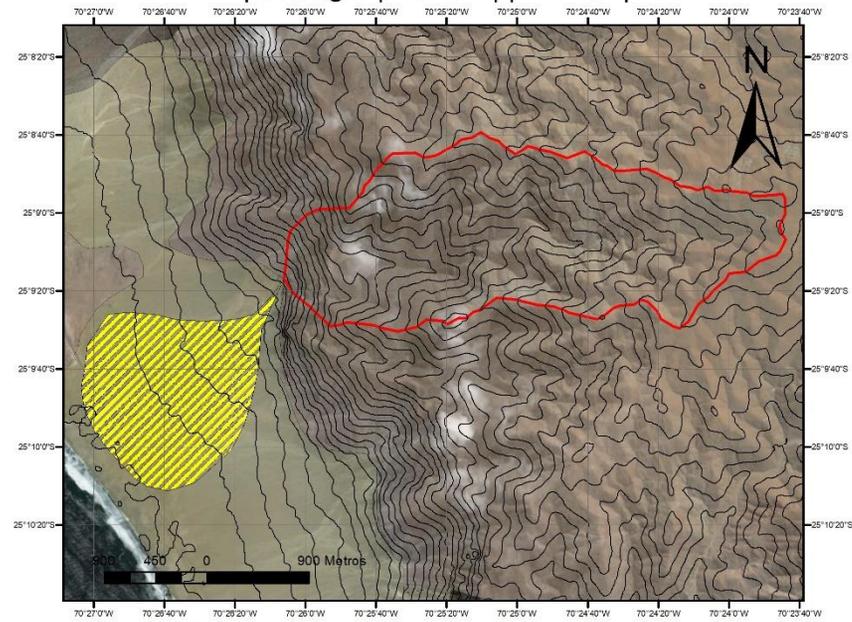
**Geología 30k**

**Código**

- Jln**
- Jmm(gd)**
- Jpa**
- Kilt**
- Qac**
- abanicos zona 2**
- Curvas\_40m**



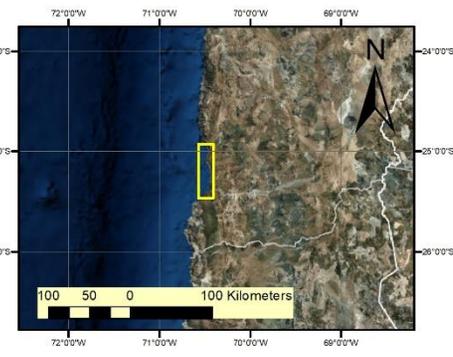
**|Geología | Zona 2 | |ZN-2-02|**



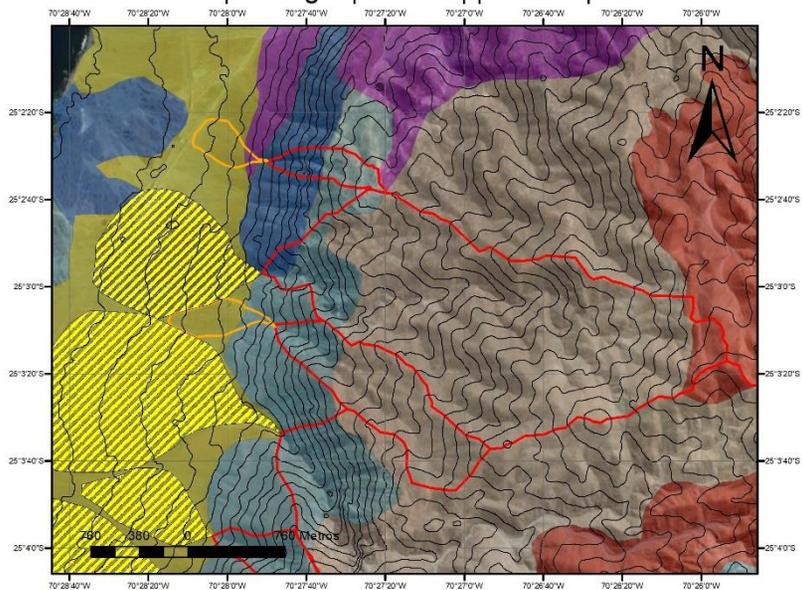
**Geología 30k**

**Código**

- Jmm(gd)**
- PIHcc**
- abanicos zona 2**
- Curvas\_40m**



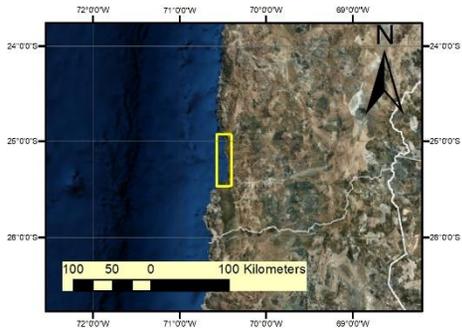
|Geología | Zona 2 | |ZN-2-03|



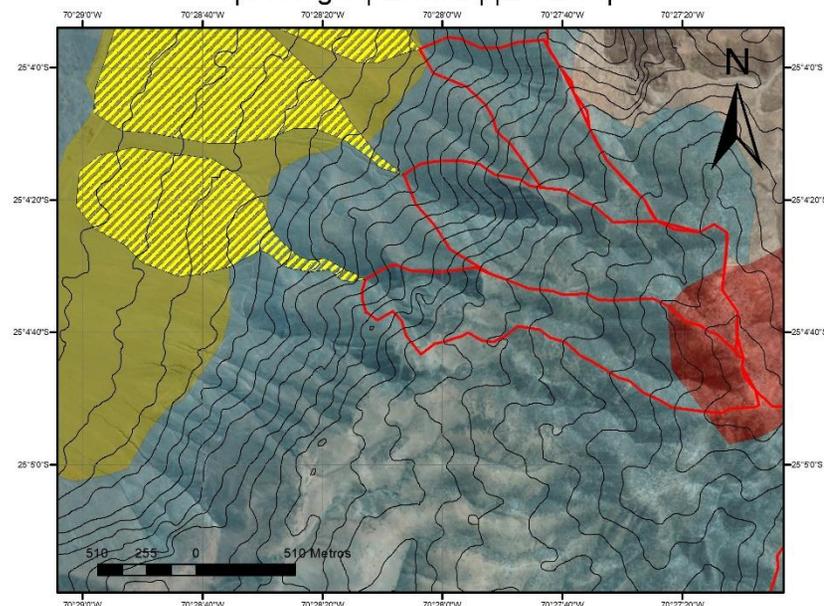
Geología 30k

Código

- Jln
- Jmm(gd)
- Jp
- Jpa
- Kilt
- Qac
- abanicos zona 2
- Curvas\_40m



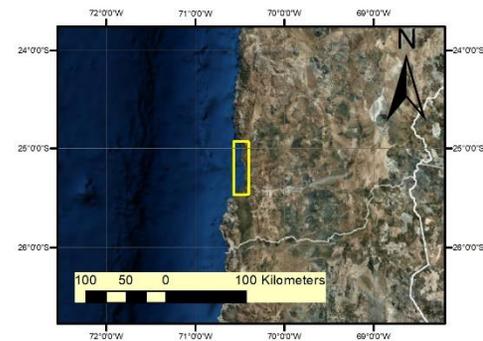
|Geología | Zona 2 | |ZN-2-04|



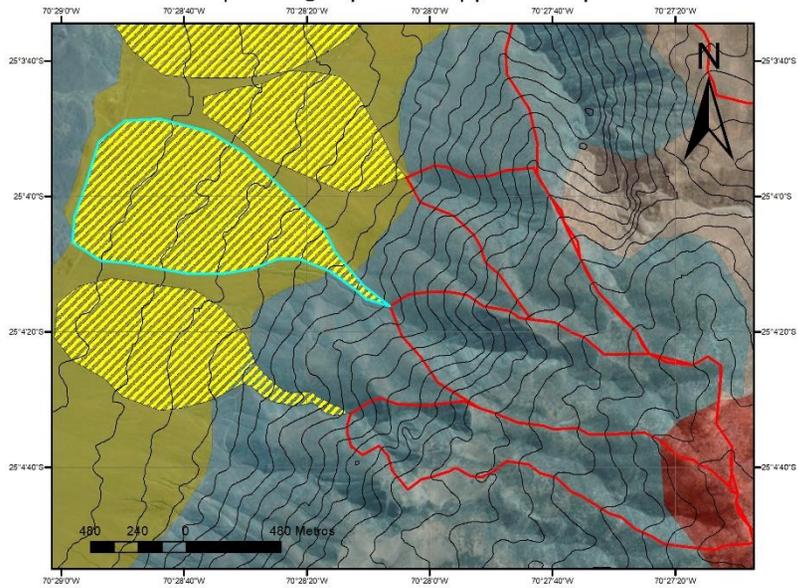
Geología 30k

Código

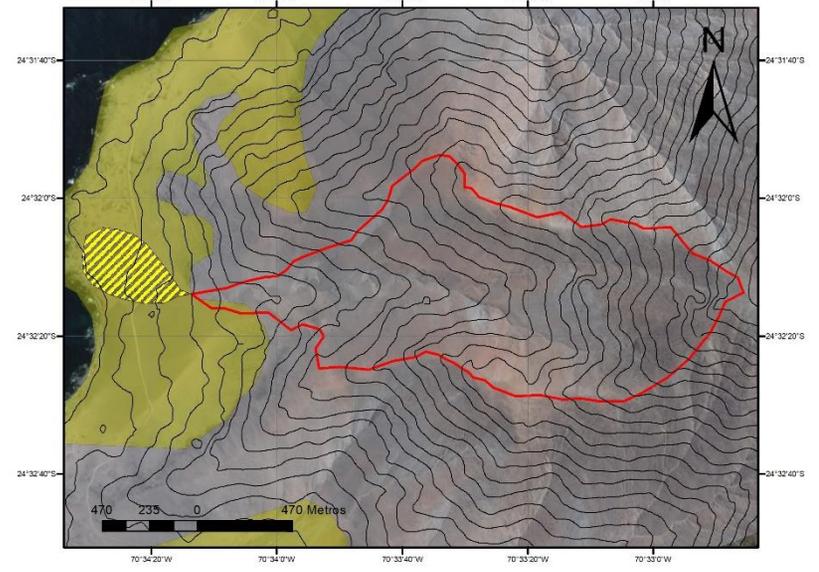
- Jln
- Jmm(gd)
- Kilt
- Qac
- abanicos zona 2
- Curvas\_40m



|Geología | Zona 2 | |ZN-2-05|



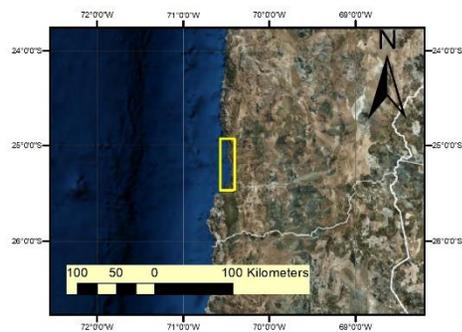
|Geología | Zona 2 | |ZN-2-06|



Geología 30k

Código

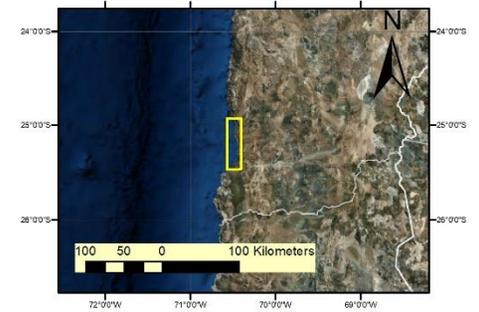
- Jln
- Jmm(gd)
- Kilt
- Qac
- abanicos zona 2
- Curvas\_40m



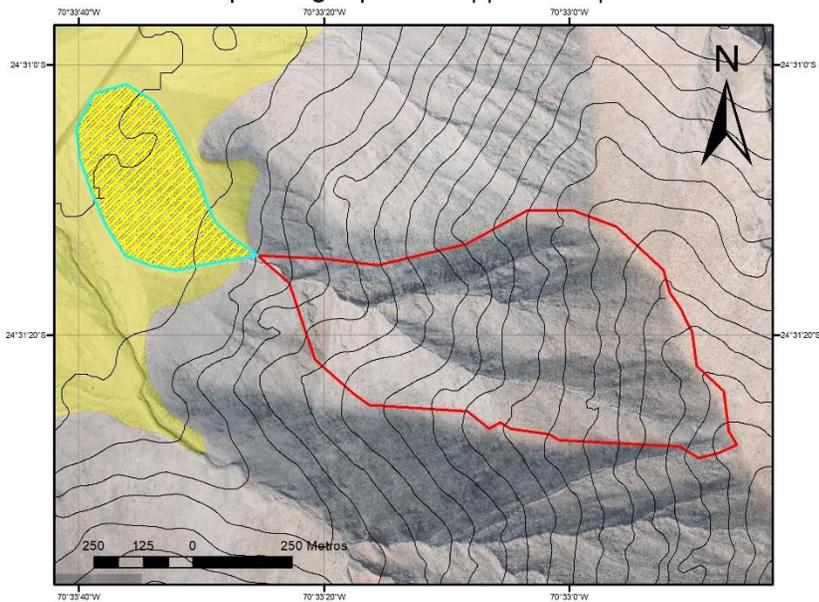
Geología 30k

Código

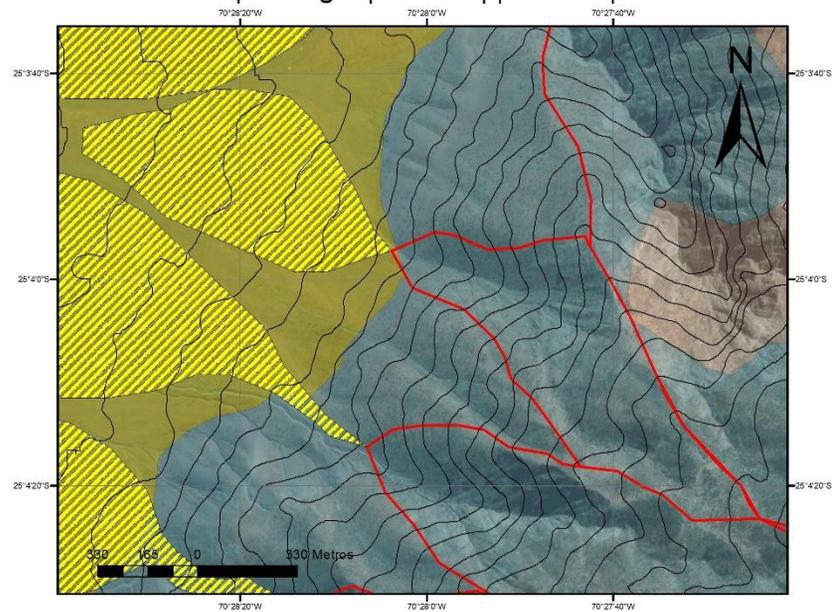
- Jbe
- Qac
- abanicos zona 2
- Curvas\_40m



|Geología | Zona 2 | |ZN-2-07|



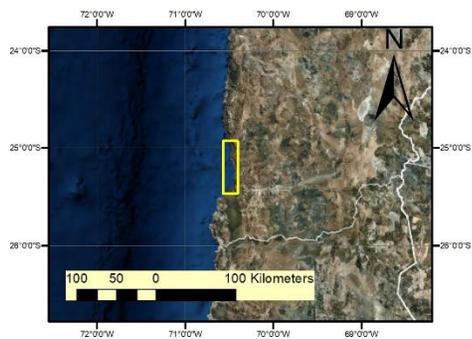
|Geología | Zona 2 | |ZN-2-08|



Geología 30k

Código

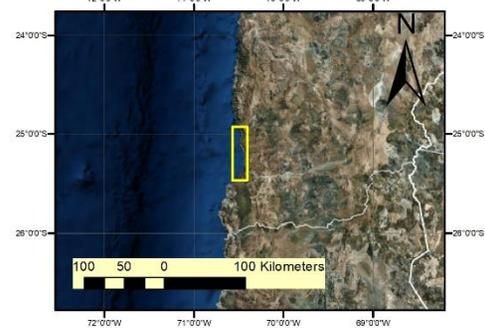
- Jbe
- Qac
- abanicos zona 2
- Curvas\_40m



Geología 30k

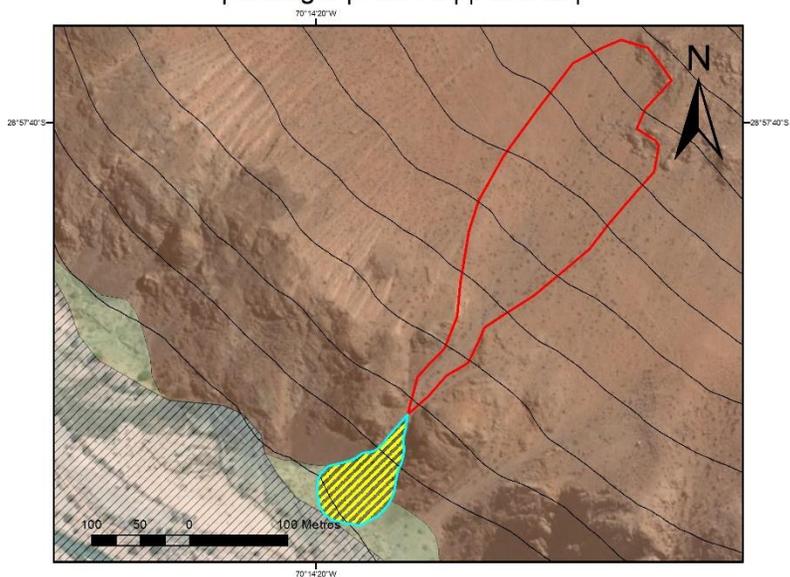
Código

- Jln
- Jmm(gd)
- Qac
- abanicos zona 2
- Curvas\_40m

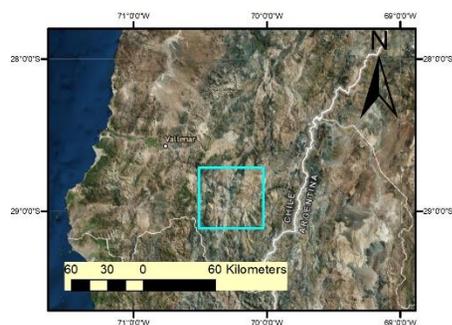


## Anexo A-3: Mapeo geológico de abanicos aluviales seleccionados de la zona 3

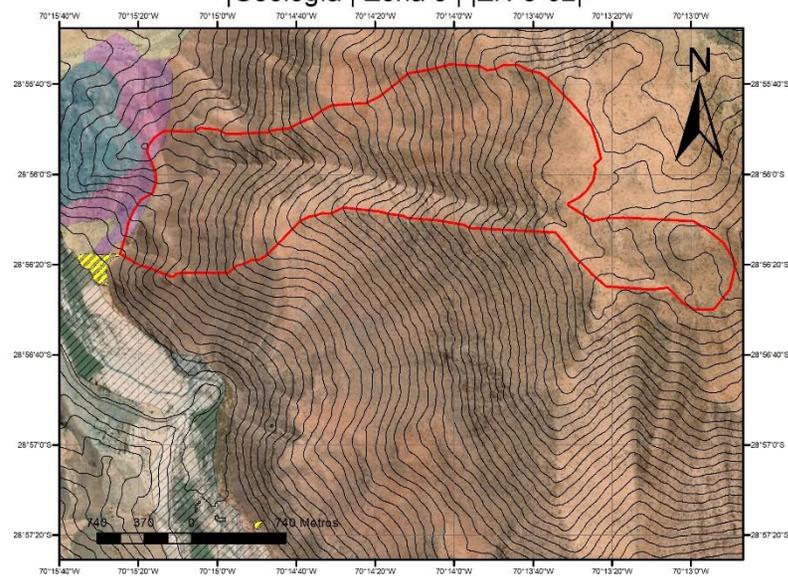
|Geología | Zona 3 | |ZN-3-01|



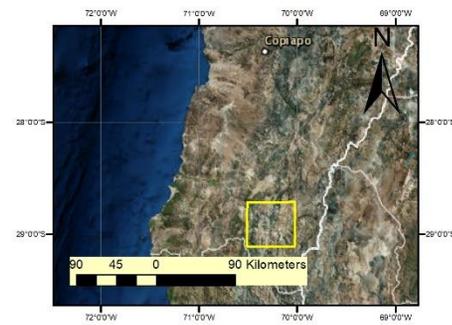
- Geología 30k**
- Código**
- CPtg
  - PIHcc
  - PIHf
  - Abanicos\_zona3
  - Curvas 40m



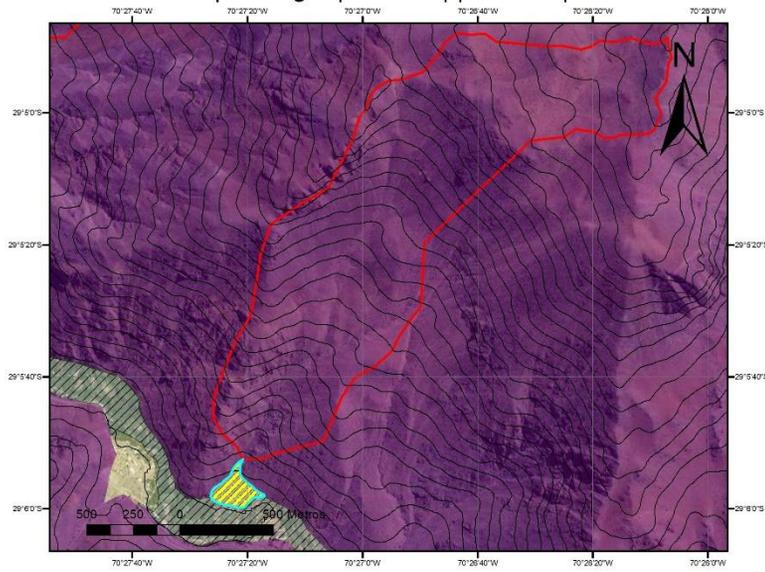
|Geología | Zona 3 | |ZN-3-02|



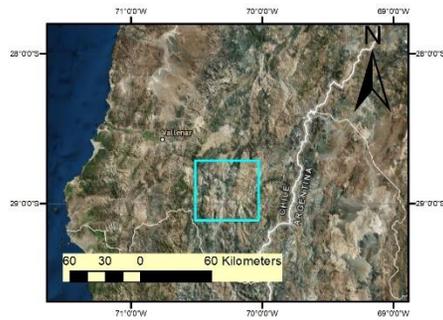
- Geología 30k**
- Código**
- CPtg
  - JI
  - PIHf
  - Qal
  - TrJIt3
  - Curvas 40m



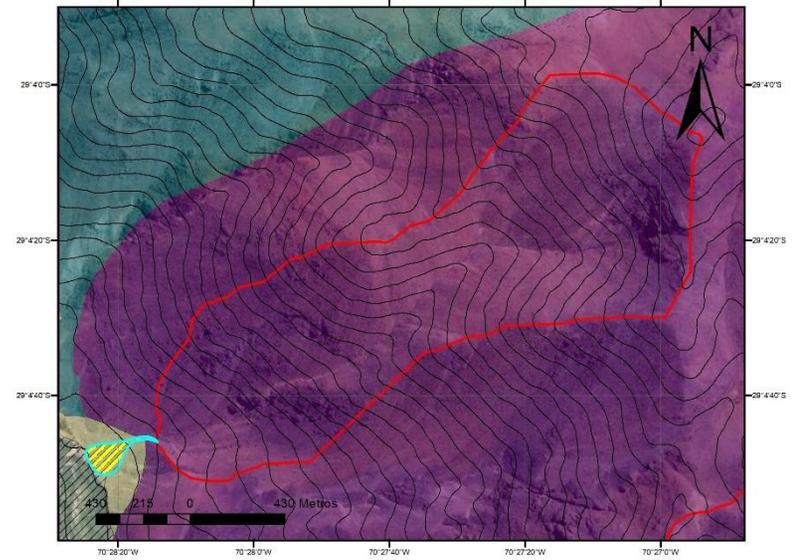
|Geología | Zona 3 | |ZN-3-04|



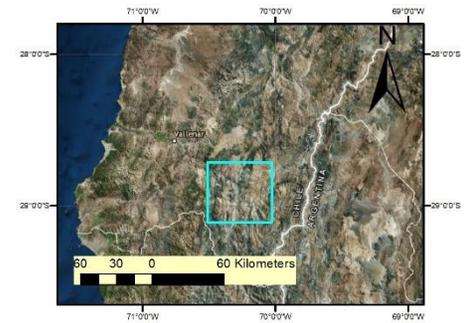
- Geología 30k**
- Código**
- PIHcc
  - PIHf
  - TrJv
  - Abanicos\_zona3
  - Curvas 40m



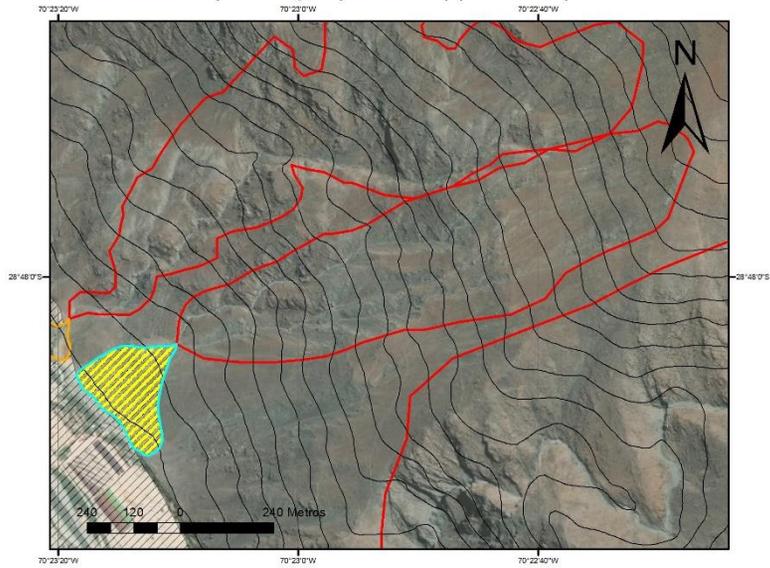
|Geología | Zona 3 | |ZN-3-05|



- Geología 30k**
- Código**
- Ja
  - PIHcc
  - PIHf
  - TrJv
  - Abanicos\_zona3
  - Curvas 40m



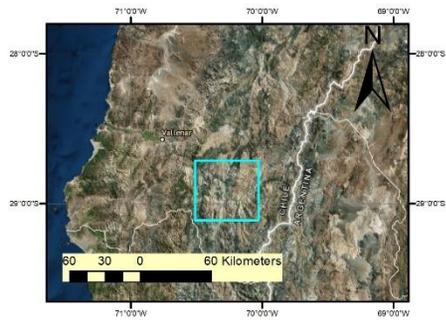
|Geología | Zona 3 | |ZN-3-06|



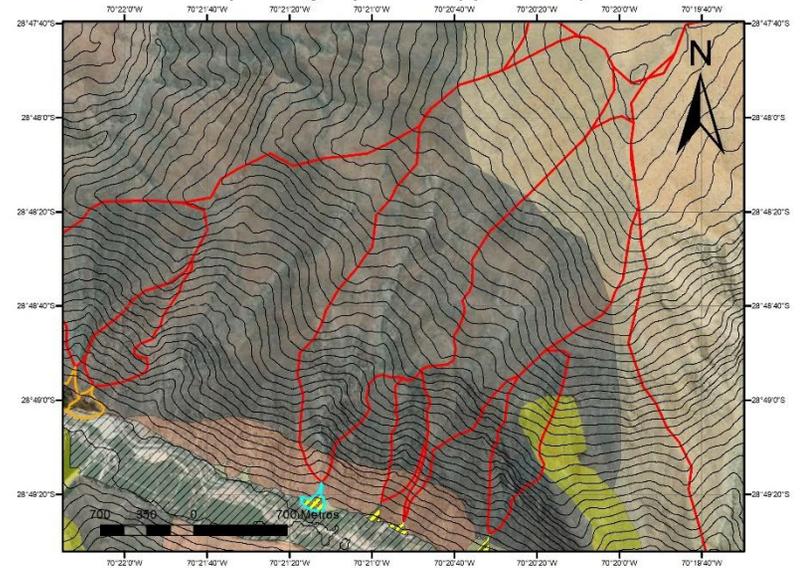
Geología 30k

Código

-  Cct
-  PIHf
-  Abanicos\_zona3
-  Curvas 40m



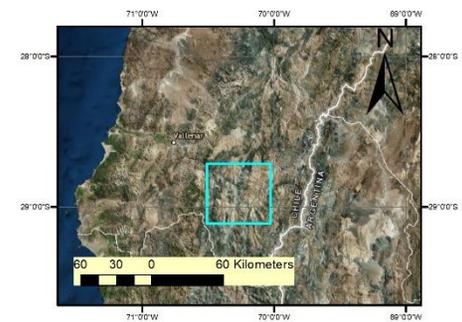
|Geología | Zona 3 | |ZN-3-07|



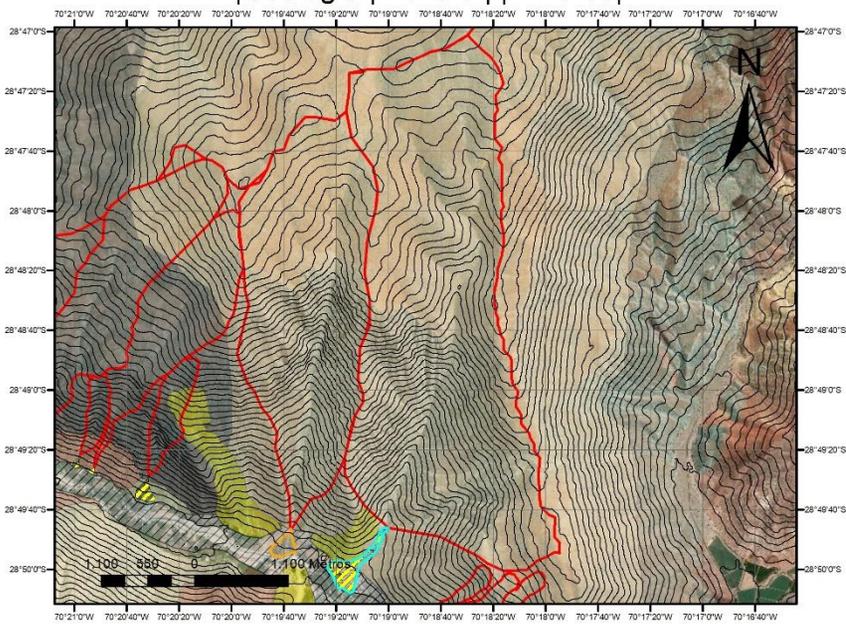
Geología 30k

Código

-  CPtg
-  Cct
-  Palddj
-  PIHcc
-  PIHf
-  Qac
-  Qal
-  Abanicos\_zona3
-  Curvas 40m



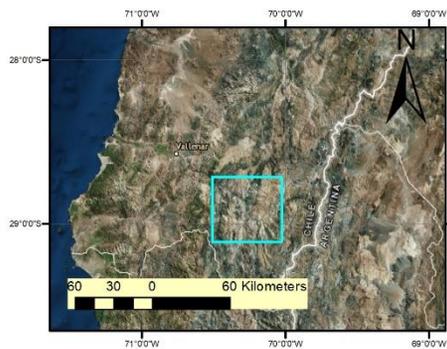
|Geología | Zona 3 | |ZN-3-08|



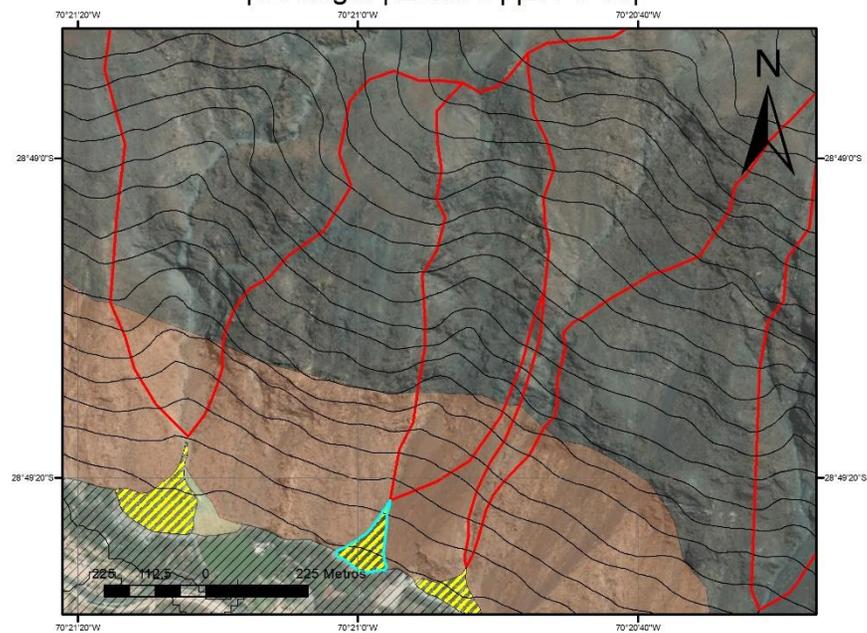
**Geología 30k**

**Código**

- CPtg
- Cct
- Egh
- Palddj
- PIHf
- Qac
- Qal
- Abanicos\_zona3
- Curvas 40m



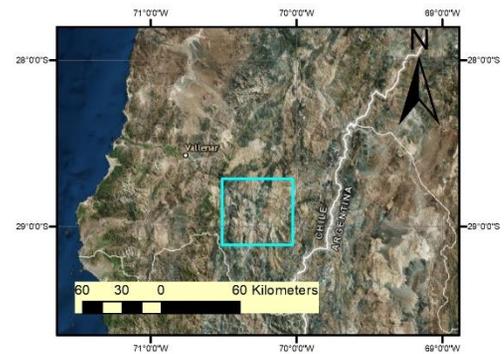
|Geología | Zona 3 | |ZN-3-10|



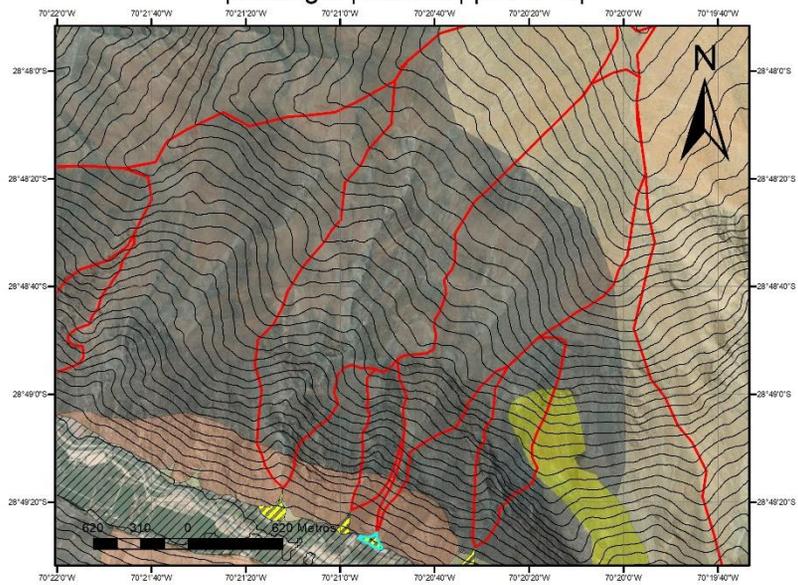
**Geología 30k**

**Código**

- CPtg
- Cct
- PIHcc
- PIHf
- Abanicos\_zona3
- Curvas 40m



|Geología | Zona 3 | |ZN-3-11|

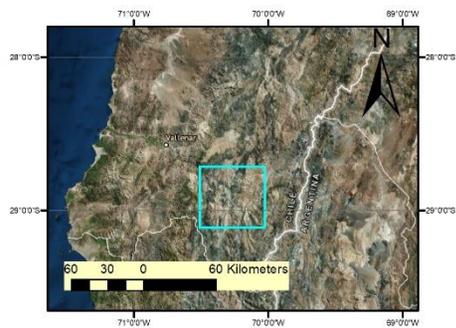


**Geología 30k**

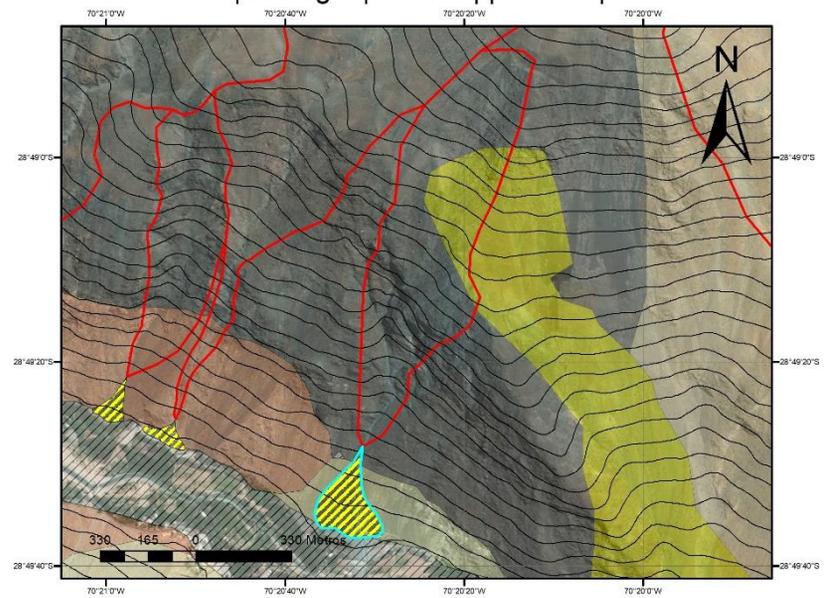
**Código**

- CPTg
- Cct
- Palddj
- PIHcc
- PIHf
- Qac
- Qal
- Abanicos\_zona3

— Curvas 40m



|Geología | Zona 3 | |ZN-3-12|

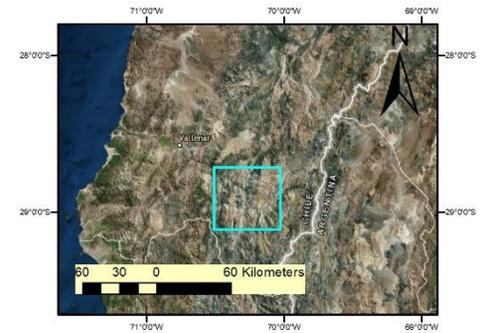


**Geología 30k**

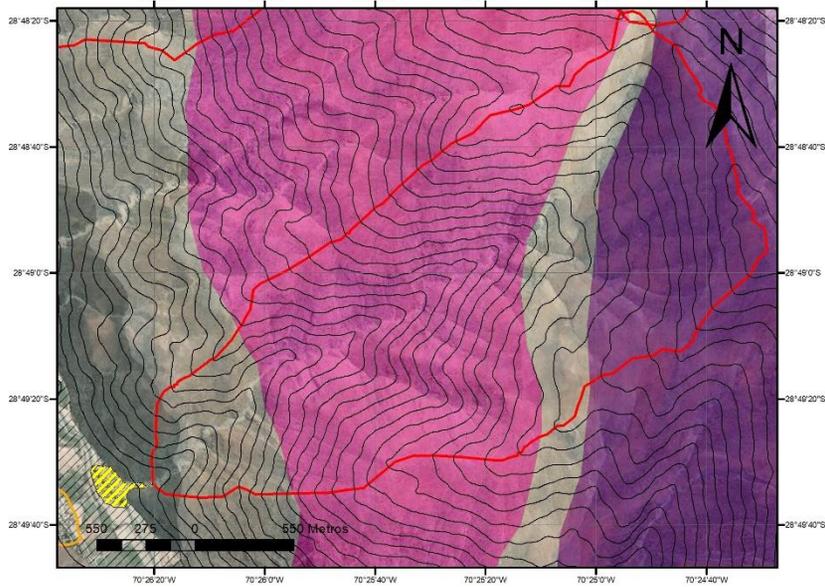
**Código**

- CPTg
- Cct
- Egh
- Palddj
- PIHf
- Qac
- Qal
- Abanicos\_zona3

— Curvas 40m



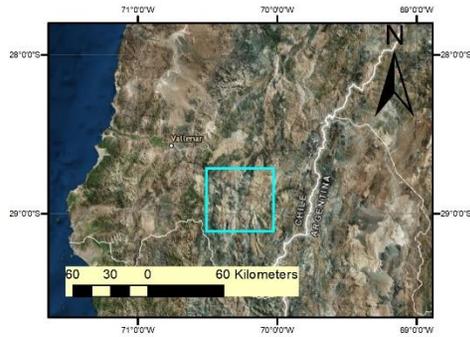
|Geología | Zona 3 | |ZN-3-13|



**Geología 30k**

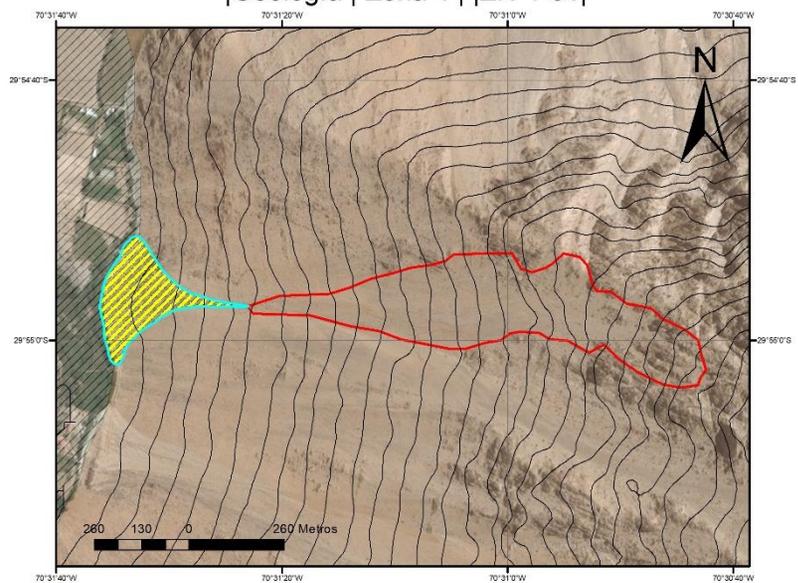
**Código**

- Cct
- PTrbp
- PTrgc
- PIHf
- TrJv
- Trsf
- Abanicos\_zona3
- Curvas 40m



Anexo A-4: Mapeo geológico de abanicos aluviales seleccionados de la zona 4

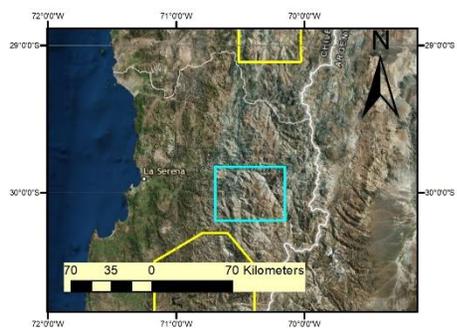
|Geología | Zona 4 | |ZN-4-01|



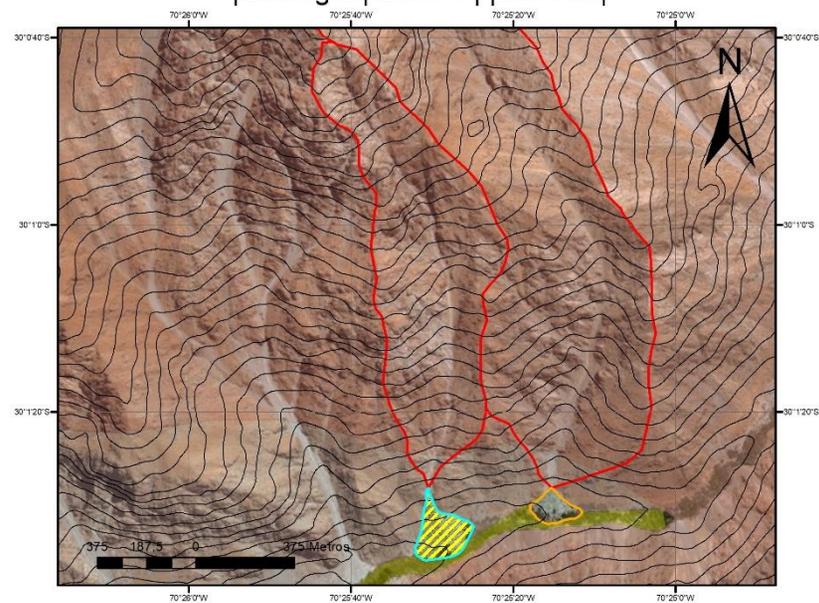
Geología 30k

Código

- Cch
- PIHf
- abanicos\_z4
- Curvas 40m



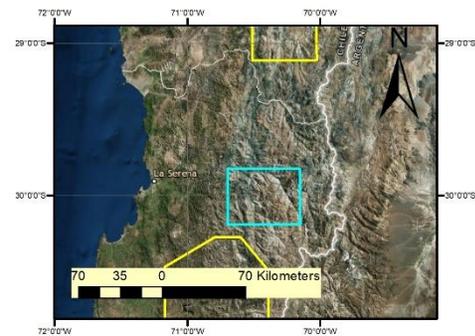
|Geología | Zona 4 | |ZN-4-02|



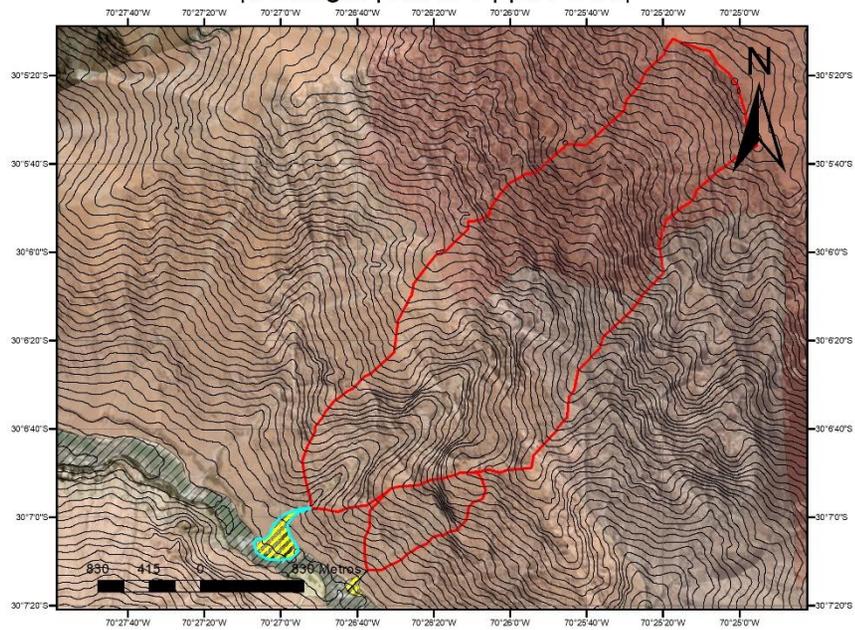
Geología 30k

Código

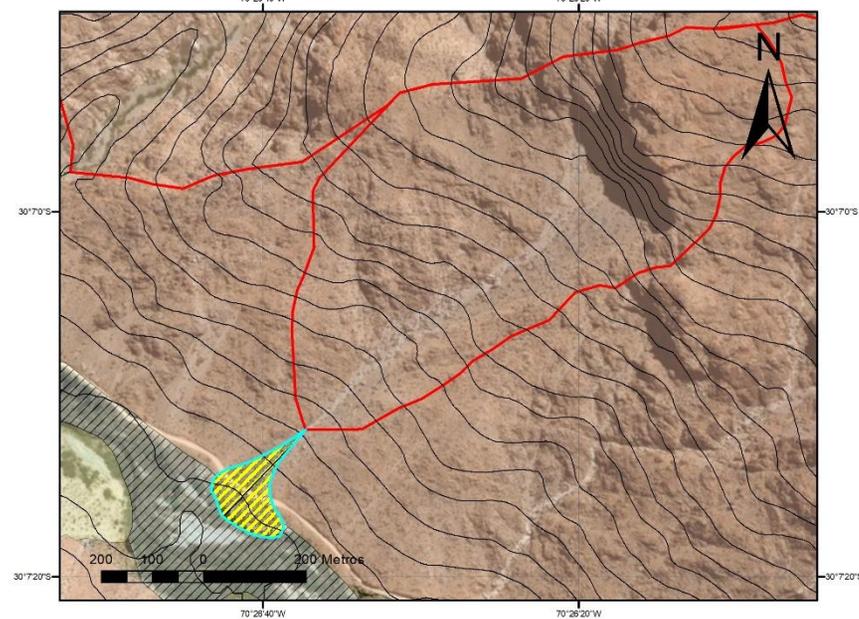
- Cc
- Cg
- Qac
- abanicos\_z4
- Curvas 40m



|Geología | Zona 4 | |ZN-4-03|



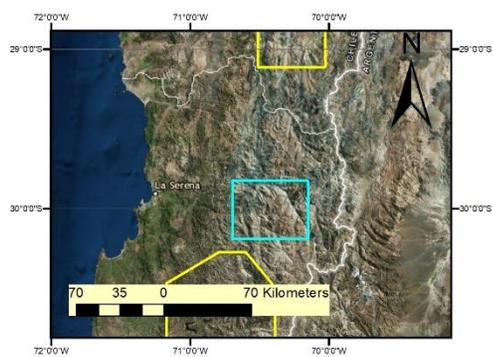
|Geología | Zona 4 | |ZN-4-04|



Geología 30k

Código

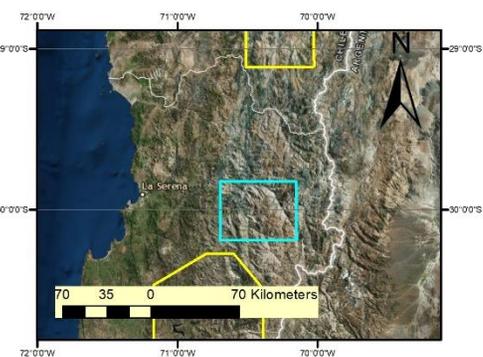
- Cc
- Cg
- PTr
- PIHcc
- PIHf
- abanicos\_z4
- Curvas 40m



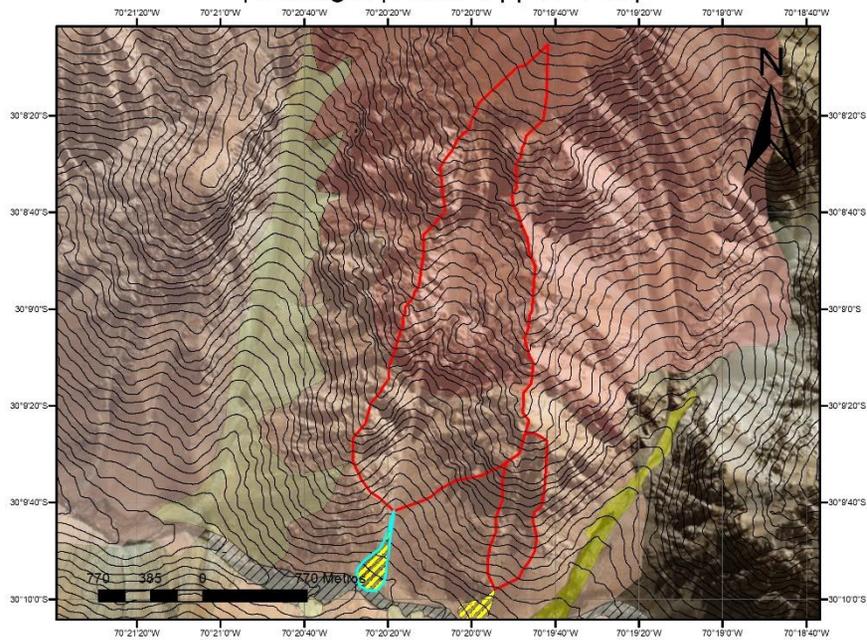
Geología 30k

Código

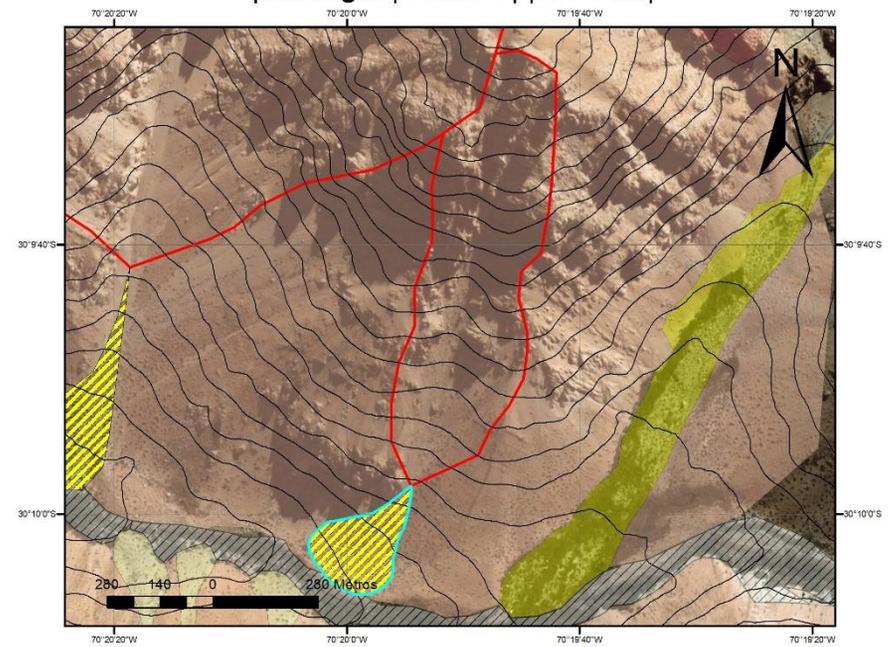
- PTr
- PIHcc
- PIHf
- abanicos\_z4
- Curvas 40m



|Geología | Zona 4 | |ZN-4-05|



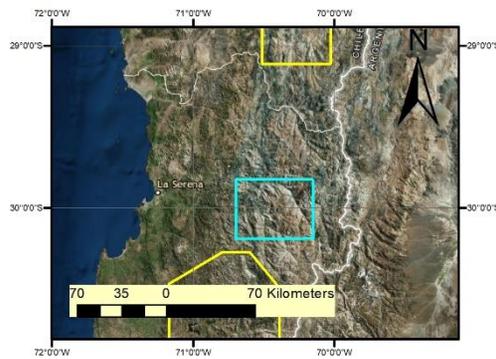
|Geología | Zona 4 | |ZN-4-06|



Geología 30k

Código

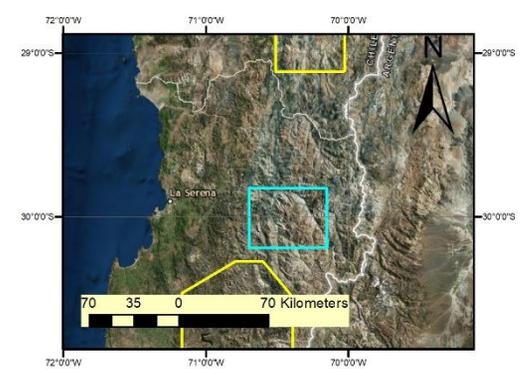
- Cc
- Cg
- PTr
- PIHcc
- PIHf
- Qac
- abanicos\_z4
- Curvas 40m



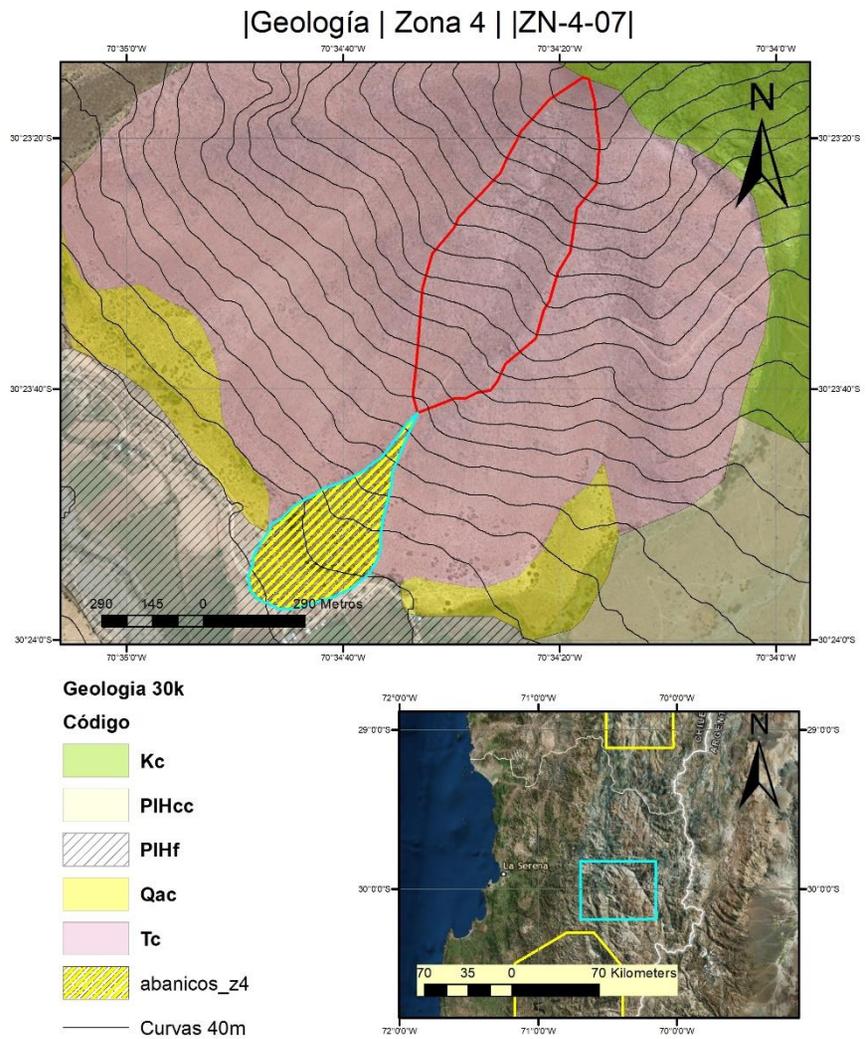
Geología 30k

Código

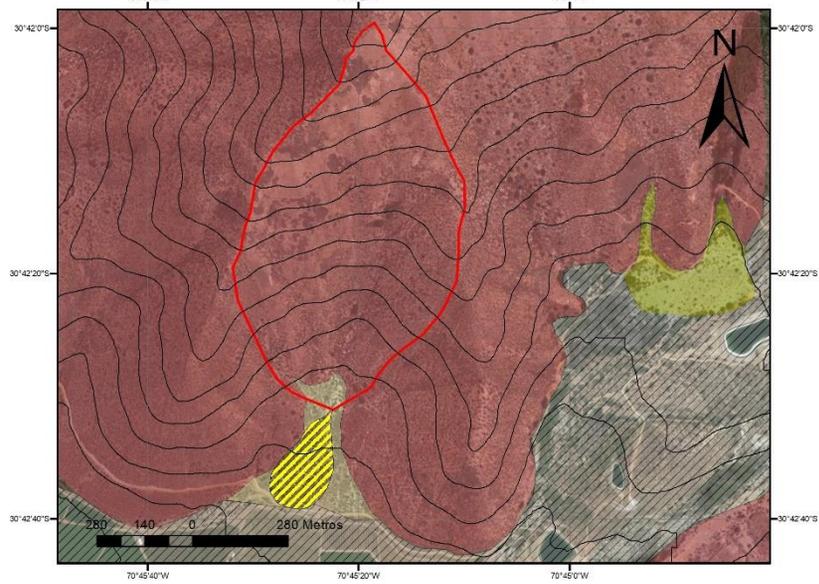
- Cg
- PTr
- PIHcc
- PIHf
- Qac
- abanicos\_z4
- Curvas 40m



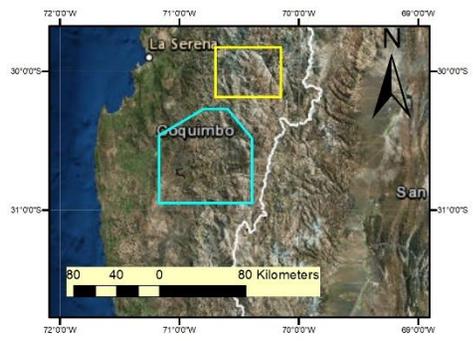
Anexo A-5: Mapeo geológico de abanicos aluviales seleccionados de la zona 5



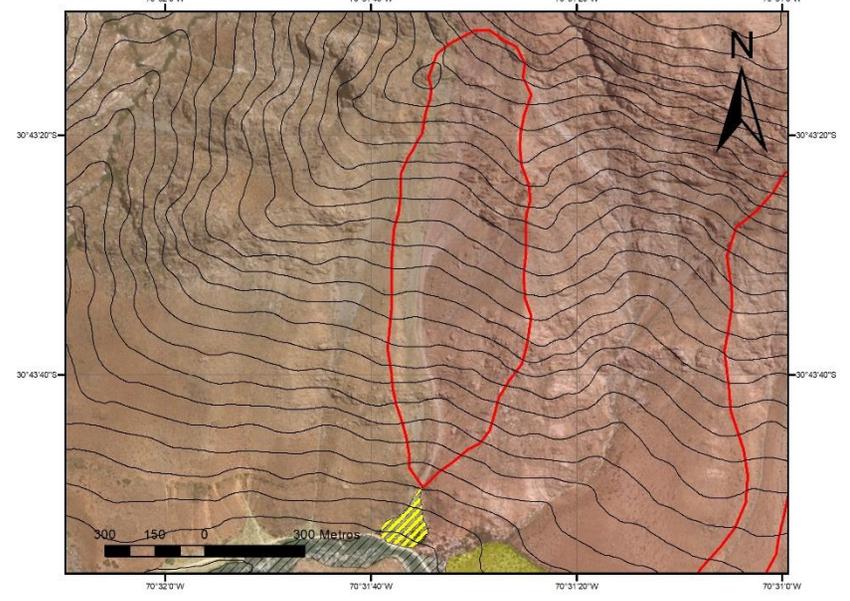
|Geología | Zona 5 | |ZN--01|



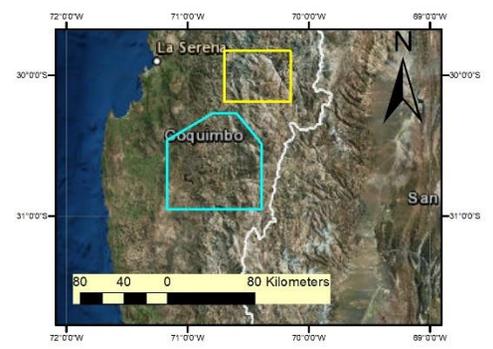
- Geología 30k**
- Código**
- KPadp(g)
  - PIHcc
  - PIHf
  - Qac
  - abanicos\_z5
  - Curvas 40m



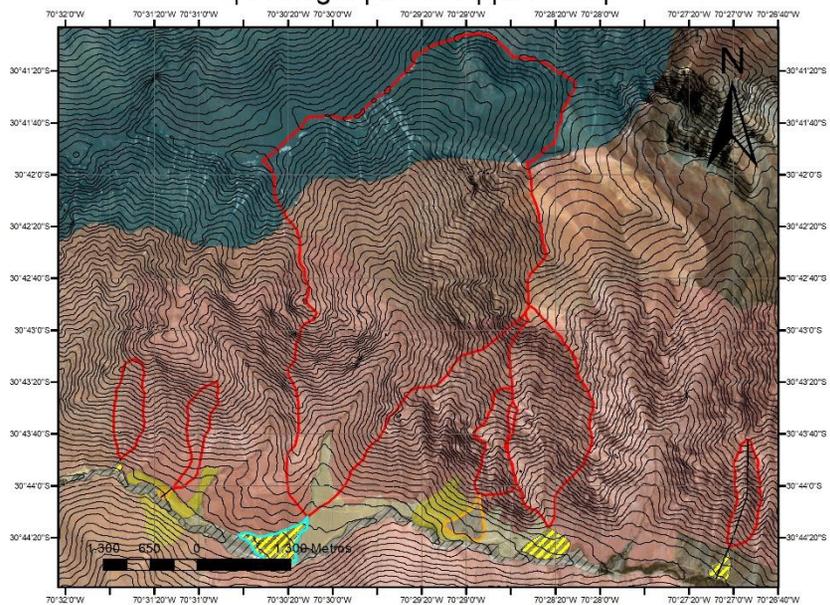
|Geología | Zona 5 | |ZN--02|



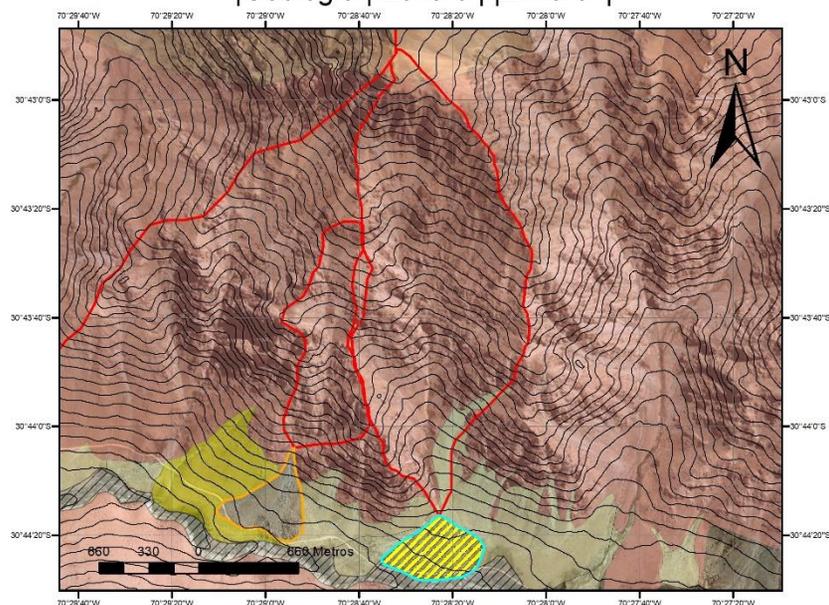
- Geología 30k**
- Código**
- Cg
  - Pg
  - PIHcc
  - PIHf
  - Qac
  - abanicos\_z5
  - Curvas 40m



|Geología | Zona 5 | |ZN-5-03|



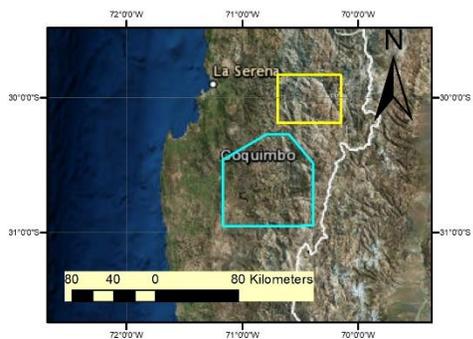
|Geología | Zona 5 | |ZN-5-04|



Geología 30k

Código

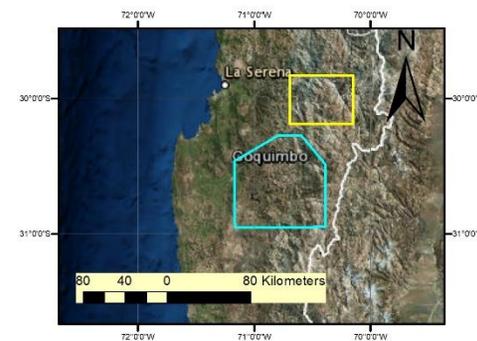
- Cg
- Ja
- Pg
- PIHcc
- PIHf
- Qac
- abanicos\_z5
- Curvas 40m



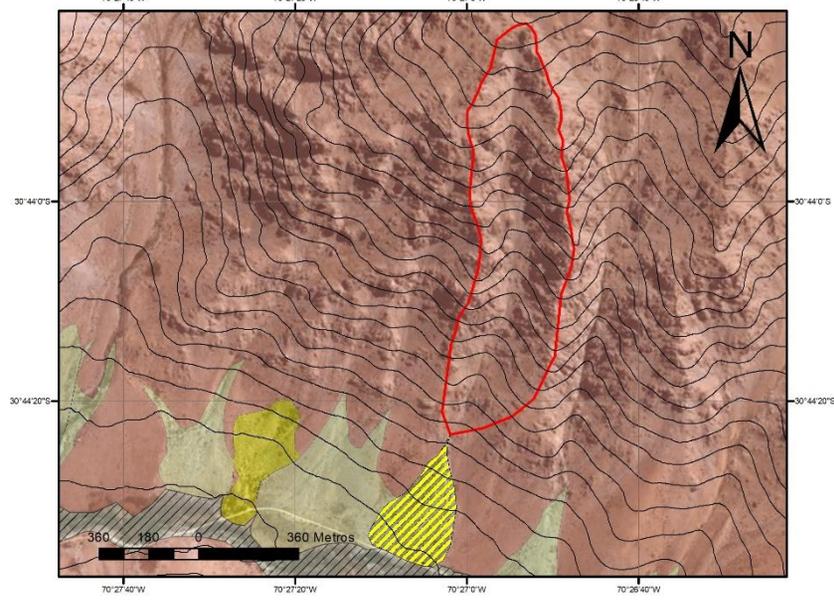
Geología 30k

Código

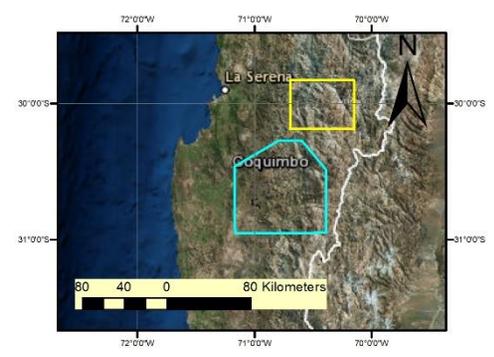
- Cg
- Pg
- PIHcc
- PIHf
- Qac
- abanicos\_z5
- Curvas 40m



|Geología | Zona 5 | |ZN-5-05|

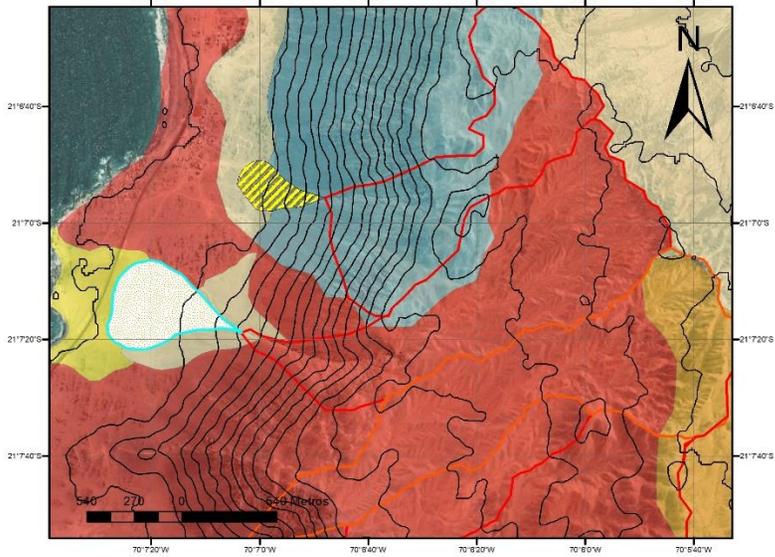


- Geología 30k**
- Código**
- Cg
  - PIHcc
  - PIHf
  - Qac
  - abanicos\_z5
  - Curvas 40m

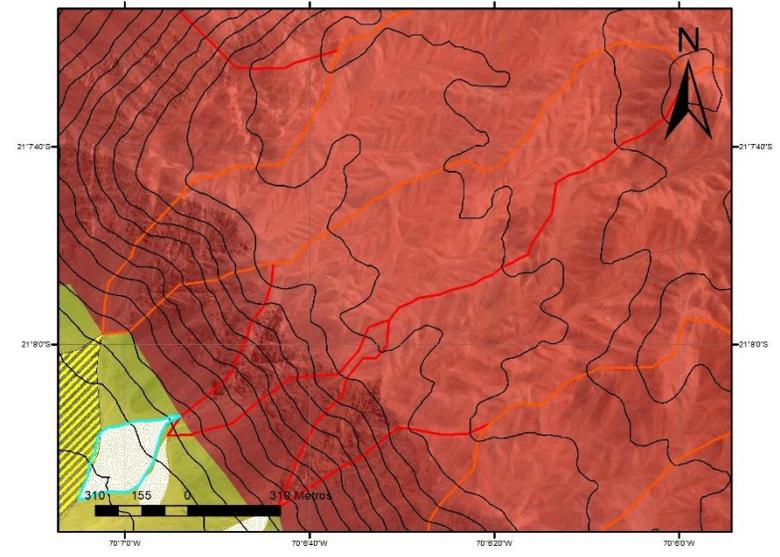


Anexo A-6: Mapeo geológico de abanicos aluviales no seleccionados de la zona 1

|Geología | Zona 1 | |ab\_extraz1\_2|



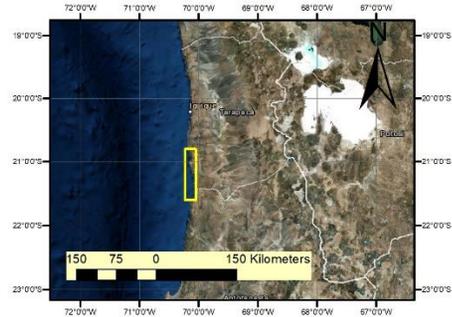
|Geología | Zona 1 | |ab\_extraz1\_3|



**Geología 30k**

**Código**

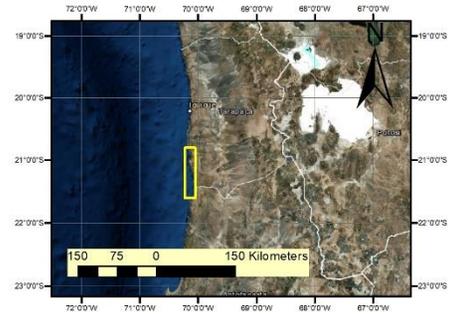
- Jln
- Kgd
- PIHcc
- Qac
- Qal
- Qpd
- abanicos z1 no selec.
- Curvas\_40m



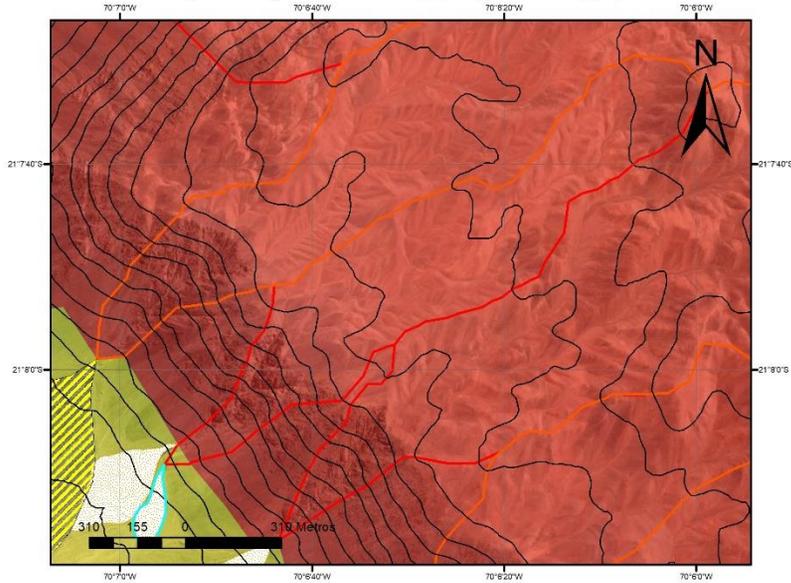
**Geología 30k**

**Código**

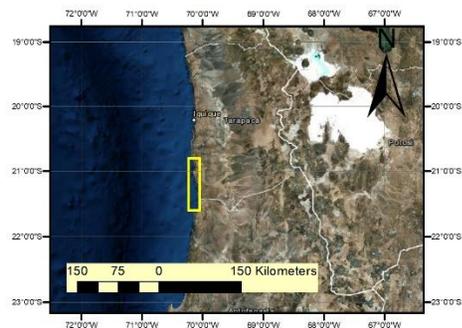
- Kgd
- Qac
- abanicos z1 no selec.
- Curvas\_40m



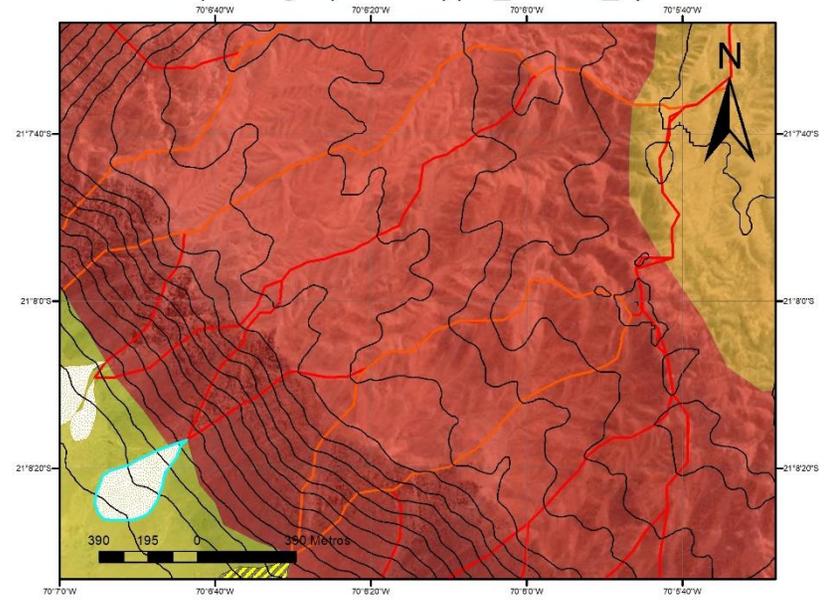
|Geología | Zona 1 | |ab\_extraz1\_4|



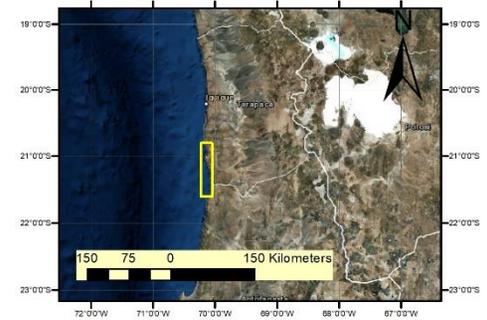
- Geología 30k**
- Código**
- Kgd
  - Qac
  - abanicos z1 no selec.
  - Curvas\_40m



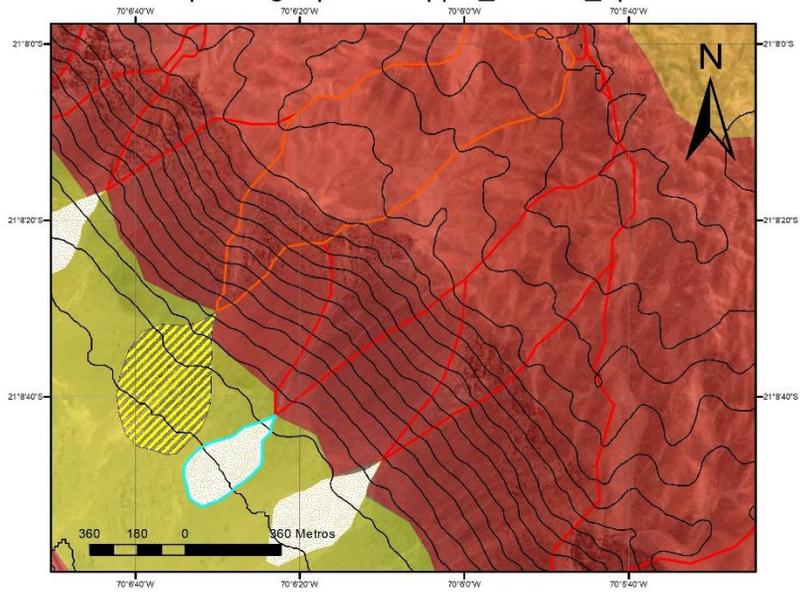
|Geología | Zona 1 | |ab\_extraz1\_5|



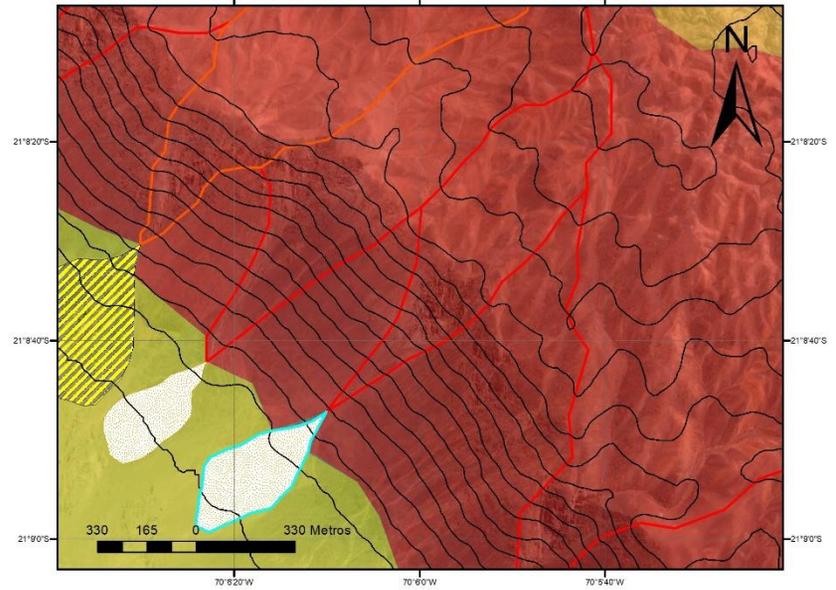
- Geología 30k**
- Código**
- Kgd
  - Qac
  - Qpd
  - abanicos z1 no selec.
  - Curvas\_40m



|Geología | Zona 1 | |ab\_extraz1\_6|



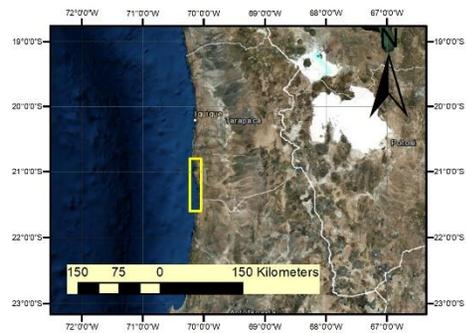
|Geología | Zona 1 | |ab\_extraz1\_7|



Geología 30k

Código

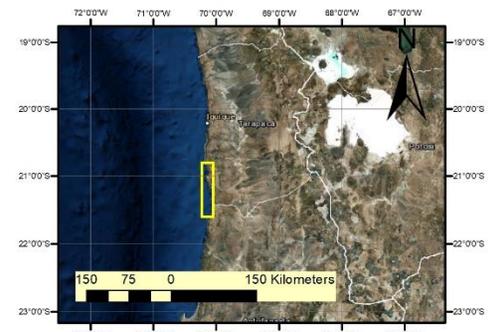
- Kgd
- Qac
- Qpd
- abanicos z1 no selec.
- Curvas\_40m



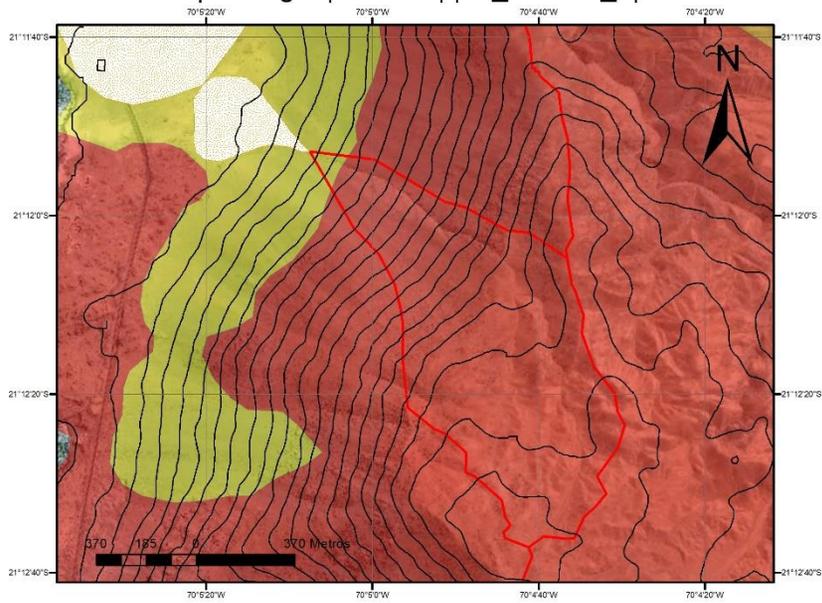
Geología 30k

Código

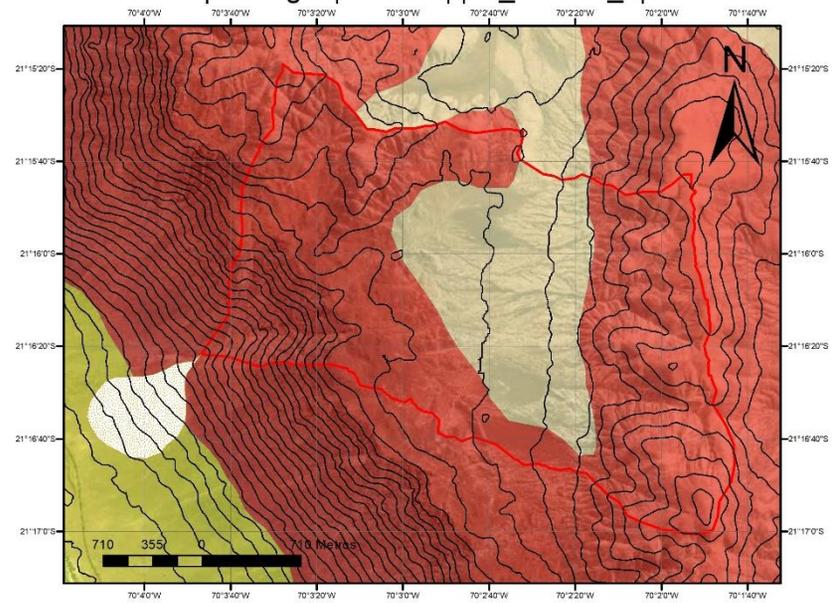
- Kgd
- Qac
- Qpd
- abanicos z1 no selec.
- Curvas\_40m



|Geología | Zona 1 | |ab\_extraz1\_8|



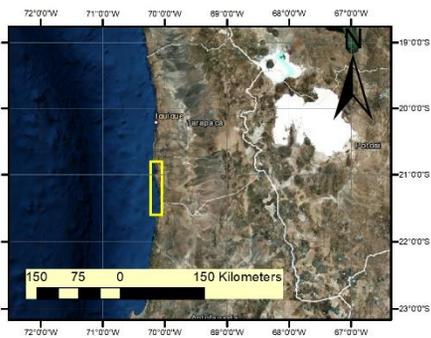
|Geología | Zona 1 | |ab\_extraz1\_9|



**Geología 30k**

**Código**

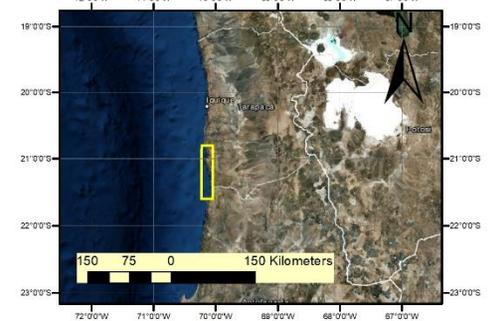
- Kgd
- Qac
- Qpd
- abánicos z1 no selec.
- Curvas\_40m



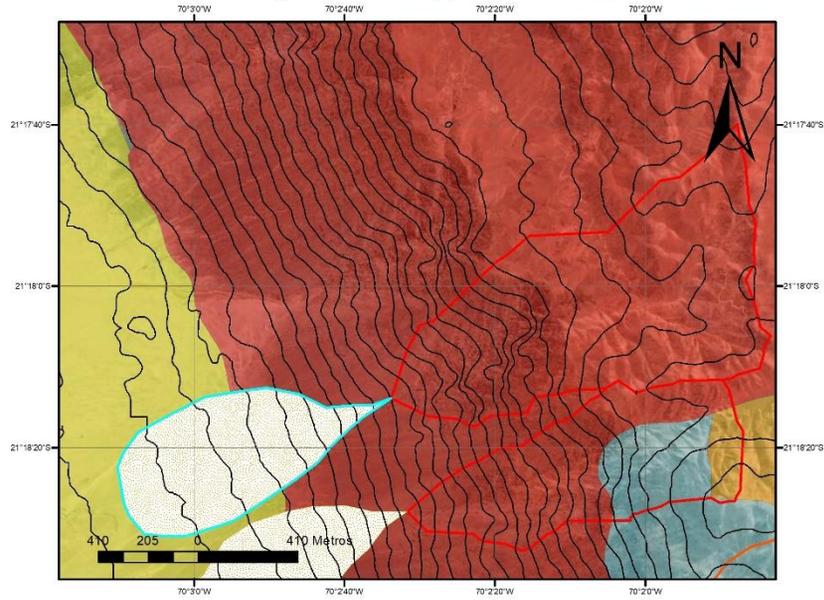
**Geología 30k**

**Código**

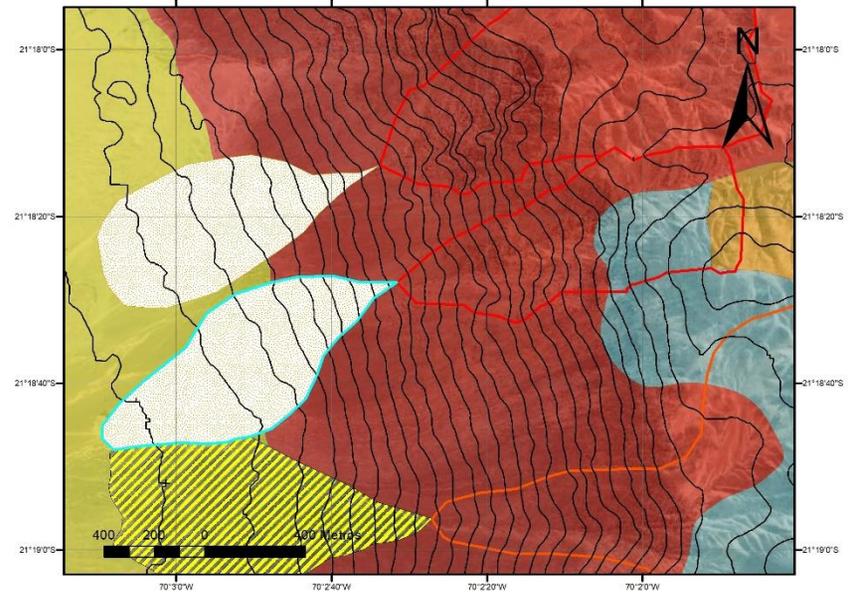
- Kgd
- Qac
- Qal
- abánicos z1 no selec.
- Curvas\_40m



|Geología | Zona 1 | |ab\_extraz1\_10|



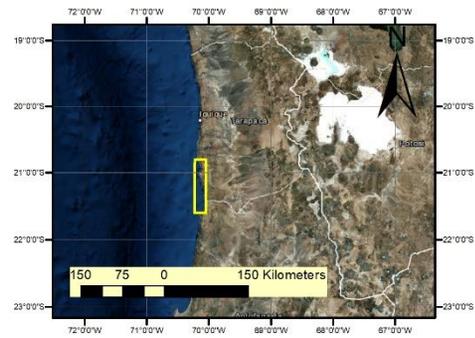
|Geología | Zona 1 | |ab\_extraz1\_11|



**Geología 30k**

**Código**

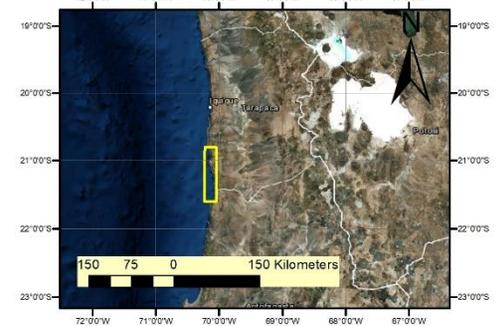
- Jln
- Kgd
- Qac
- Qpd
- abanicos z1 no selec.
- Curvas\_40m



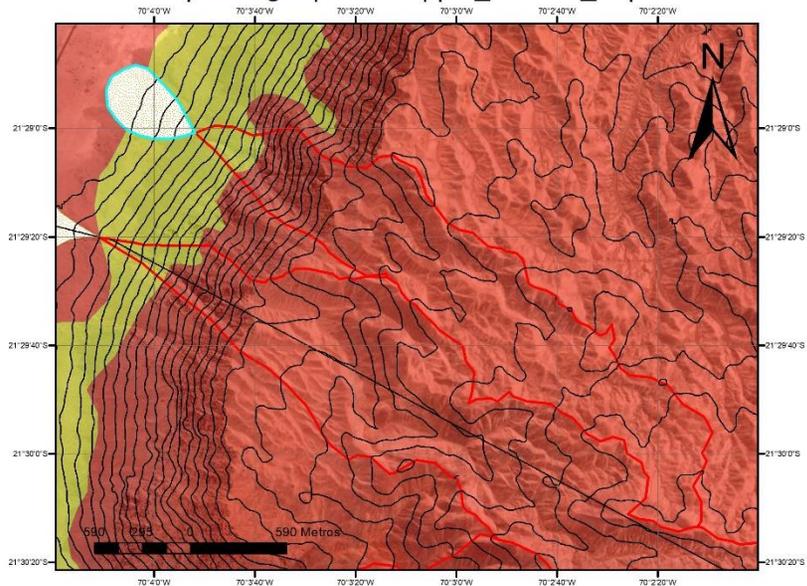
**Geología 30k**

**Código**

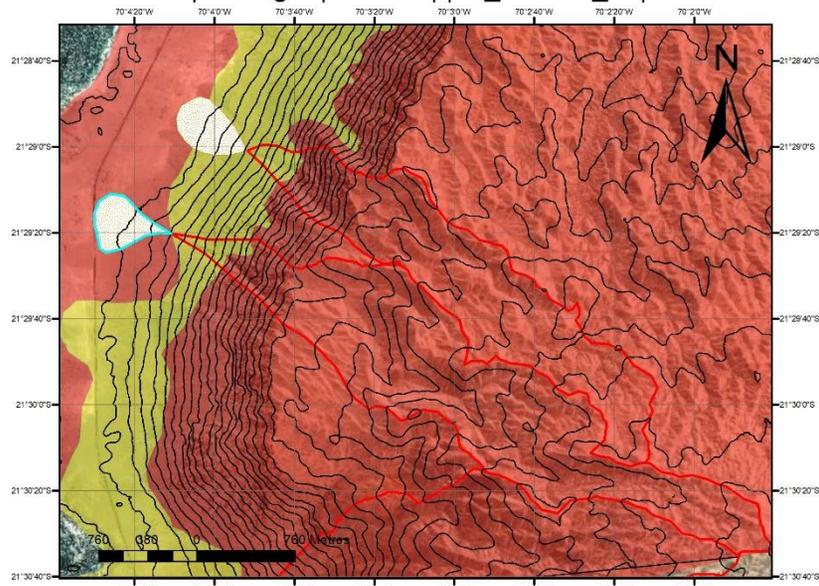
- Jln
- Kgd
- Qac
- Qpd
- abanicos z1 no selec.
- Curvas\_40m



[Geología | Zona 1 | |ab\_extraz1\_12]



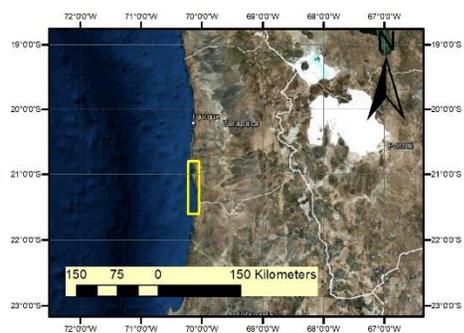
[Geología | Zona 1 | |ab\_extraz1\_13]



Geología 30k

Código

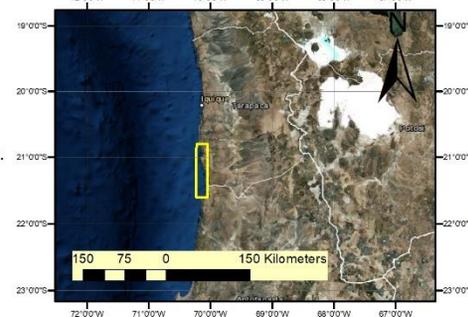
- Kgd
- Qac
- abanicos z1 no selec.
- Curvas\_40m



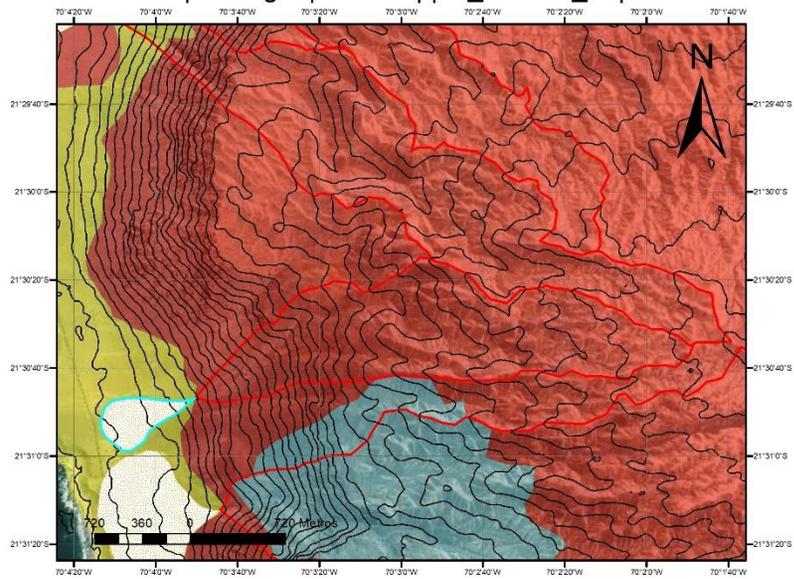
Geología 30k

Código

- Kgd
- Qac
- abanicos z1 no selec.
- Curvas\_40m



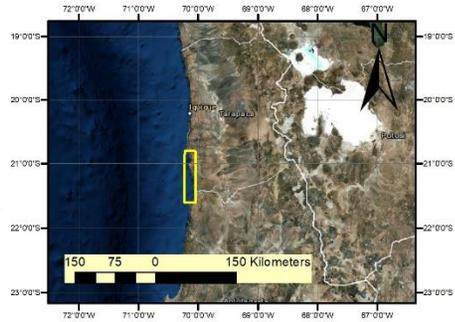
[Geología | Zona 1 | |ab\_extraz1\_14|



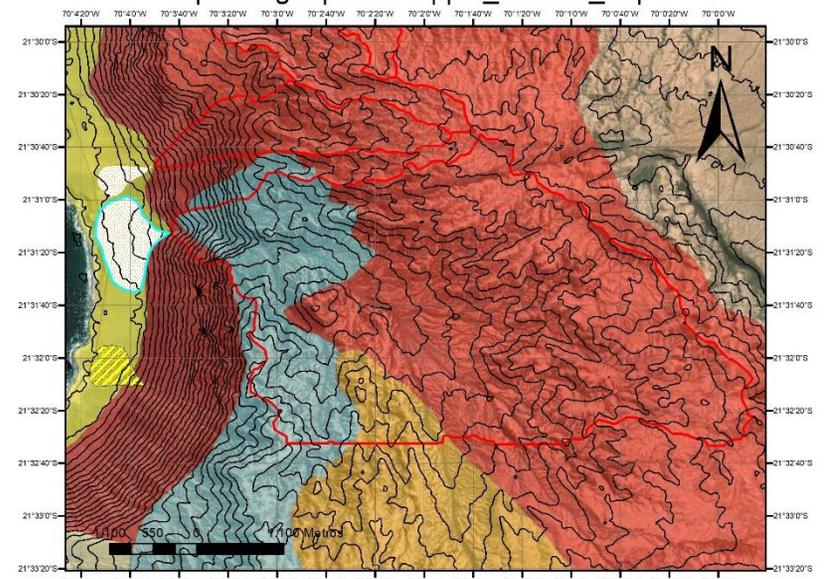
Geología 30k

Código

- Jln
- Kgd
- Qac
- abanicos z1 no selec.
- Curvas\_40m



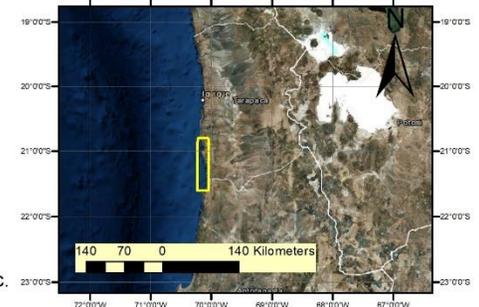
[Geología | Zona 1 | |ab\_extraz1\_15|



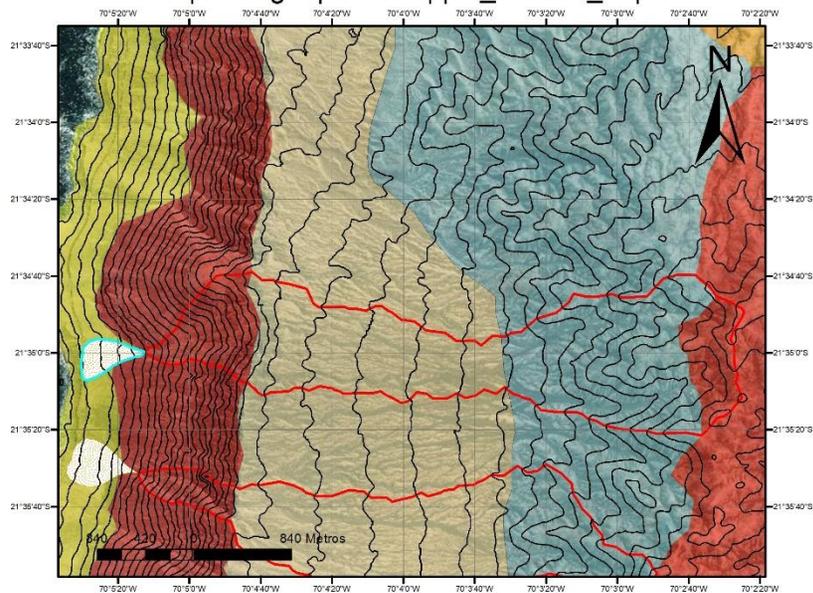
Geología 30k

Código

- Jln
- Kgd
- Qac
- Qal
- Qpd
- abanicos z1 no selec.
- Curvas\_40m



|Geología | Zona 1 | |ab\_extraz1\_17|

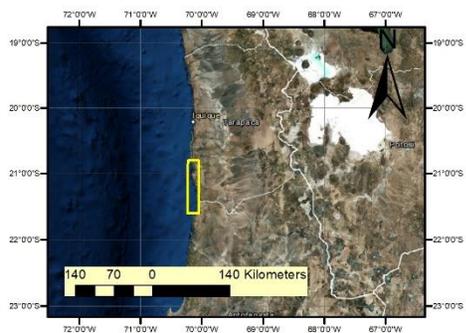


Geología 30k

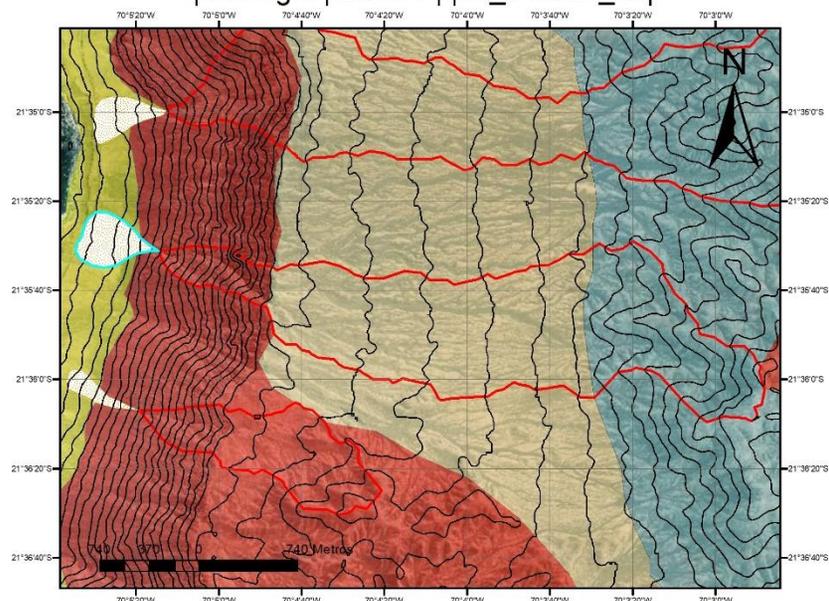
Código

- Jln
- Kgd
- Qac
- Qal
- Qpd
- abanicos z1 no selec.

— Curvas\_40m



|Geología | Zona 1 | |ab\_extraz1\_18|

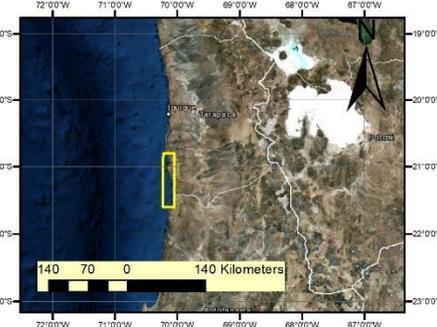


Geología 30k

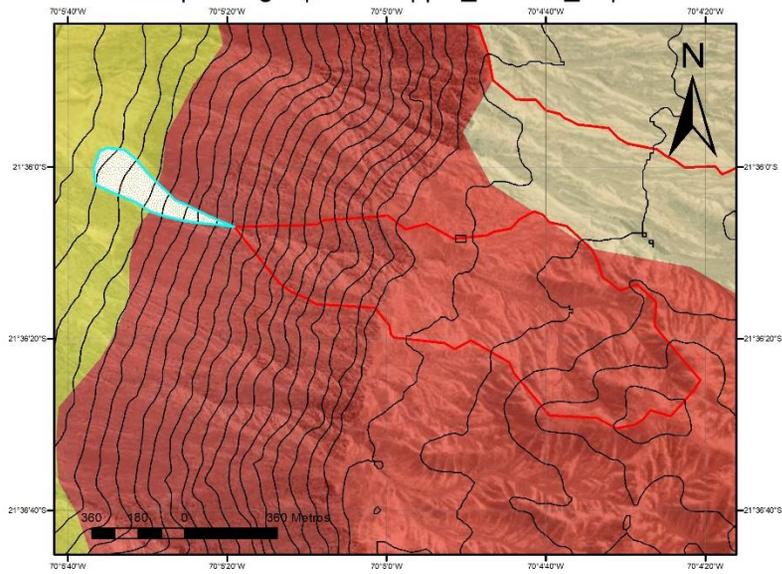
Código

- Jln
- Kgd
- Qac
- Qal
- abanicos z1 no selec.

— Curvas\_40m



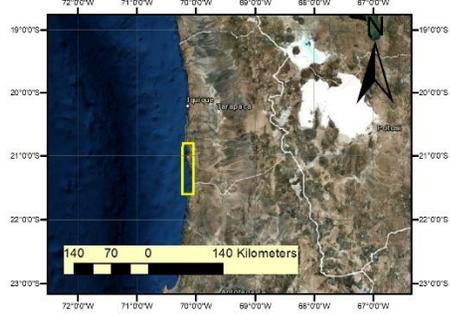
|Geología | Zona 1 | |ab\_extraz1\_19|



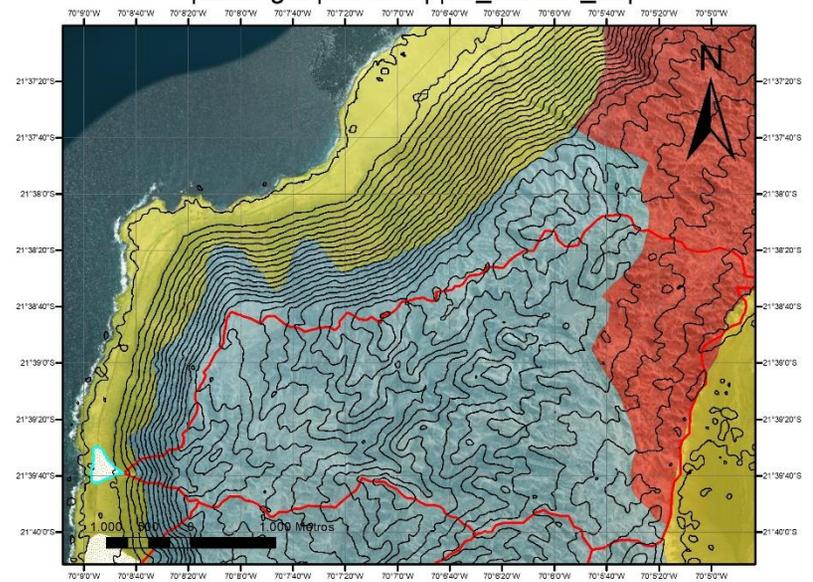
Geología 30k

Código

- Kgd
- Qac
- Qal
- abanicos z1 no selec.
- Curvas\_40m



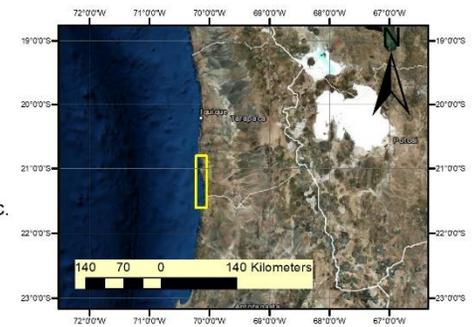
|Geología | Zona 1 | |ab\_extraz1\_20|



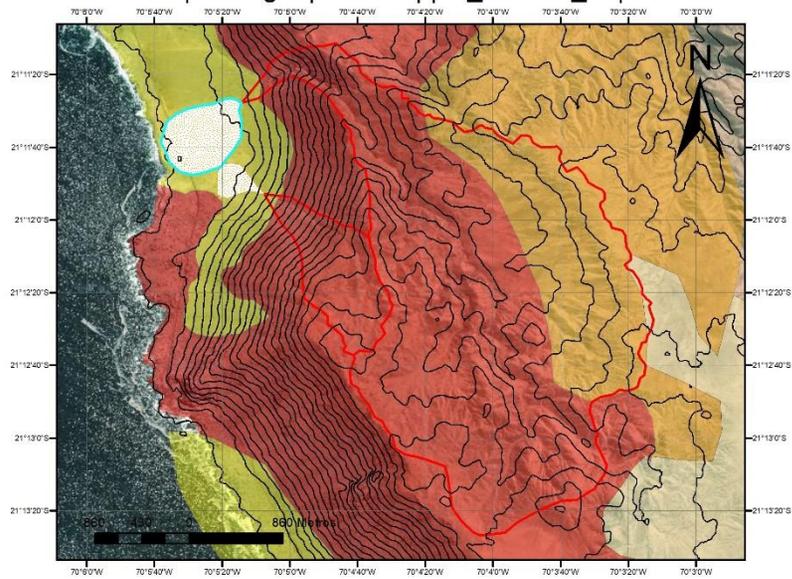
Geología 30k

Código

- Jln
- Kgd
- Qac
- abanicos z1 no selec.
- Curvas\_40m



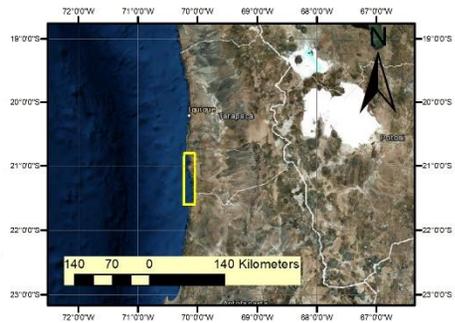
[Geología | Zona 1 | |ab\_extraz1\_21]



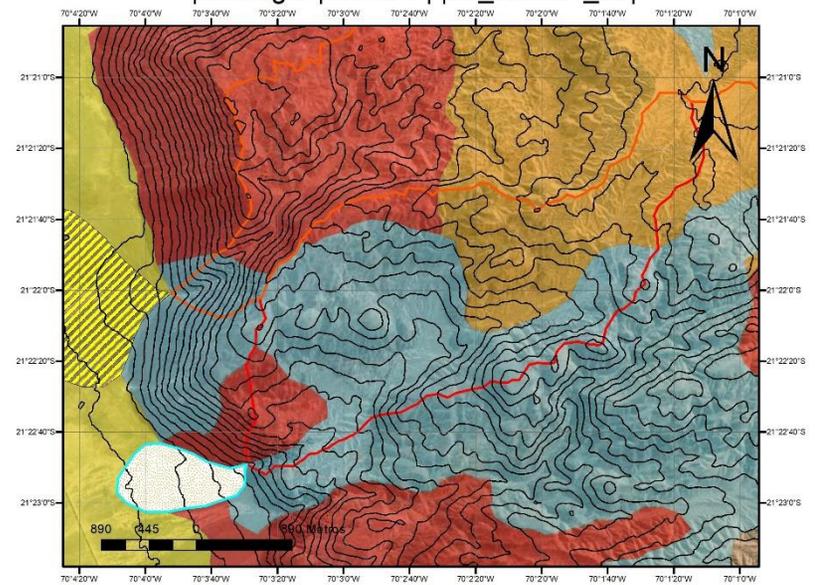
Geología 30k

Código

- Kgd
- Qac
- Qal
- Qpd
- abanicos z1 no selec.
- Curvas\_40m



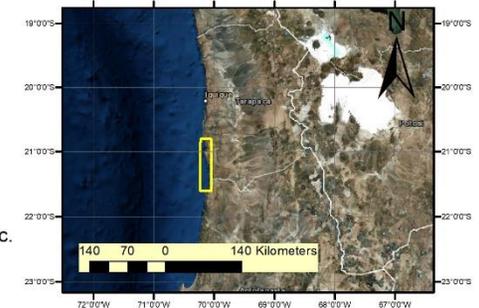
[Geología | Zona 1 | |ab\_extraz1\_22]



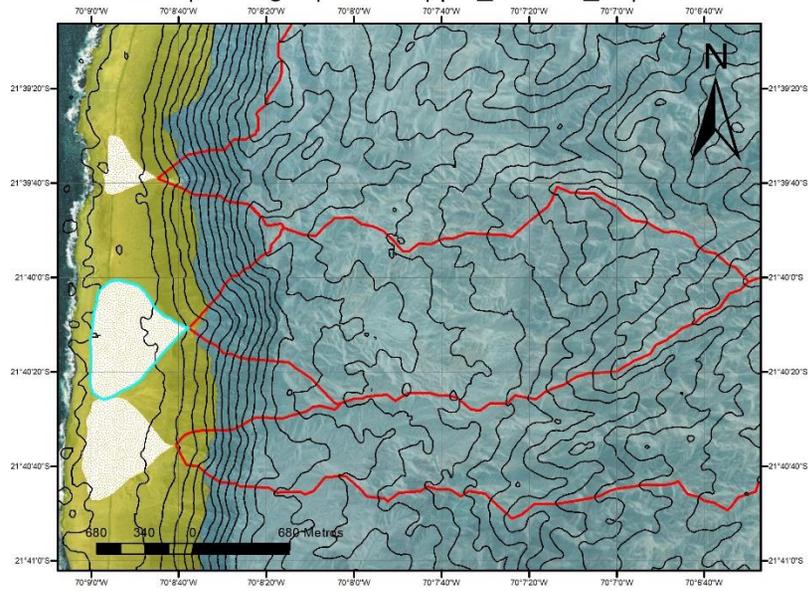
Geología 30k

Código

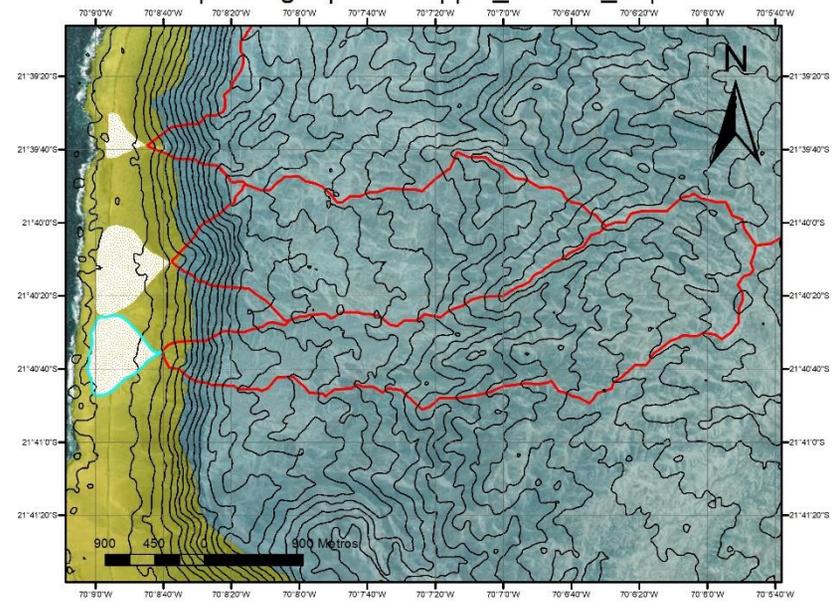
- Jln
- Kgd
- Qac
- Qpd
- abanicos z1 no selec.
- Curvas\_40m



|Geología | Zona 1 | |ab\_extraz1\_23|



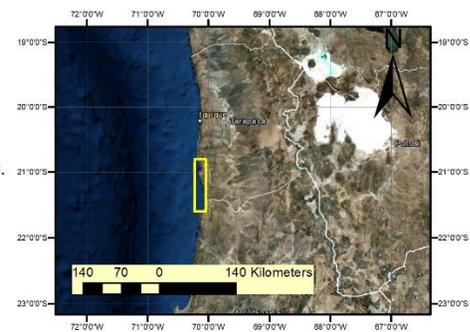
|Geología | Zona 1 | |ab\_extraz1\_24|



Geología 30k

Código

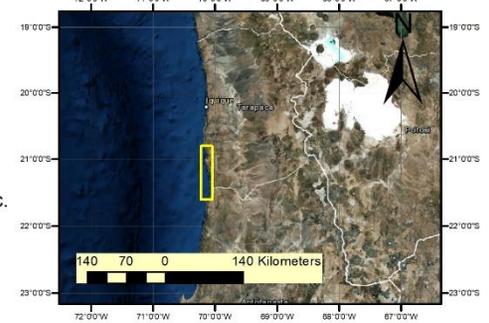
- Jln
- Qac
- abanicos z1 no selec.
- Curvas\_40m



Geología 30k

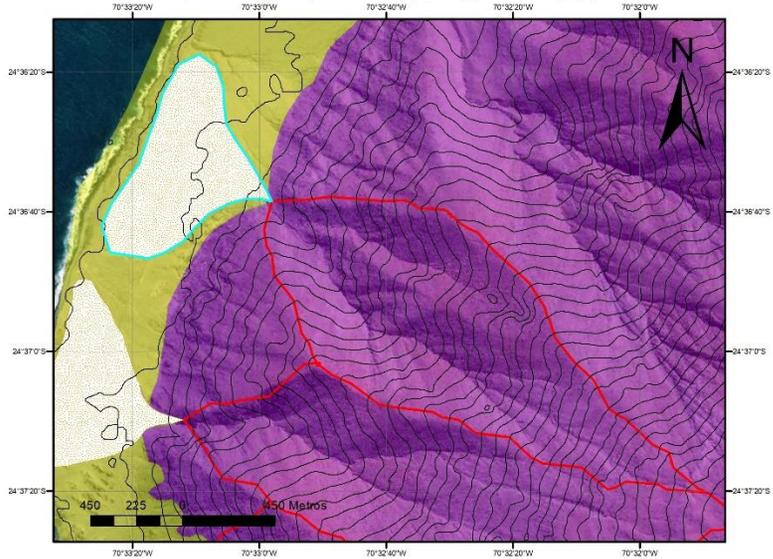
Código

- Jln
- Kgd
- Qac
- abanicos z1 no selec.
- Curvas\_40m

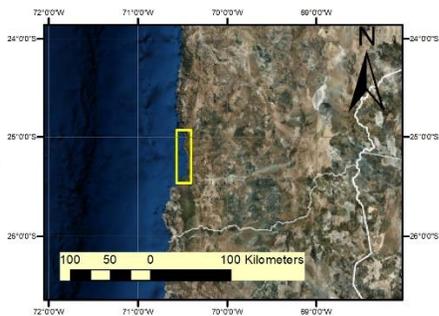


# Anexo A-7: Mapeo geológico de abanicos aluviales no seleccionados de la zona 2

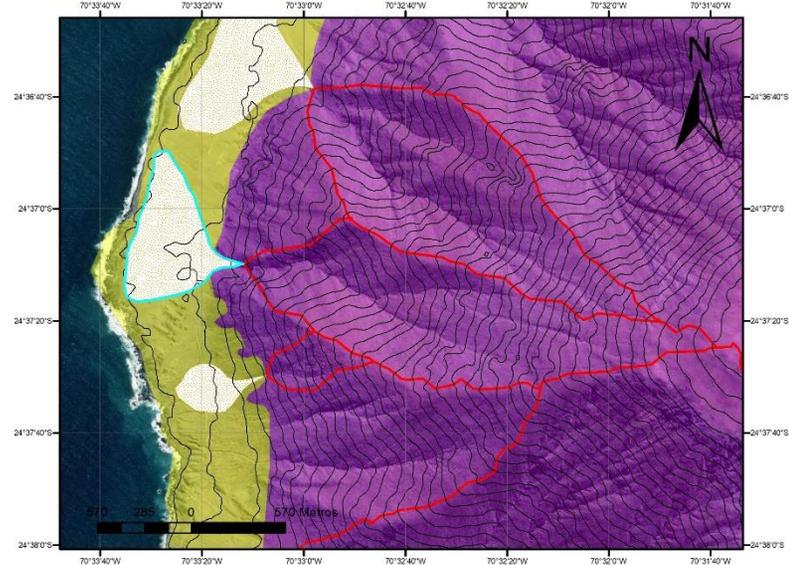
|Geología | Zona 2 | |ab\_extraz2\_1|



- Geología 30k**
- Código**
- Jp
  - Qac
  - abanicos z2 no selec.
  - Curvas\_40m

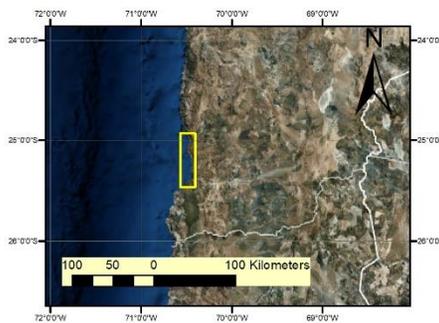


|Geología | Zona 2 | |ab\_extraz2\_2|

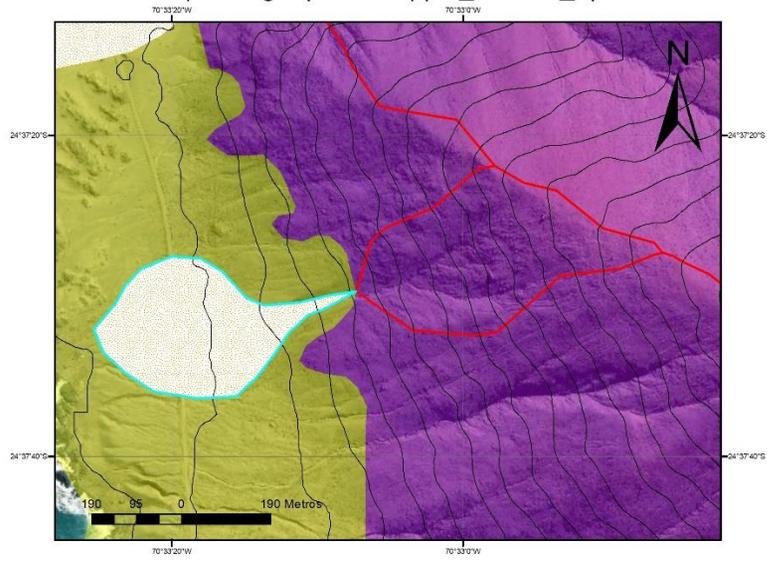


**Geología 30k**

- Código**
- Jp
  - Qac
  - abanicos z2 no selec.
  - Curvas\_40m



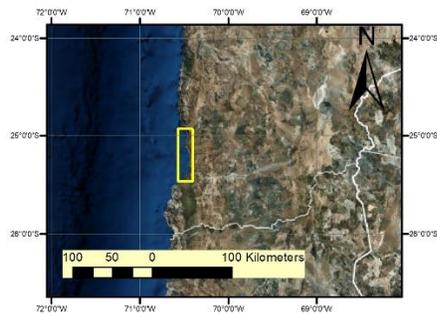
[Geología | Zona 2 | |ab\_extraz2\_3|]



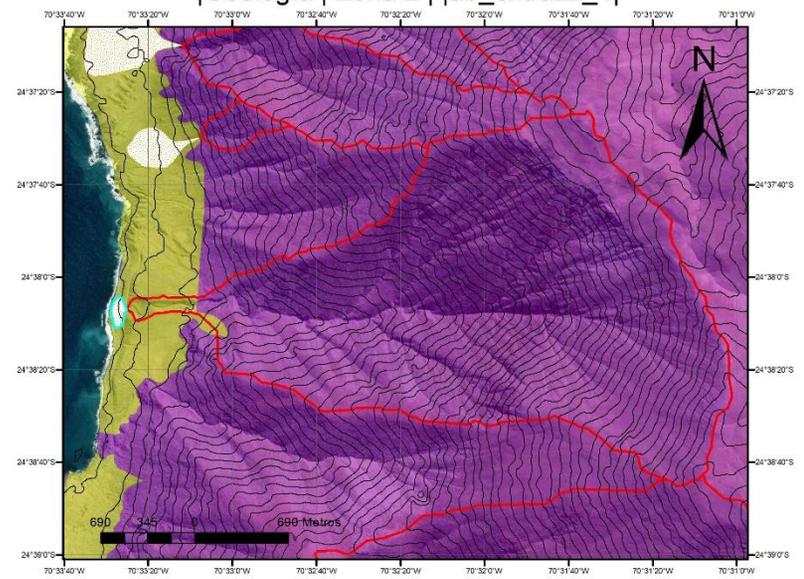
Geología 30k

Código

- Jp
- Qac
- abanicos z2 no selec.
- Curvas\_40m



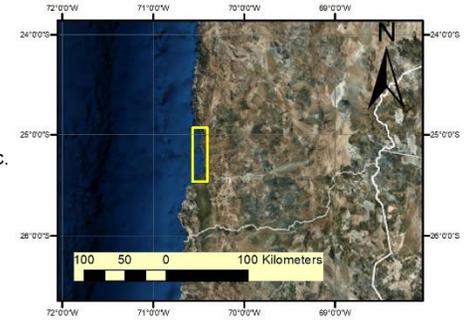
[Geología | Zona 2 | |ab\_extraz2\_4|]



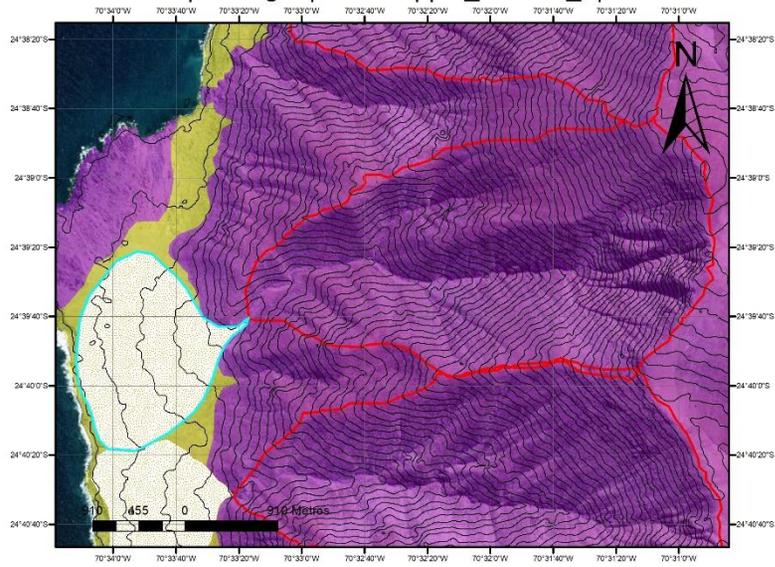
Geología 30k

Código

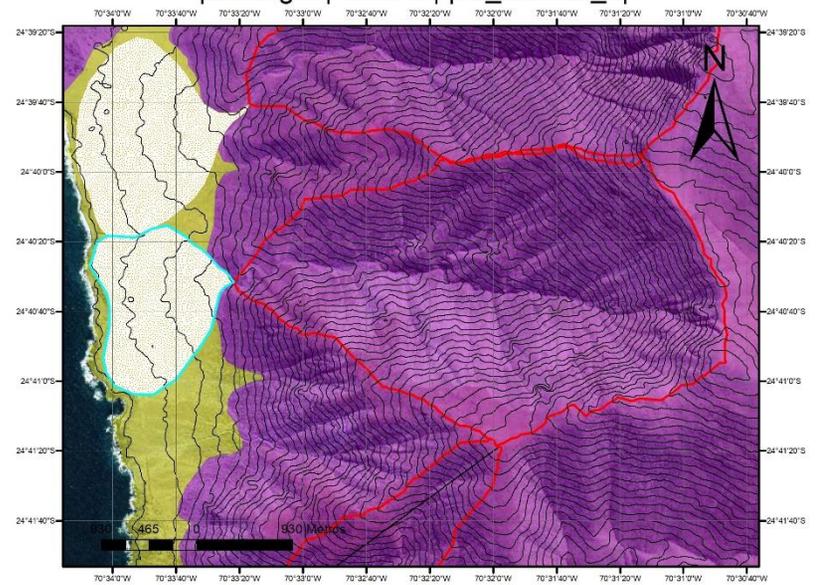
- Jp
- Qac
- abanicos z2 no selec.
- Curvas\_40m



|Geología | Zona 2 | |ab\_extraz2\_5|



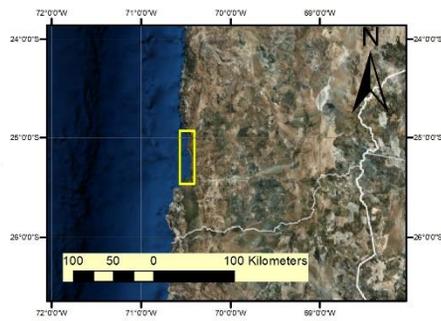
|Geología | Zona 2 | |ab\_extraz2\_6|



Geología 30k

Código

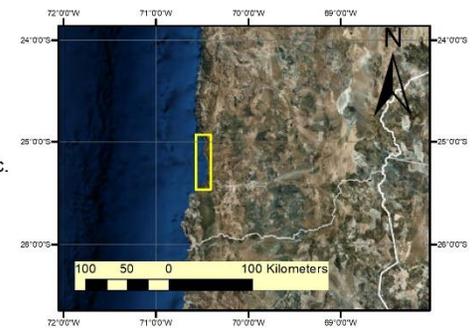
- Jp
- Qac
- abanicos z2 no selec.
- Curvas\_40m



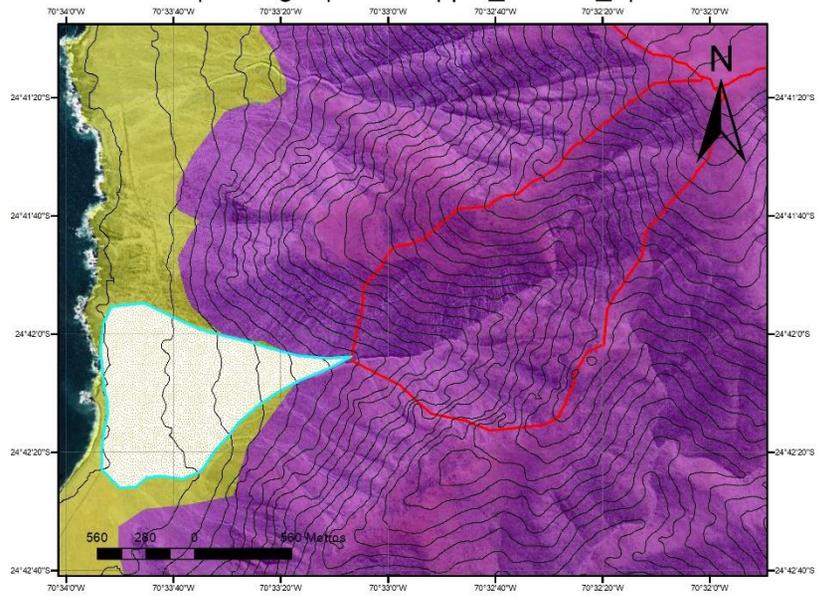
Geología 30k

Código

- Jp
- Qac
- abanicos z2 no selec.
- Curvas\_40m



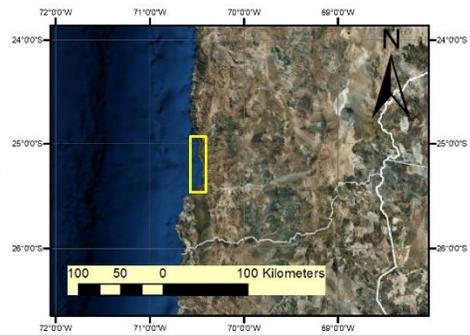
|Geología | Zona 2 | |lab\_extraz2\_7|



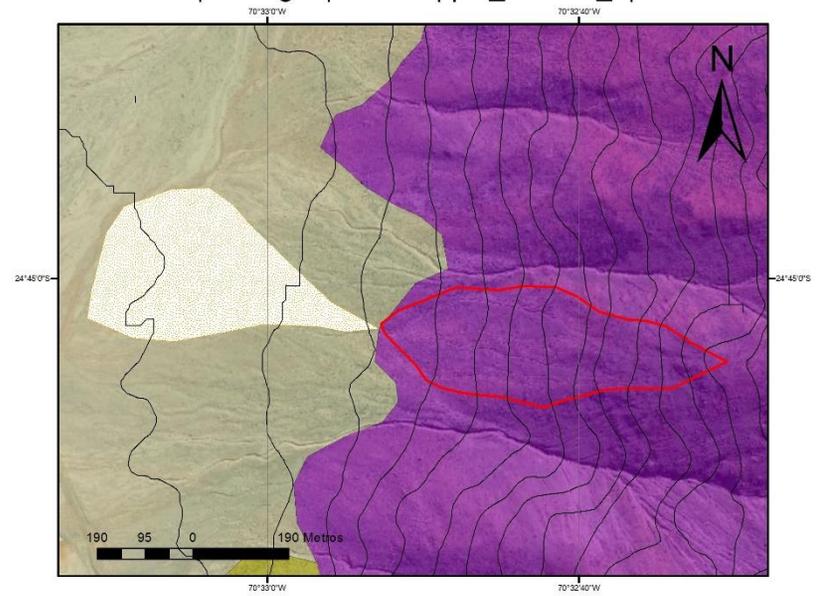
Geología 30k

Código

- Jp
- Qac
- abanicos z2 no selec.
- Curvas\_40m



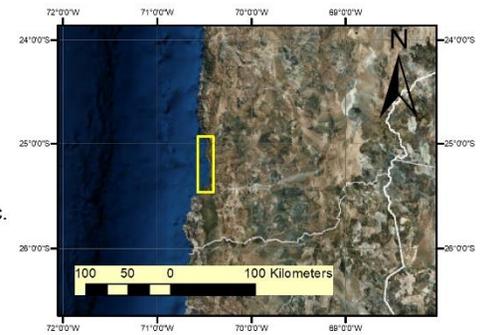
|Geología | Zona 2 | |lab\_extraz2\_8|



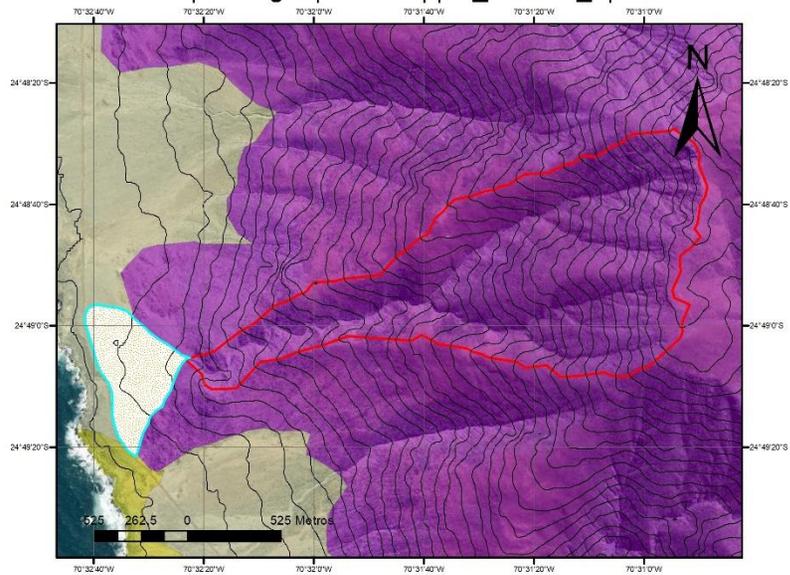
Geología 30k

Código

- Jp
- PIHcc
- Qac
- abanicos z2 no selec.
- Curvas\_40m



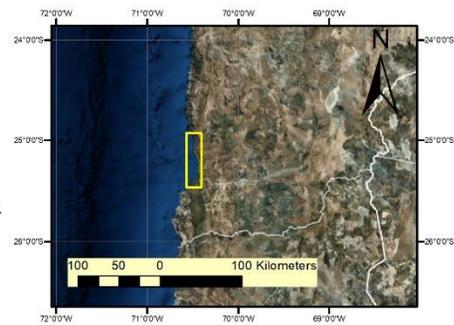
|Geología | Zona 2 | |ab\_extraz2\_9|



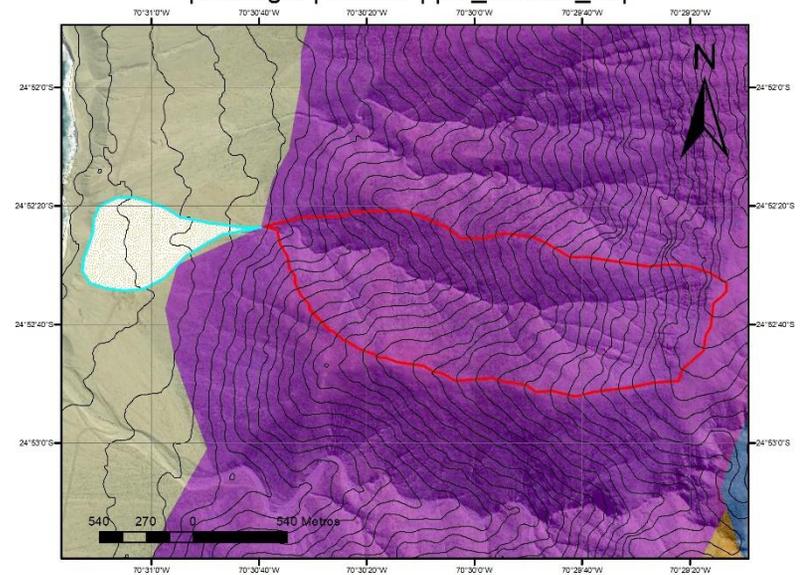
Geología 30k

Código

- Jp
- PIHcc
- Qac
- abanicos z2 no selec.
- Curvas\_40m



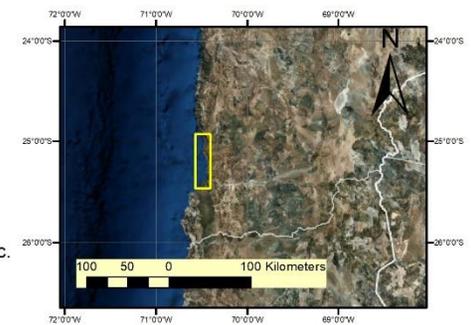
|Geología | Zona 2 | |ab\_extraz2\_10|



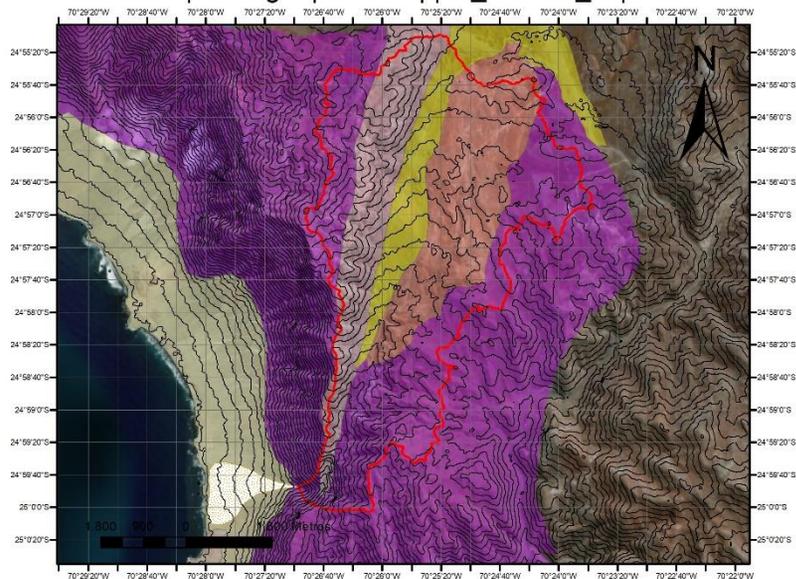
Geología 30k

Código

- Jp
- Jpa
- PIHcc
- Tpm
- abanicos z2 no selec.
- Curvas\_40m



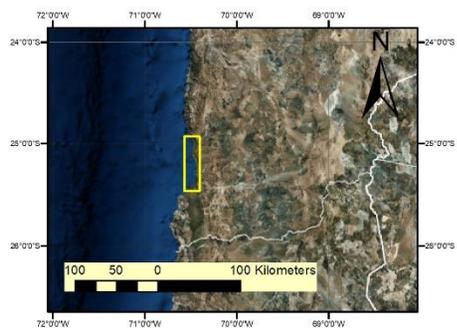
|Geología | Zona 2 | |ab\_extraz2\_11|



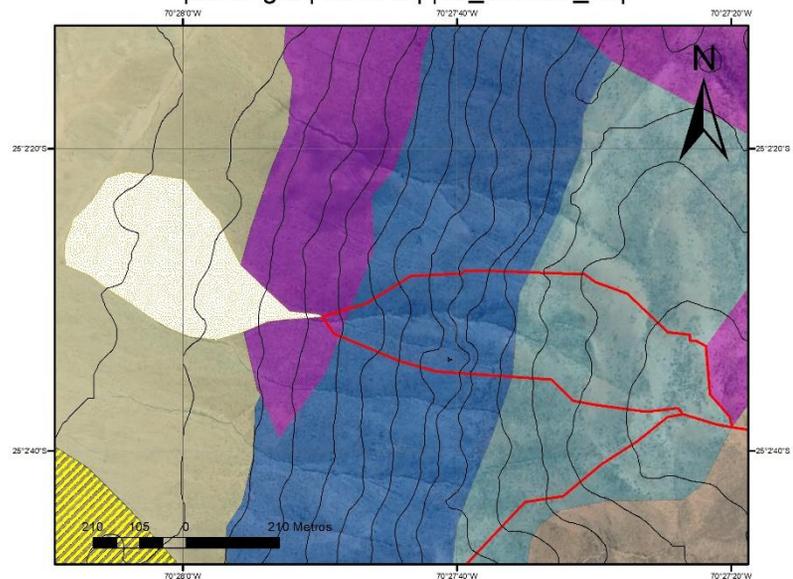
Geología 30k

Código

- Jb
- Jmm(gd)
- Jp
- Jpa
- Kr
- PIHcc
- Pzt
- Qac
- Trc
- abanicos z2 no selec.
- Curvas\_40m



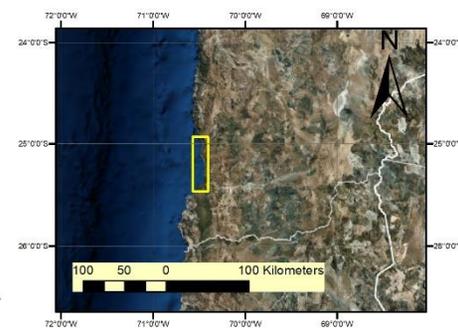
|Geología | Zona 2 | |ab\_extraz2\_12|



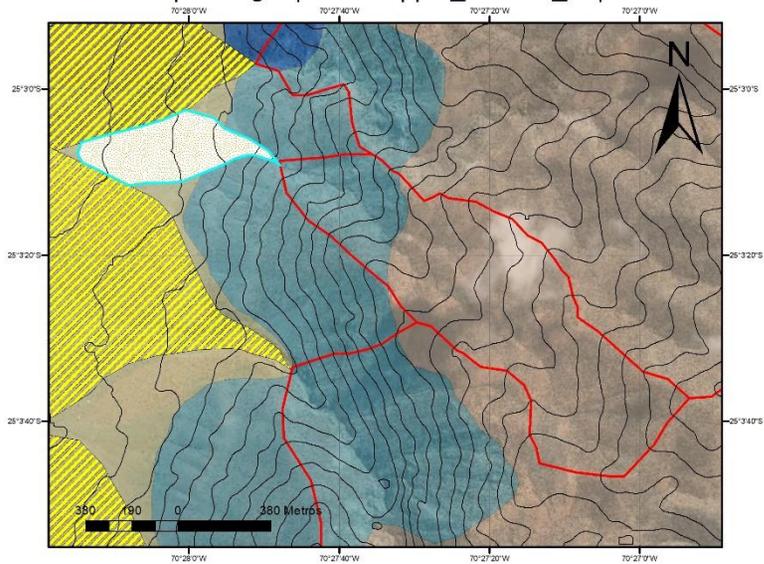
Geología 30k

Código

- Jln
- Jmm(gd)
- Jp
- Jpa
- PIHcc
- abanicos z2 no selec.
- Curvas\_40m



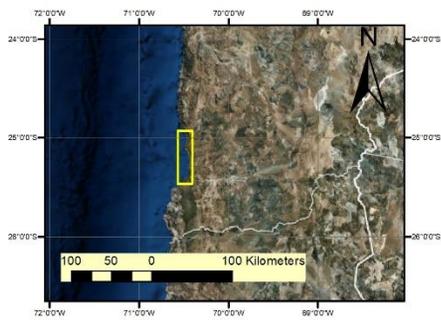
|Geología | Zona 2 | |ab\_extraz2\_13|



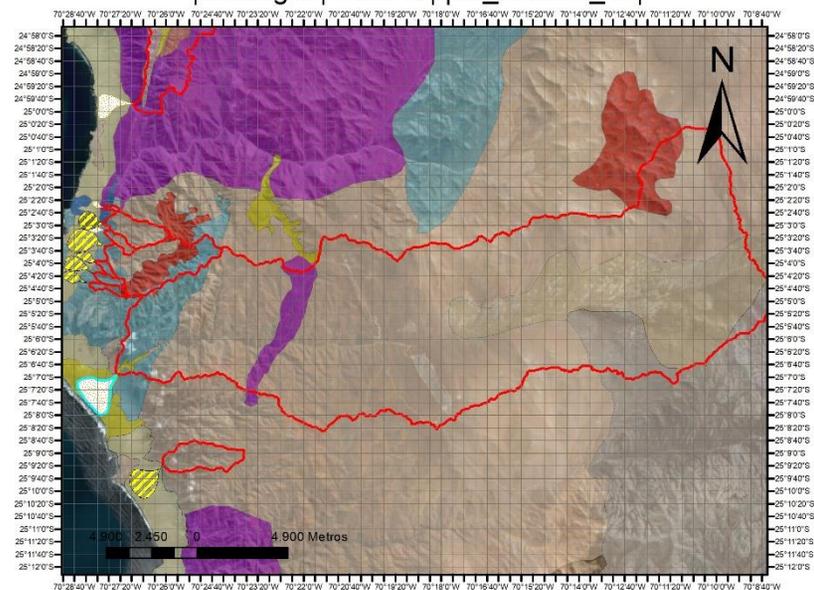
Geología 30k

Código

- Jln
- Jmm(gd)
- Jpa
- PIHcc
- abanicos z2 no selec.
- Curvas\_40m



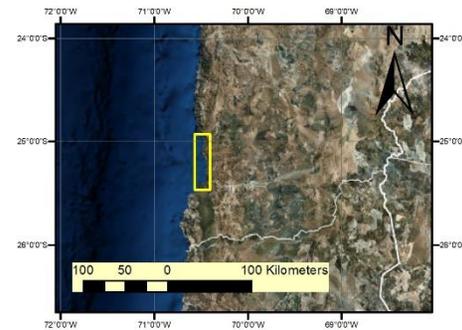
|Geología | Zona 2 | |ab\_extraz2\_14|



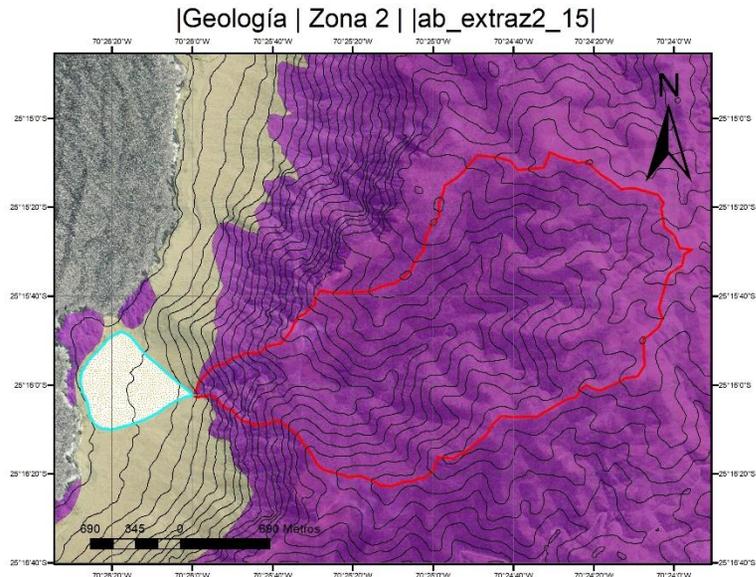
Geología 30k

Código

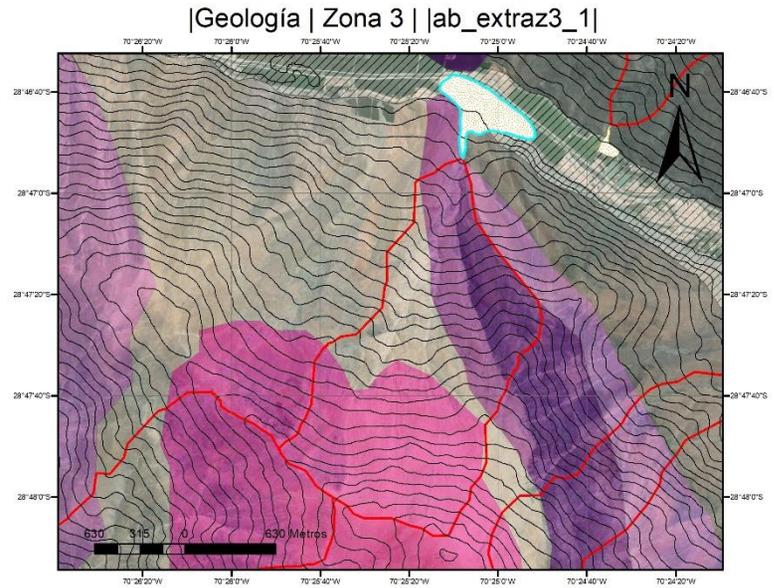
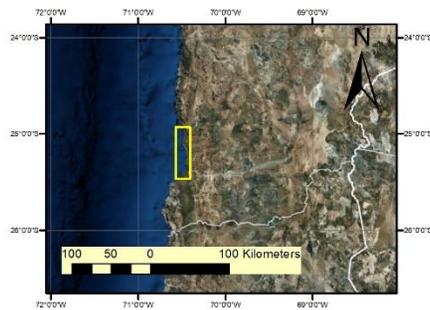
- DCch(a)
- Jb
- Jln
- Jmm(d)
- Jmm(gd)
- Jp
- Jpa
- Kilt
- Kr
- Mga
- PIHcc
- Qac
- abanicos z2 no selec.



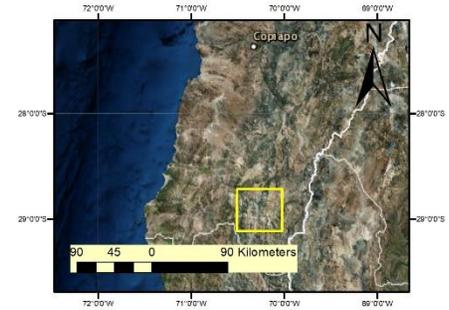
## Anexo A-8: Mapeo geológico de abanicos aluviales no seleccionados de la zona 3



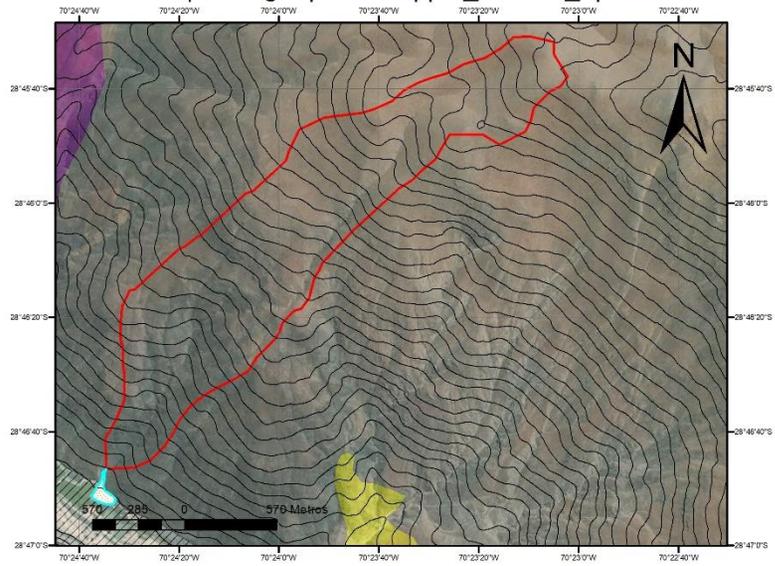
**Geología 30k**  
**Código**  
 Jmm(d)  
 PIHcc  
 abanicos z2 no selec.  
 Curvas\_40m



**Geología 30k**  
**Código**  
 Cct  
 PTRbp  
 PTRgc  
 PIHf  
 TrJv  
 Trsf  
 abanicos z3 no selec.  
 Curvas 40m



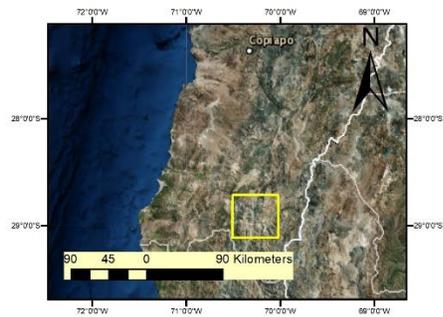
|Geología | Zona 3 | |ab\_extraz3\_2|



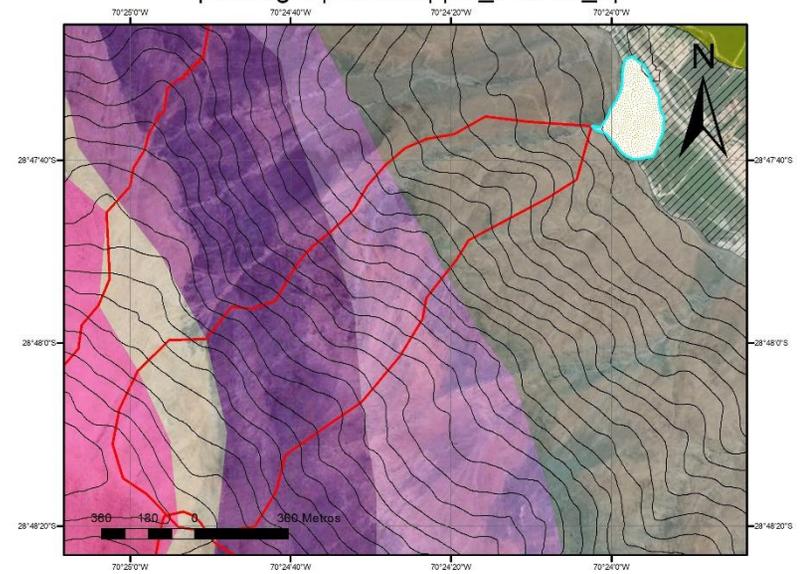
Geología 30k

Código

-  Cct
-  PIHf
-  Qac
-  TrJv
-  abanicos z3 no selec.
-  Curvas 40m



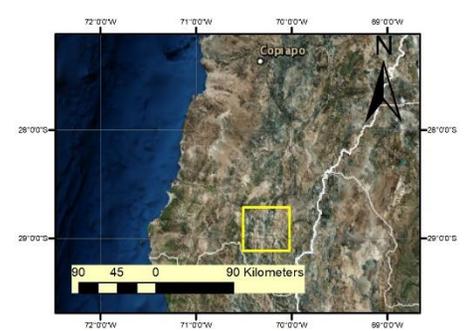
|Geología | Zona 3 | |ab\_extraz3\_3|



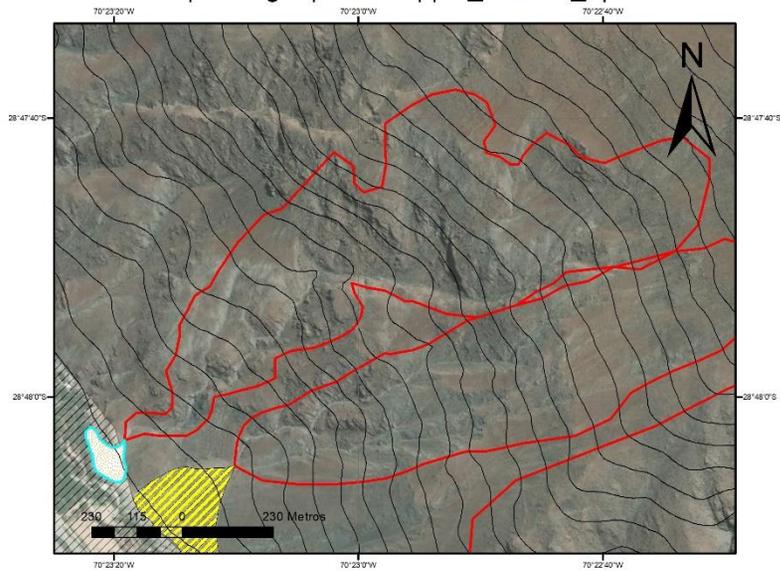
Geología 30k

Código

-  Cct
-  PTrbp
-  PTrgc
-  PIHf
-  Qac
-  TrJv
-  Trsf
-  abanicos z3 no selec.
-  Curvas 40m



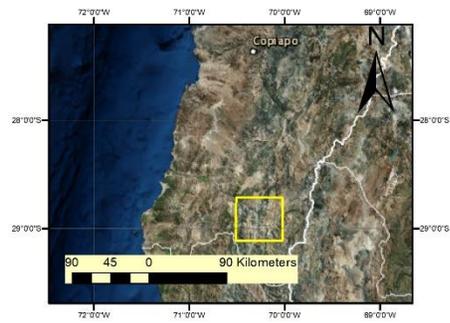
|Geología | Zona 3 | |ab\_extraz3\_4|



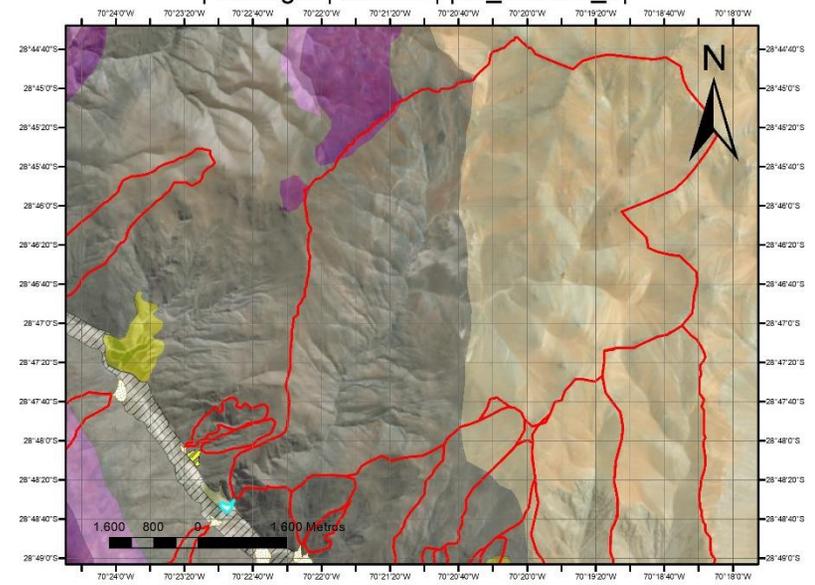
Geología 30k

Código

- Cct
- PIHf
- abanicos z3 no selec.
- Curvas 40m



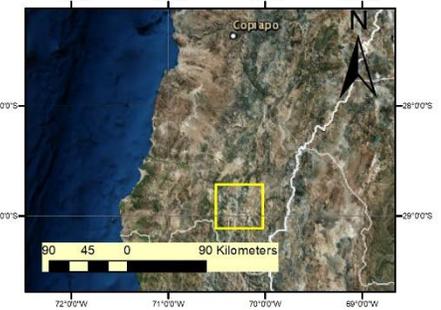
|Geología | Zona 3 | |ab\_extraz3\_5|



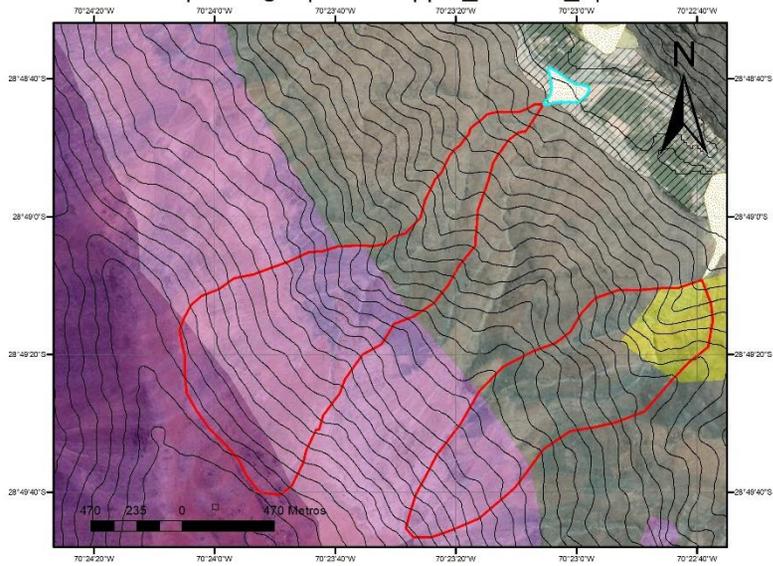
Geología 30k

Código

- Cct
- Palddj
- PIHcc
- PIHf
- Qac
- TrJv
- Trsf
- abanicos z3 no selec.



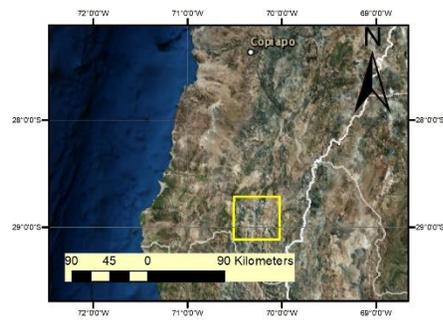
|Geología | Zona 3 | |ab\_extraz3\_6|



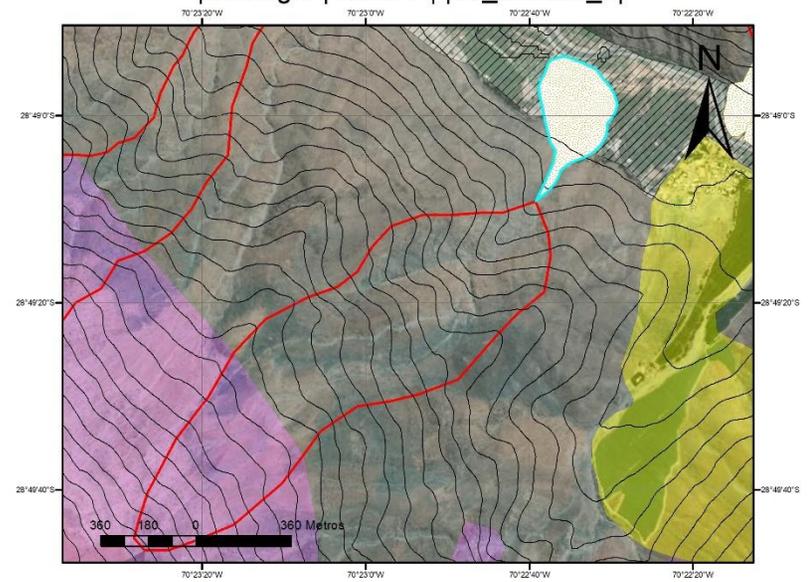
Geología 30k

Código

- Cct
- PIHcc
- PIHf
- Qac
- TrJv
- Trsf
- abanicos z3 no selec.
- Curvas 40m



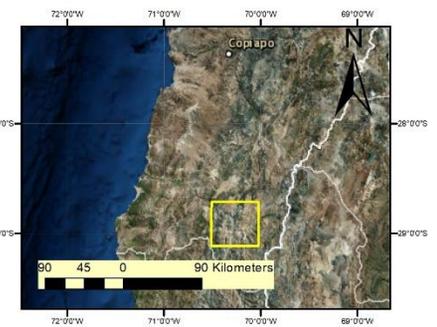
|Geología | Zona 3 | |ab\_extraz3\_7|



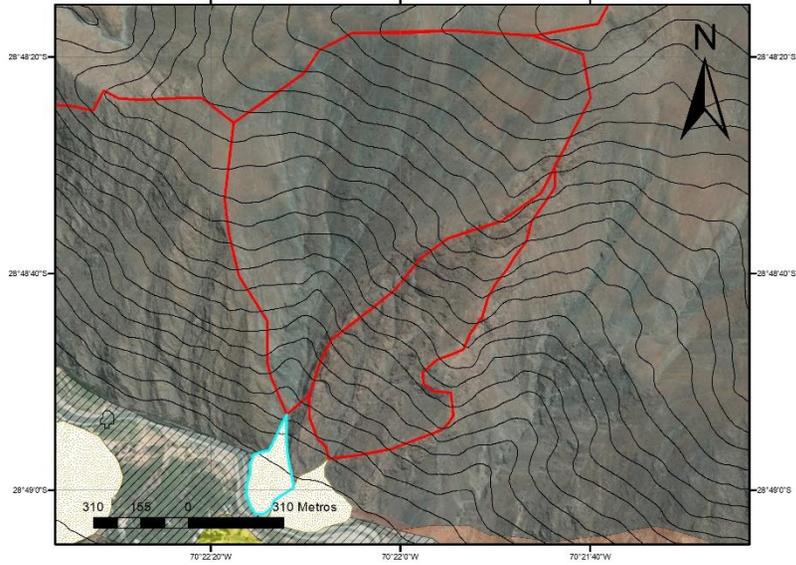
Geología 30k

Código

- Cct
- PIHf
- Qac
- TrJv
- Trsf
- abanicos z3 no selec.
- Curvas 40m



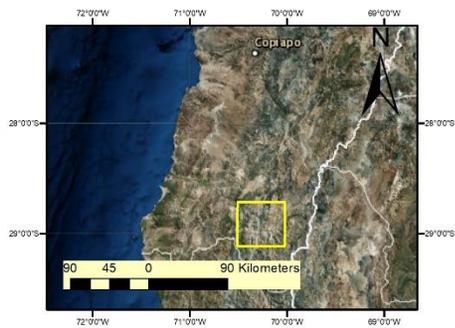
|Geología | Zona 3 | |ab\_extraz3\_8|



Geología 30k

Código

- CPtg
- Cct
- PIHf
- Qac
- abanicos z3 no selec.
- Curvas 40m



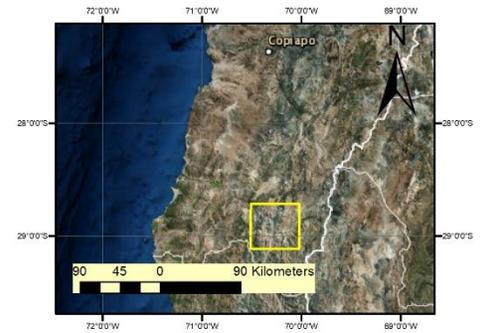
|Geología | Zona 3 | |ab\_extraz3\_9|



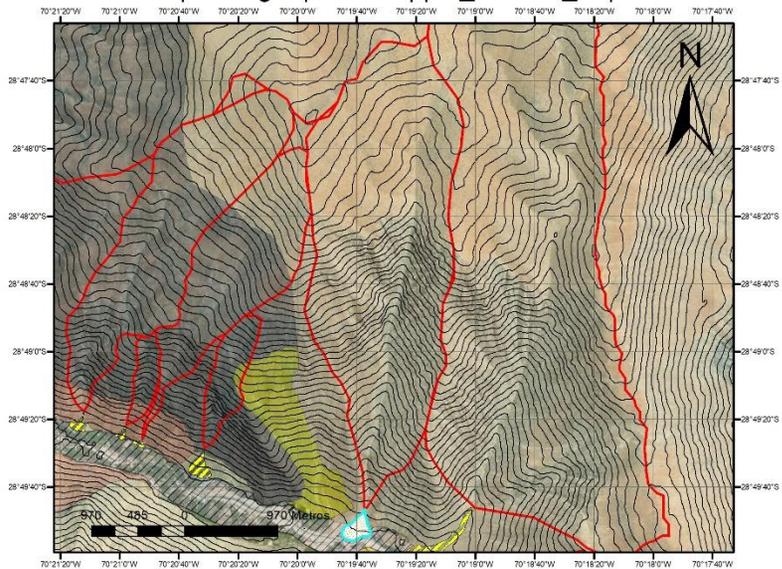
Geología 30k

Código

- CPtg
- Cct
- PIHf
- Qac
- abanicos z3 no selec.
- Curvas 40m



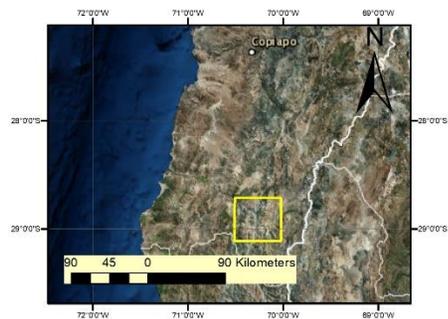
|Geología | Zona 3 | |ab\_extraz3\_10|



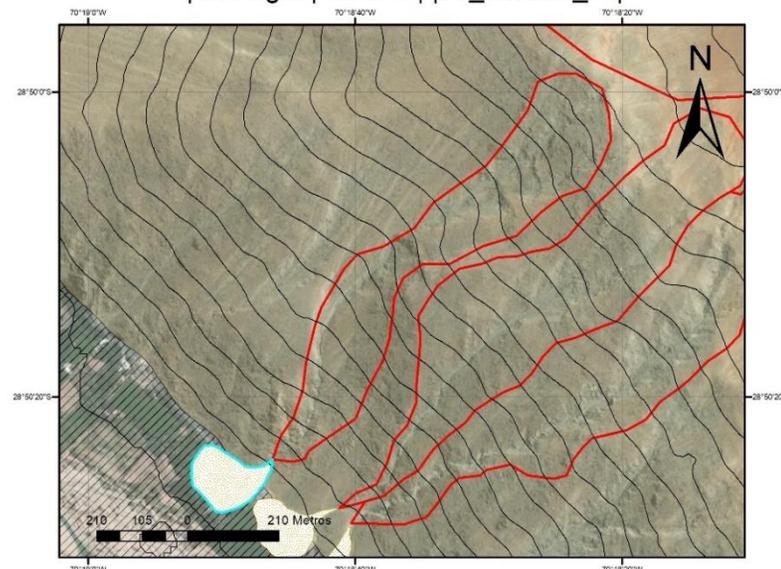
Geología 30k

Código

- CPtg
- Cct
- Egh
- Palddj
- PIHcc
- PIHf
- Qac
- Qal
- abanicos z3 no selec.
- Curvas 40m



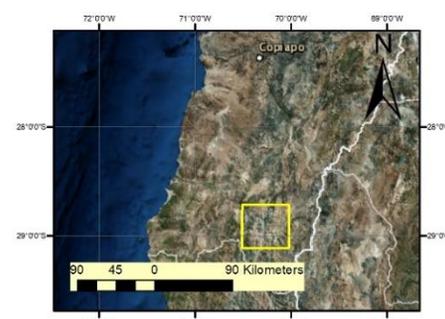
|Geología | Zona 3 | |ab\_extraz3\_11|



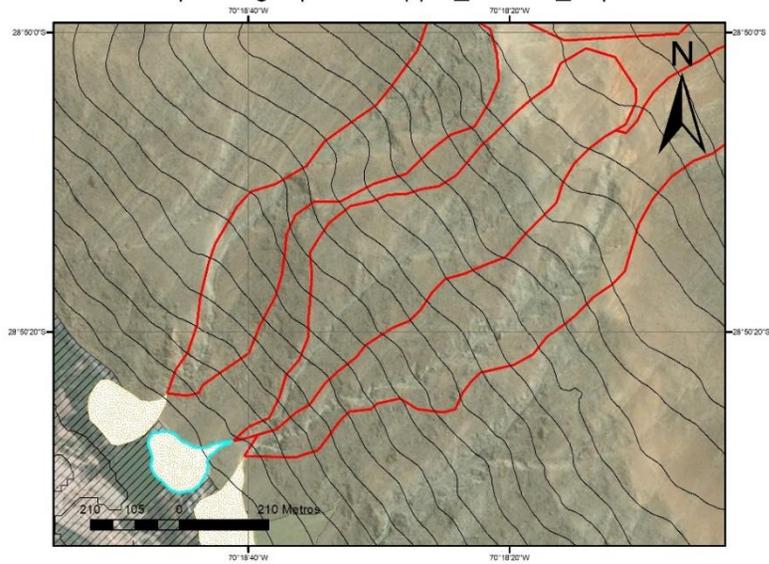
Geología 30k

Código

- Palddj
- PIHf
- abanicos z3 no selec.
- Curvas 40m



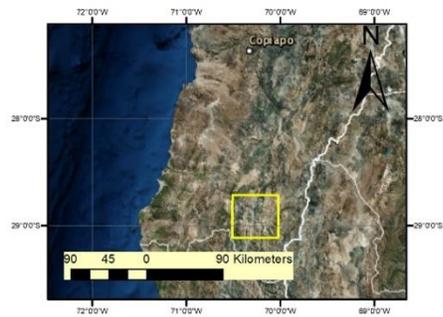
|Geología | Zona 3 | |ab\_extraz3\_12|



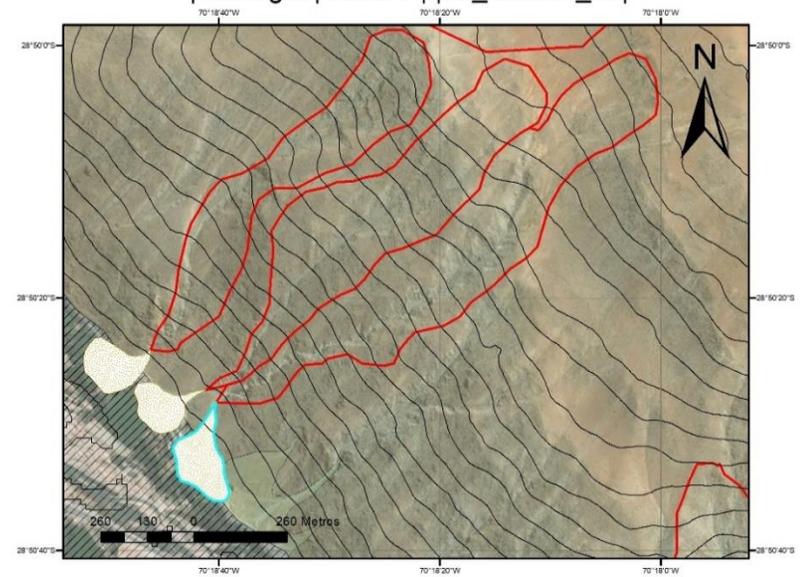
**Geología 30k**

**Código**

- Palddj
- PIHcc
- PIHf
- abanicos z3 no selec.
- Curvas 40m



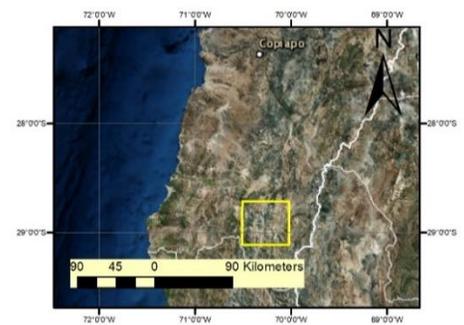
|Geología | Zona 3 | |ab\_extraz3\_13|



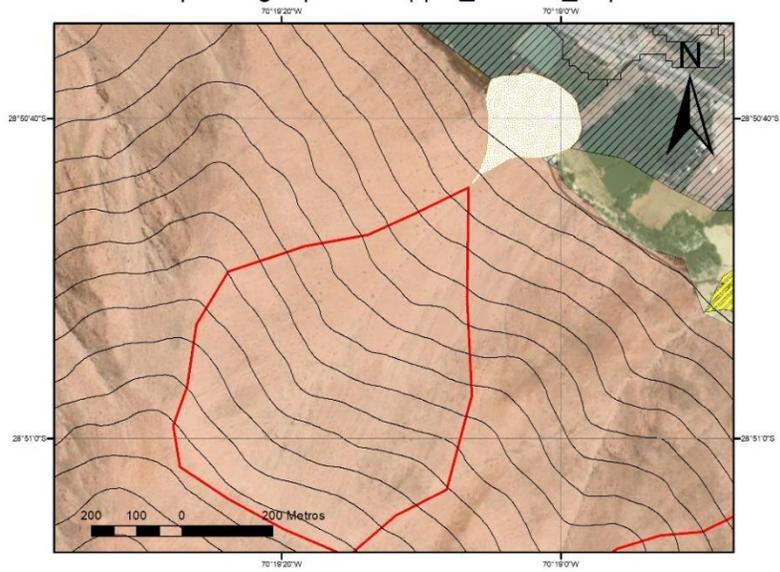
**Geología 30k**

**Código**

- Palddj
- PIHcc
- PIHf
- abanicos z3 no selec.
- Curvas 40m



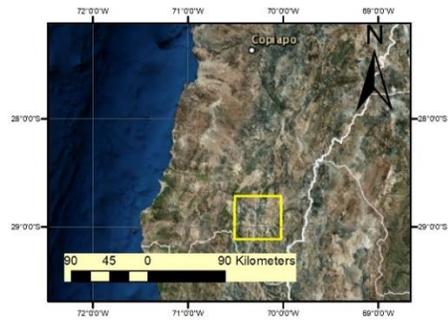
|Geología | Zona 3 | |ab\_extraz3\_14|



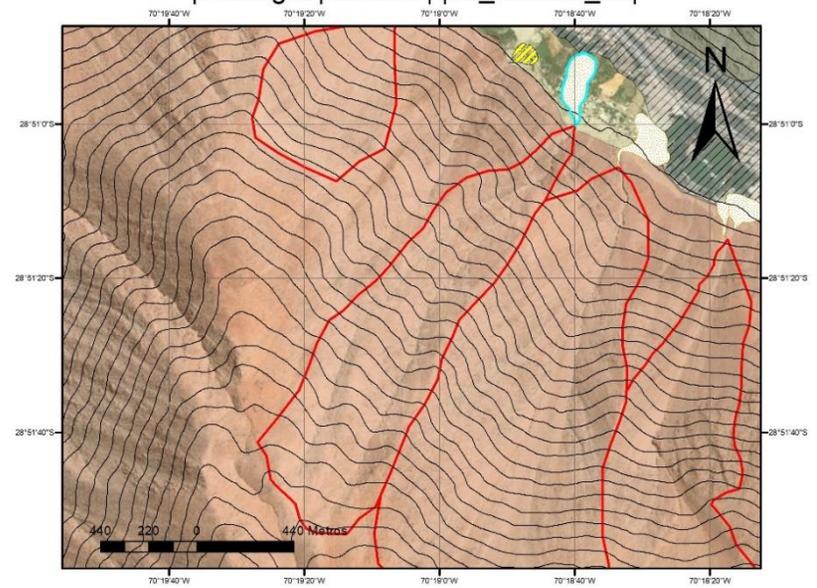
**Geología 30k**

**Código**

- CPtg
- PIHcc
- PIHf
- abanicos z3 no selec.
- Curvas 40m



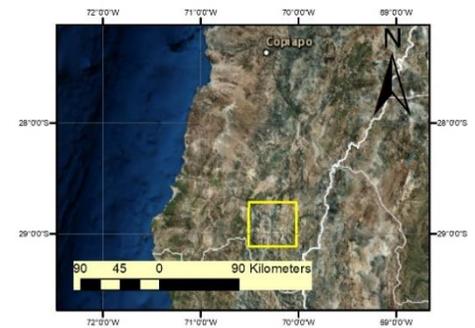
|Geología | Zona 3 | |ab\_extraz3\_15|



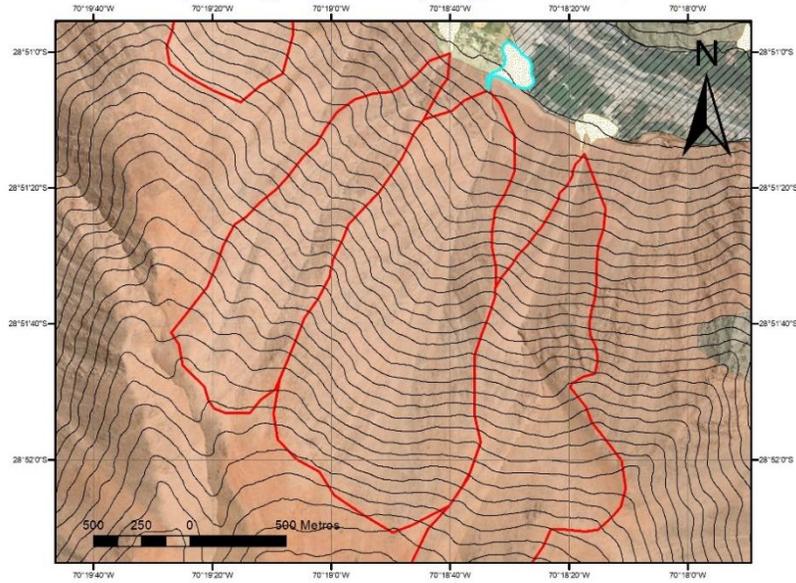
**Geología 30k**

**Código**

- CPtg
- Palddj
- PIHcc
- PIHf
- abanicos z3 no selec.
- Curvas 40m



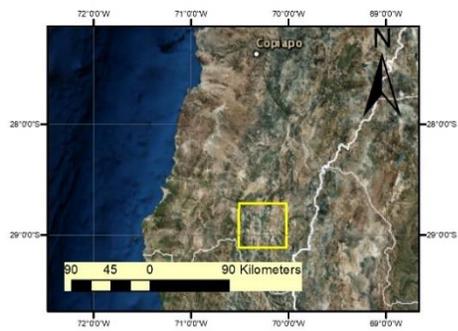
|Geología | Zona 3 | |ab\_extraz3\_16|



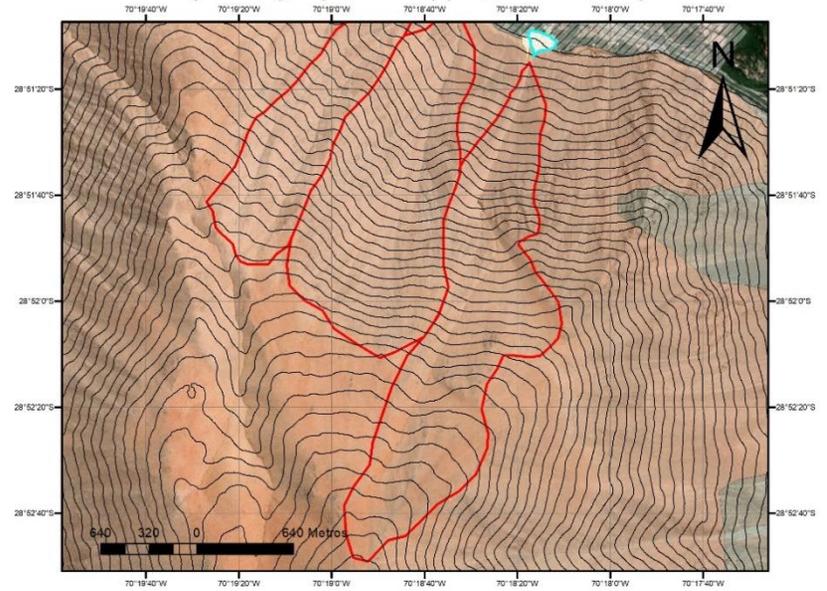
Geología 30k

Código

- CPtg
- Palddj
- PIHcc
- PIHf
- abanicos z3 no selec.
- Curvas 40m



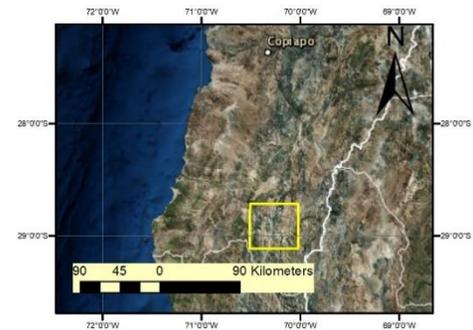
|Geología | Zona 3 | |ab\_extraz3\_18|



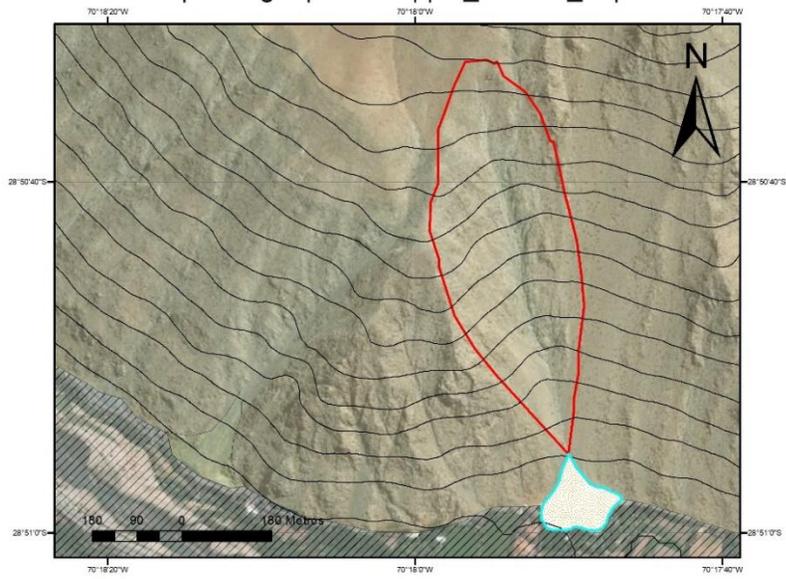
Geología 30k

Código

- CPtg
- PIHf
- abanicos z3 no selec.
- Curvas 40m



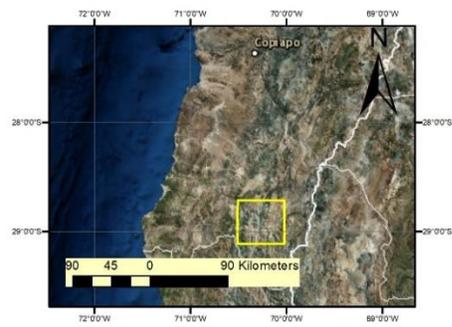
|Geología | Zona 3 | |ab\_extraz3\_19|



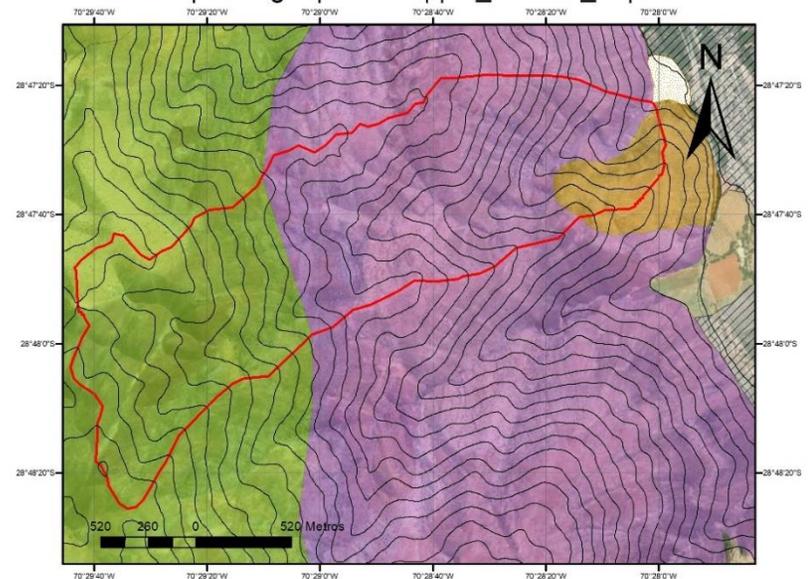
**Geología 30k**

**Código**

- Palddj
- PIHcc
- PIHf
- abanicos z3 no selec.
- Curvas 40m



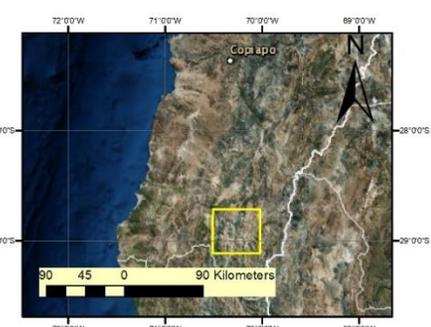
|Geología | Zona 3 | |ab\_extraz3\_20|



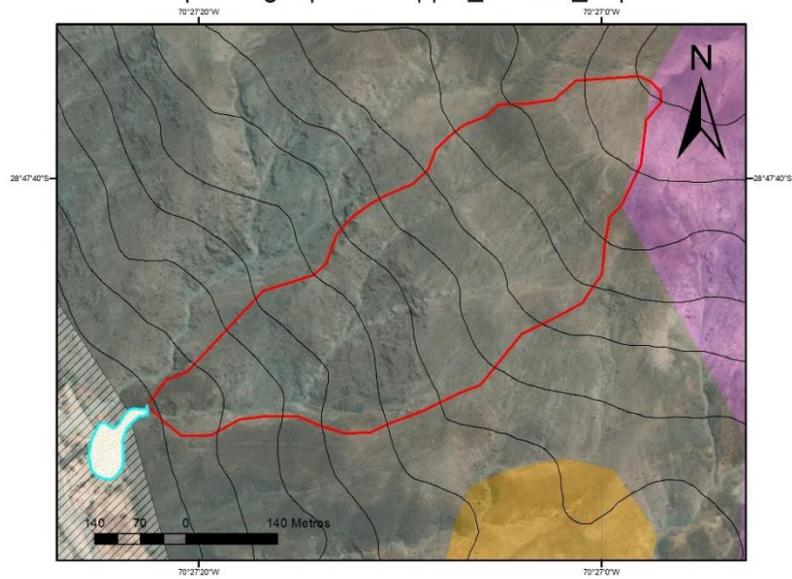
**Geología 30k**

**Código**

- EgIm
- Kc
- Paldd
- PIHcc
- PIHf
- Trsf
- abanicos z3 no selec.
- Curvas 40m



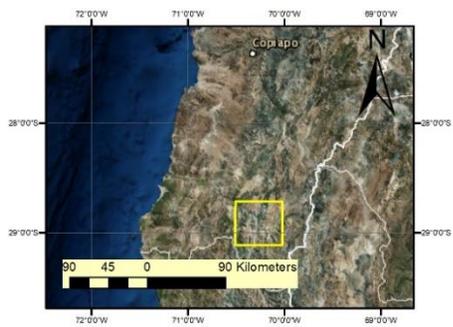
|Geología | Zona 3 | |ab\_extraz3\_21|



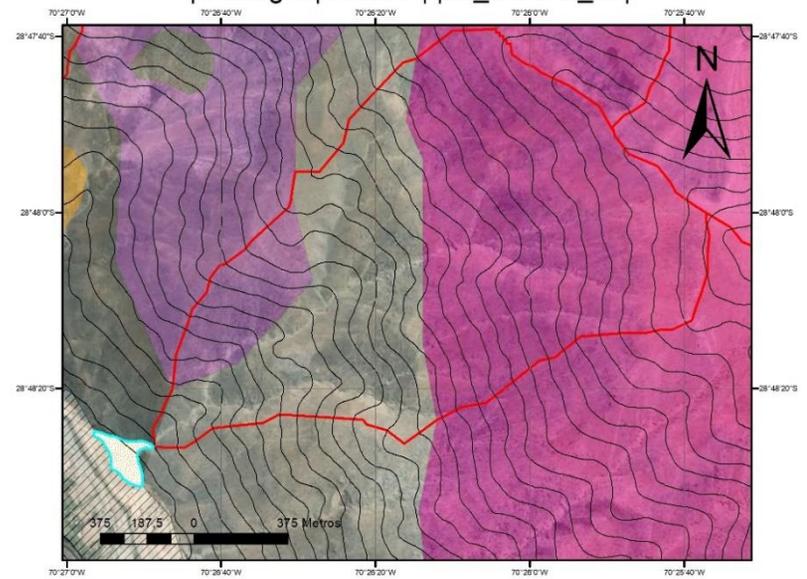
**Geología 30k**

**Código**

- Cct
- Paldd
- PIHf
- Trsf
- abanicos z3 no selec.
- Curvas 40m



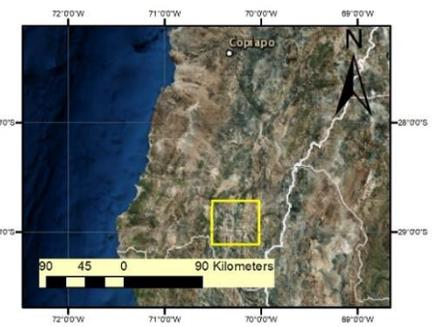
|Geología | Zona 3 | |ab\_extraz3\_22|



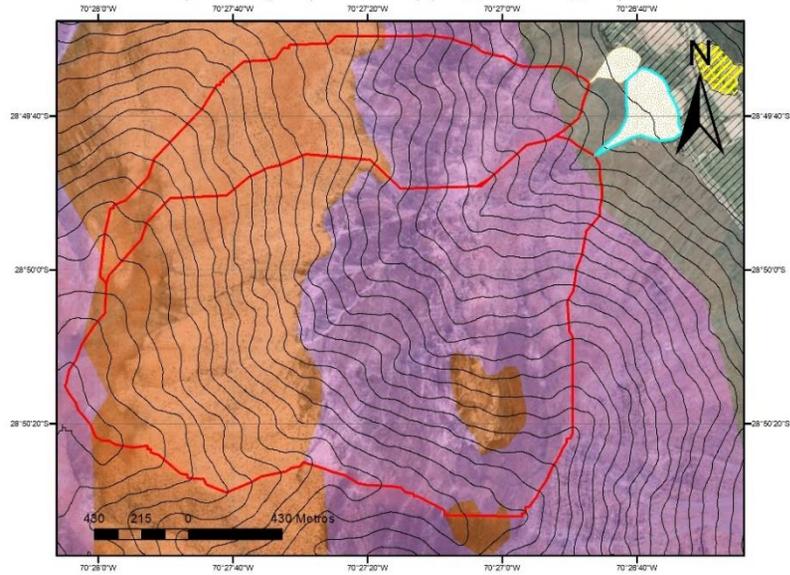
**Geología 30k**

**Código**

- Cct
- PTRbp
- PTRgc
- Paldd
- PIHf
- Trsf
- abanicos z3 no selec.
- Curvas 40m



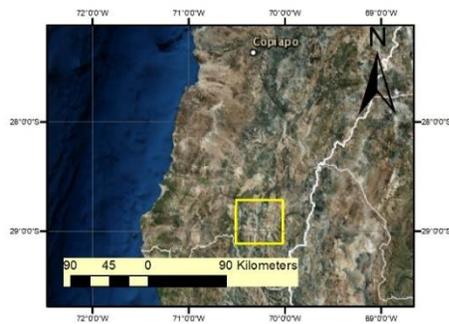
[Geología | Zona 3 | |ab\_extraz3\_24|



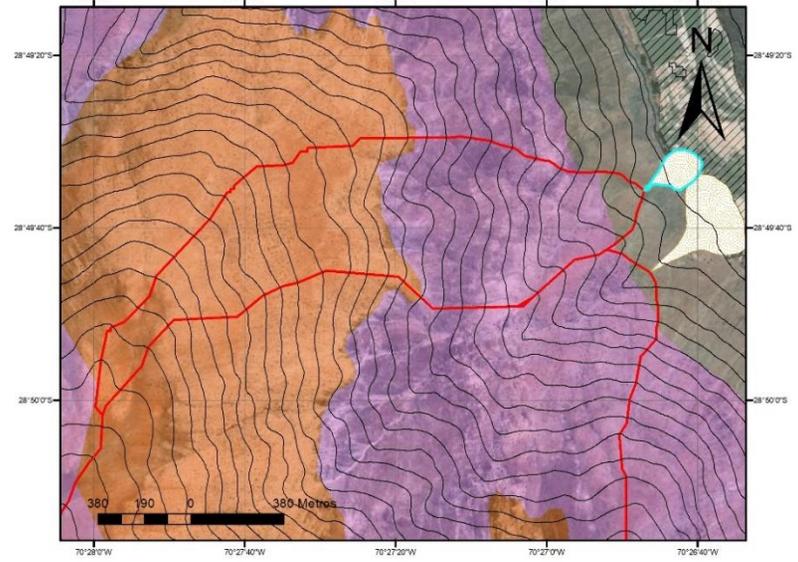
**Geología 30k**

**Código**

- Cct
- Eglm
- PTrbp
- PIHf
- Trsf
- abanicos z3 no selec.
- Curvas 40m



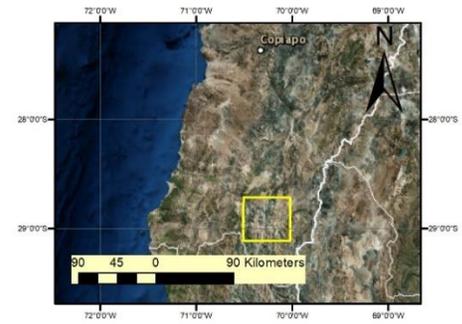
[Geología | Zona 3 | |ab\_extraz3\_23|



**Geología 30k**

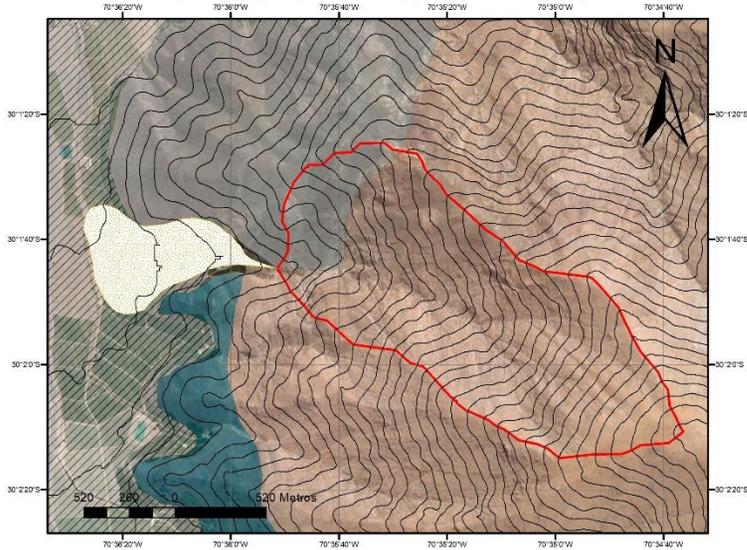
**Código**

- Cct
- Eglm
- PTrbp
- PIHf
- Trsf
- abanicos z3 no selec.
- Curvas 40m

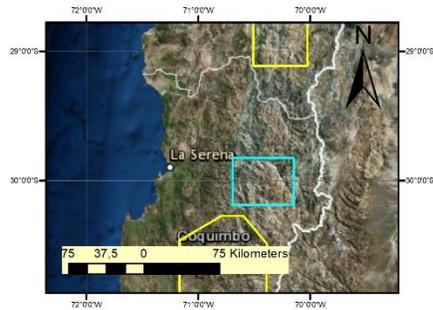


# Anexo A-9: Mapeo geológico de abanicos no seleccionados de la zona 4

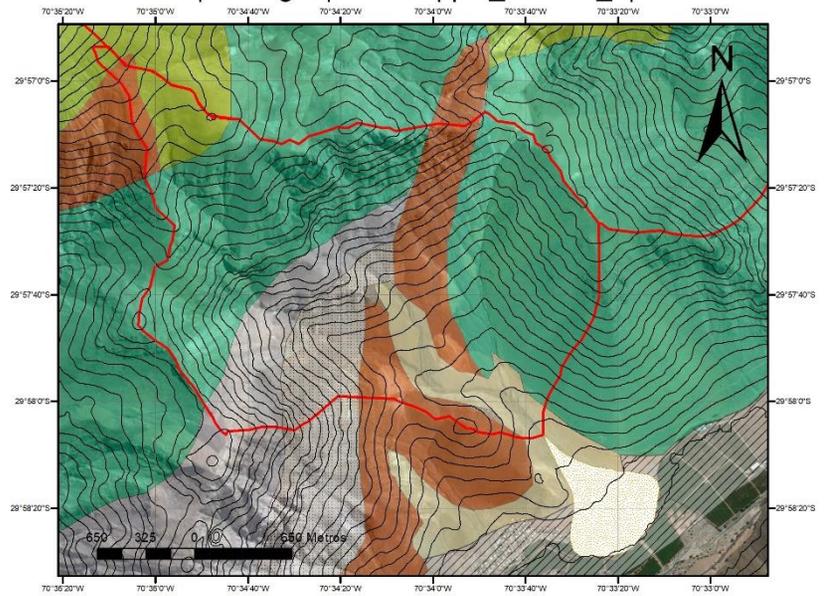
[Geología | Zona 4 | |ab\_extraz4\_1|]



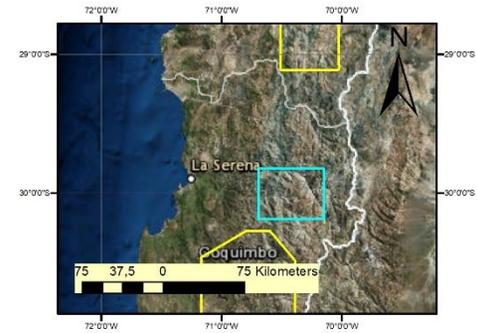
- Geología 30k**
- Código**
- Ja
  - PTr
  - PTrm
  - PIHf
  - abanicos z4 no selec.
  - Curvas 40m



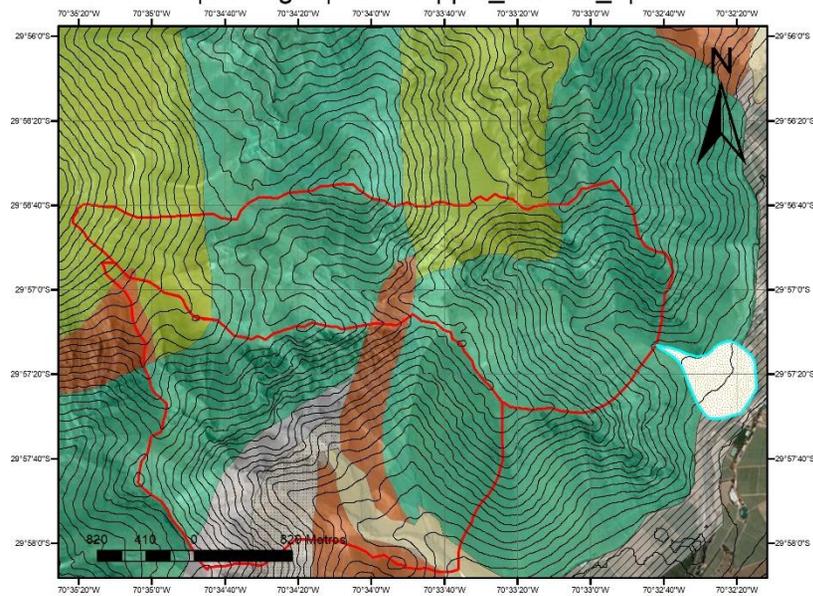
[Geología | Zona 4 | |ab\_extraz4\_2|]



- Geología 30k**
- Código**
- JKa
  - Kp
  - Ksgd
  - Kv(b)
  - PIHf
  - Qal
  - Trlb
  - abanicos z4 no selec.
  - Curvas 40m



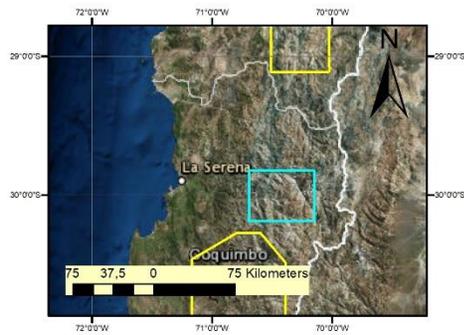
Geología | Zona 4 | |lab\_extraz4\_3|



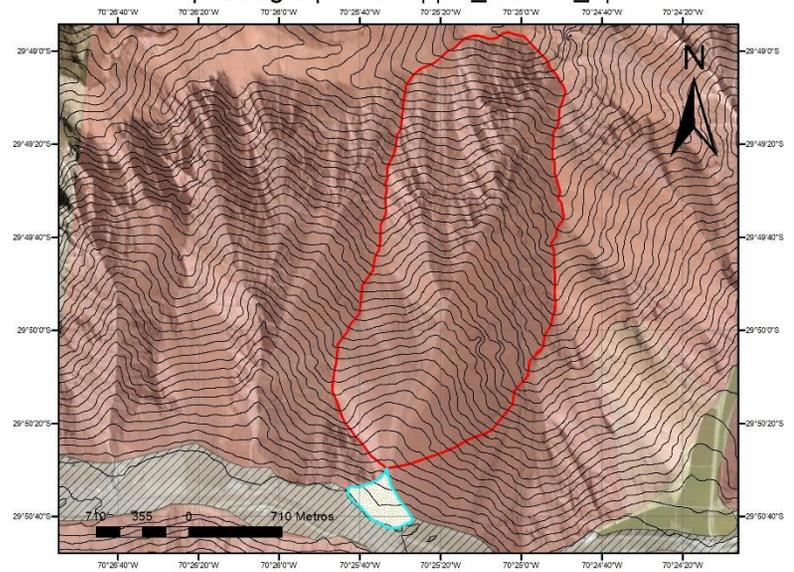
Geología 30k

Código

- JKa
- Kp
- Ksgd
- Kv(b)
- PIHf
- Qal
- Trlb
- abanicos z4 no selec.
- Curvas 40m



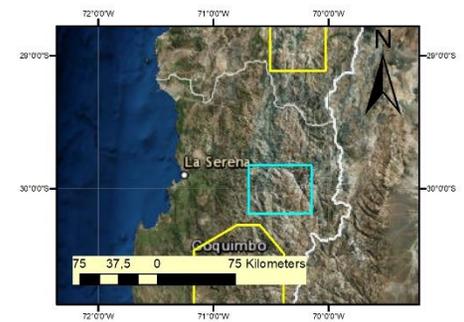
Geología | Zona 4 | |lab\_extraz4\_4|



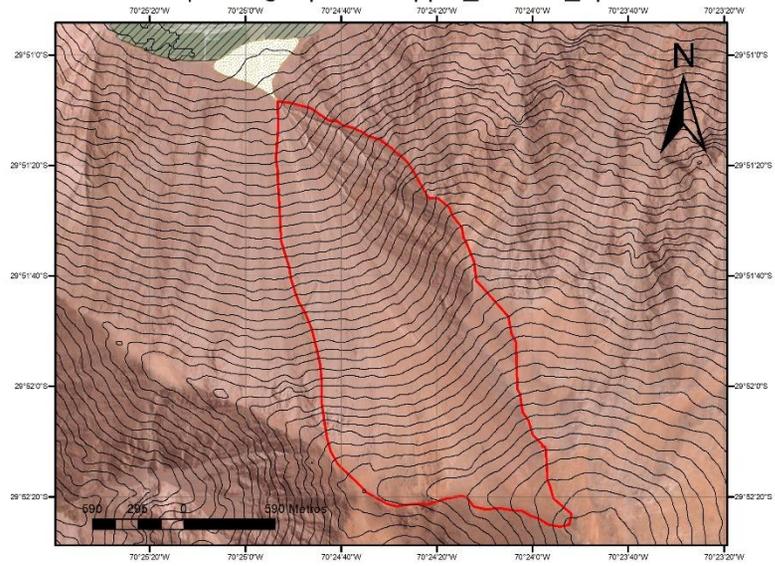
Geología 30k

Código

- Cg
- PTr
- PIHcc
- PIHf
- abanicos z4 no selec.
- Curvas 40m



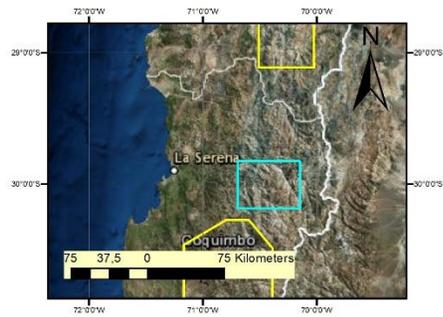
|Geología | Zona 4 | |ab\_extraz4\_5|



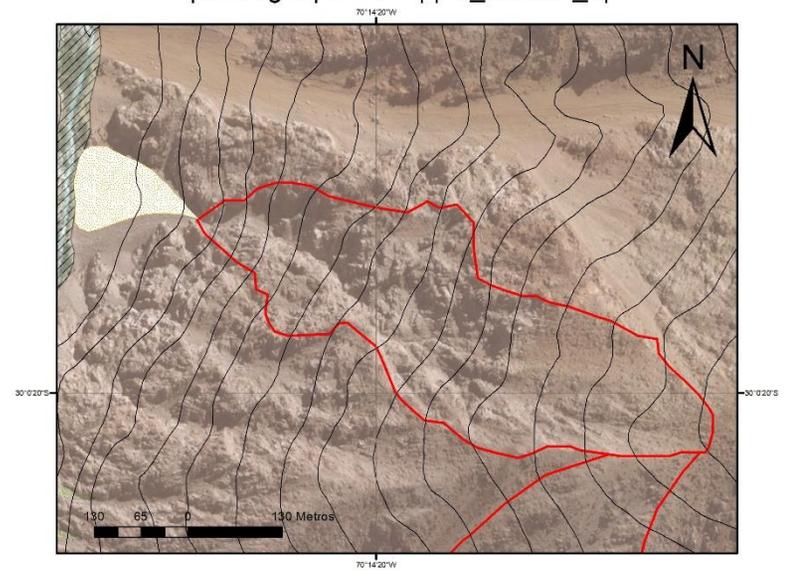
**Geología 30k**

**Código**

- Cg
- PIHf
- abanicos z4 no selec.
- Curvas 40m



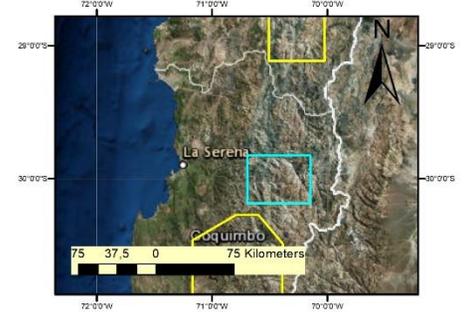
|Geología | Zona 4 | |ab\_extraz4\_6|



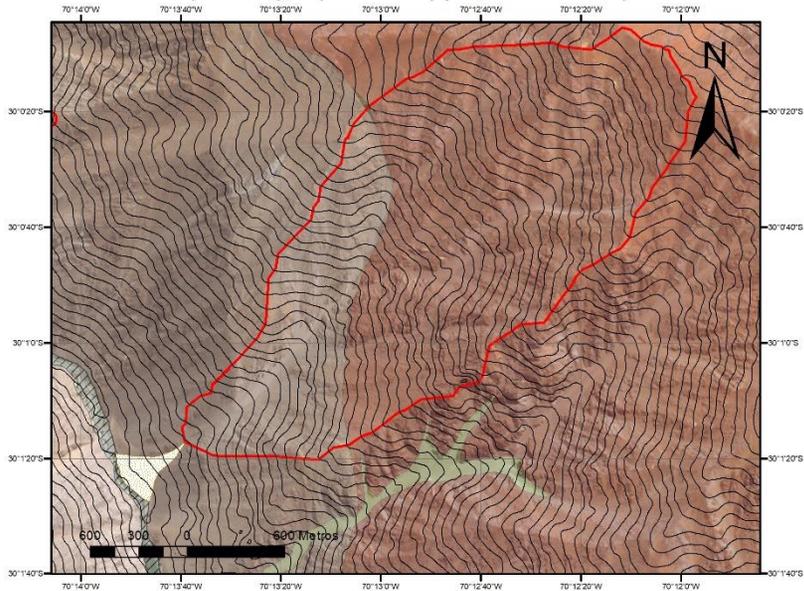
**Geología 30k**

**Código**

- Cc
- PIHcc
- PIHf
- abanicos z4 no selec.
- Curvas 40m



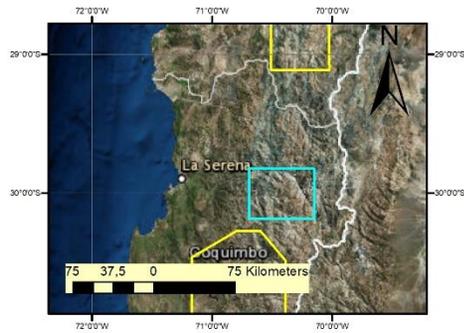
|Geología | Zona 4 | |lab\_extraz4\_7|



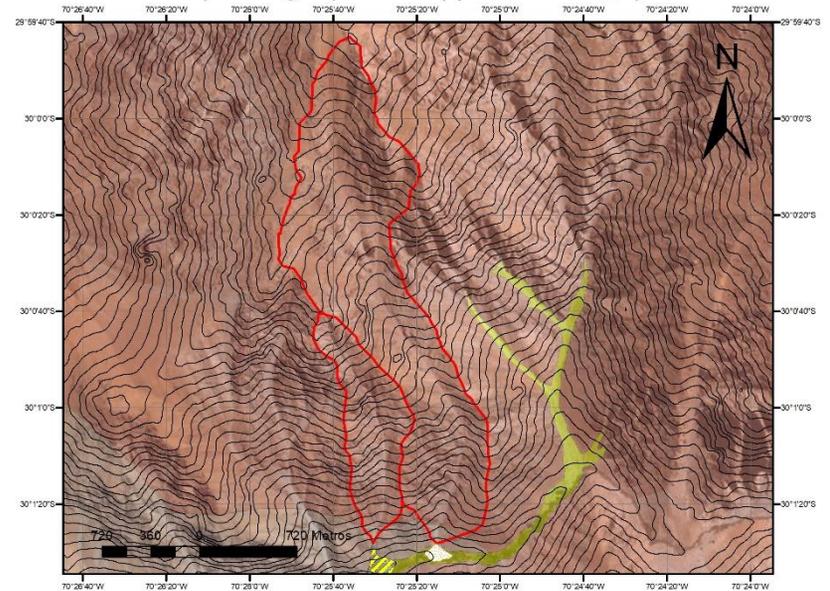
Geología 30k

Código

- Cc
- Cg
- PIHcc
- PIHf
- abanicos z4 no selec.
- Curvas 40m



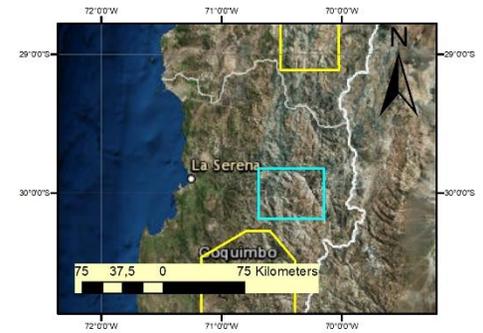
|Geología | Zona 4 | |lab\_extraz4\_8|



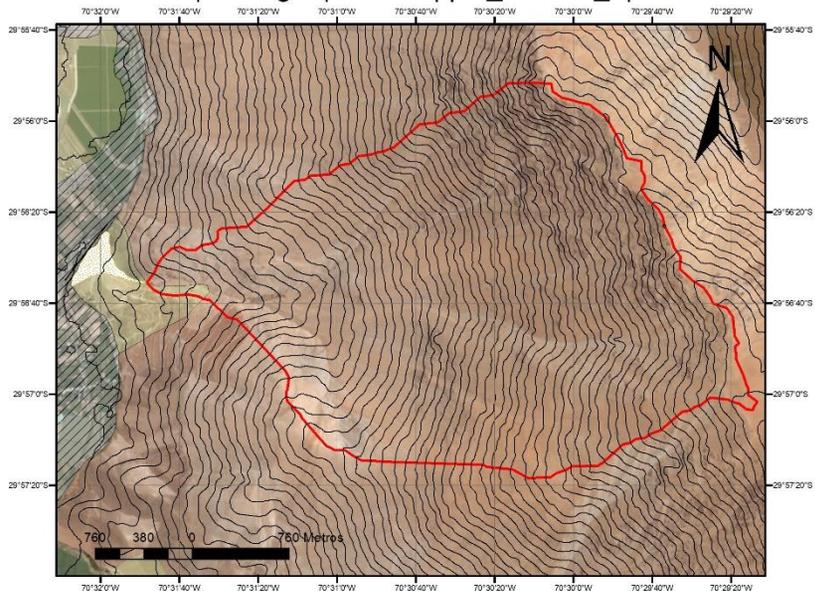
Geología 30k

Código

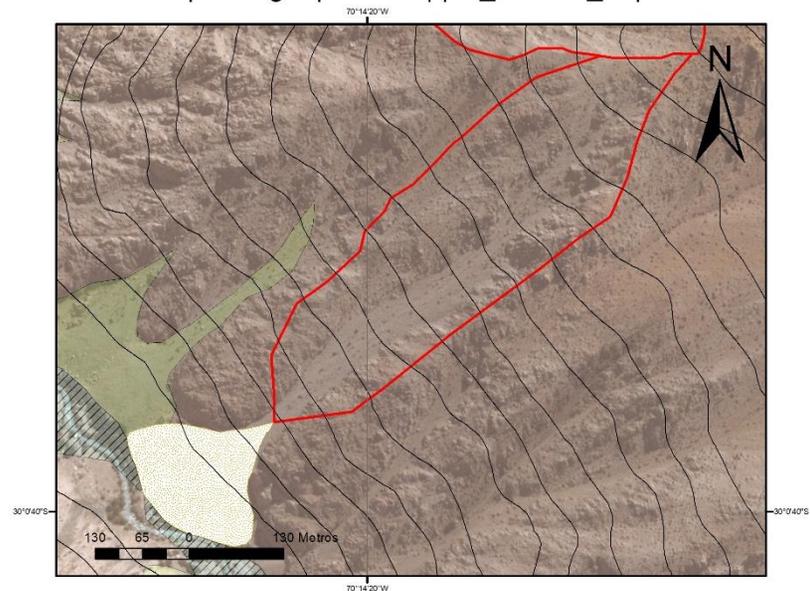
- Cc
- Cg
- Qac
- abanicos z4 no selec.
- Curvas 40m



|Geología | Zona 4 | |ab\_extraz4\_9|



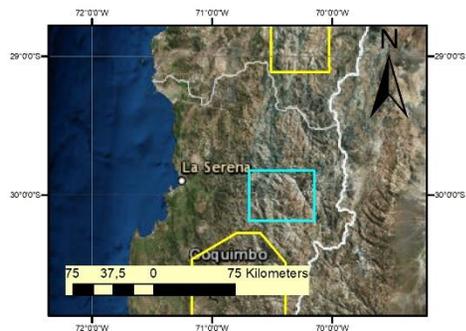
|Geología | Zona 4 | |ab\_extraz4\_10|



**Geología 30k**

**Código**

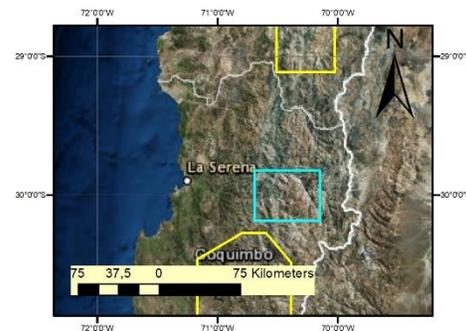
- Cch
- PIHcc
- PIHf
- Qal
- abanicos z4 no selec.
- Curvas 40m



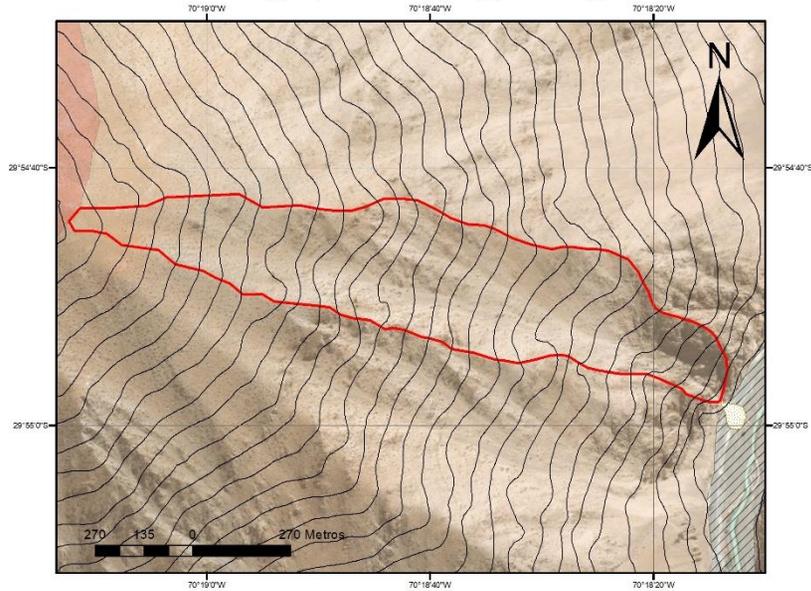
**Geología 30k**

**Código**

- Cc
- PIHcc
- PIHf
- abanicos z4 no selec.
- Curvas 40m



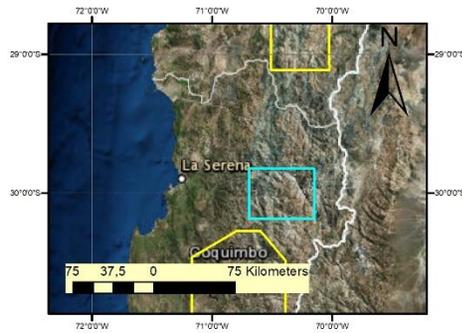
|Geología | Zona 4 | |ab\_extraz4\_11|



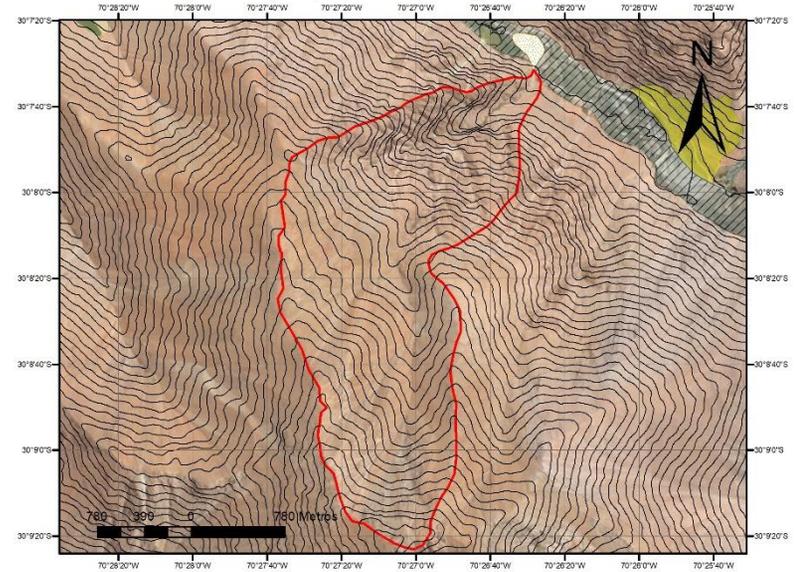
Geología 30k

Código

- Cg
- PTrc
- PIHf
- abanicos z4 no selec.
- Curvas 40m



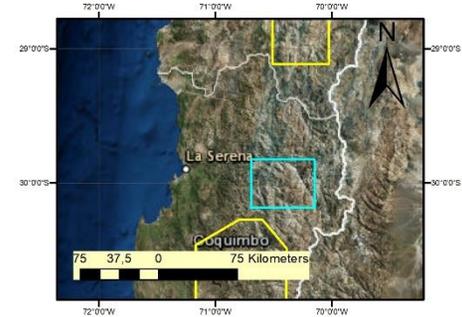
|Geología | Zona 4 | |ab\_extraz4\_12|



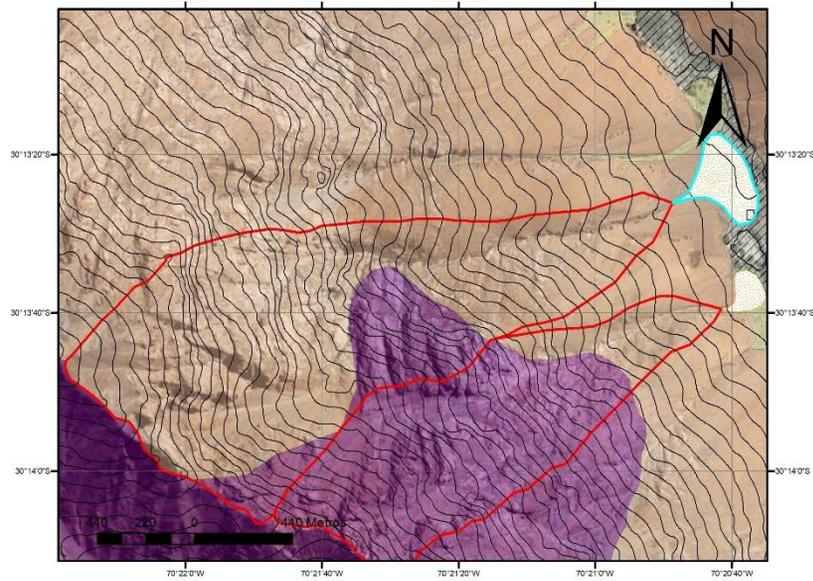
Geología 30k

Código

- Cc
- PTr
- PIHcc
- PIHf
- Qac
- abanicos z4 no selec.
- Curvas 40m



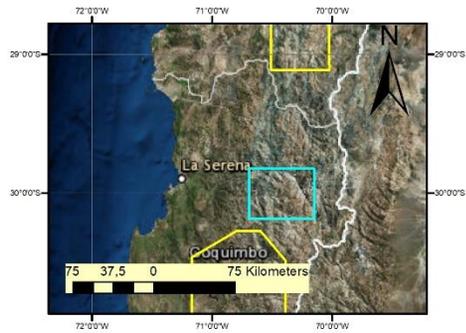
|Geología | Zona 4 | |ab\_extraz4\_13|



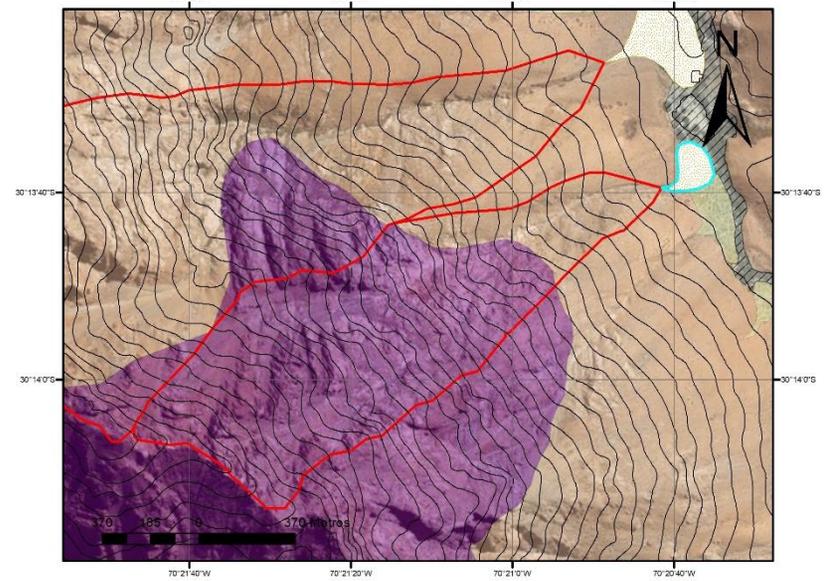
Geología 30k

Código

- PTr
- PIHcc
- PIHf
- Tp
- abanicos z4 no selec.
- Curvas 40m



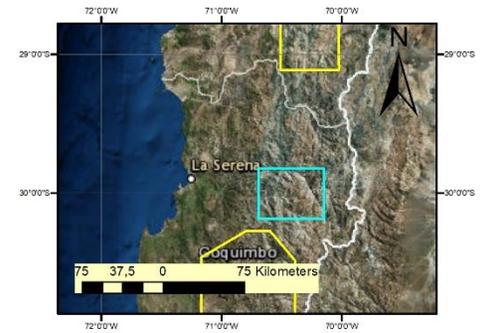
|Geología | Zona 4 | |ab\_extraz4\_14|



Geología 30k

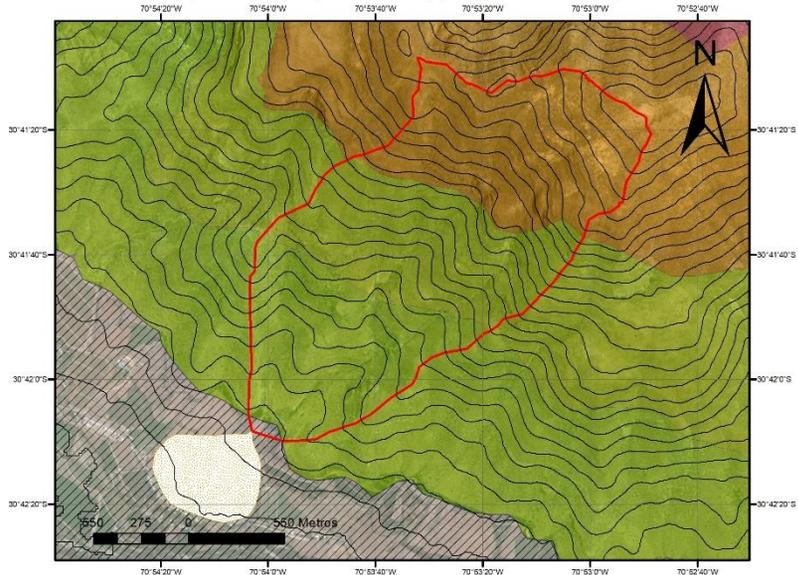
Código

- PTr
- PIHcc
- PIHf
- Tp
- abanicos z4 no selec.
- Curvas 40m

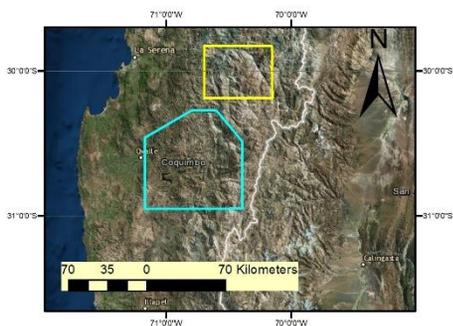


# Anexo A-10: Mapeo geológico de abanicos no seleccionados de la zona 5

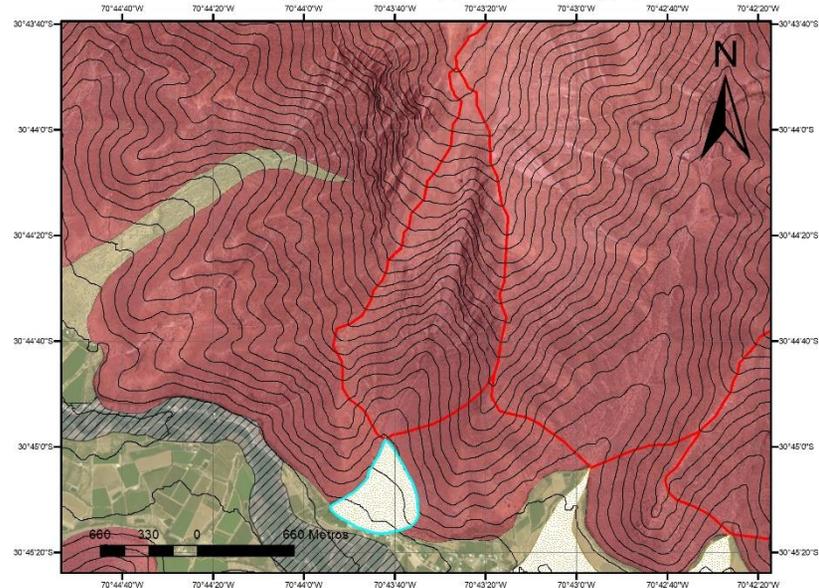
|Geología | Zona 5 | |ab\_extraz5\_1|



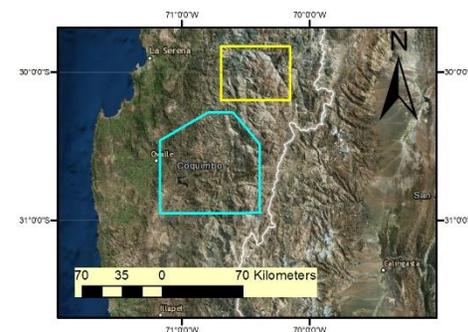
- Geologia 30k**
- Código**
- KPadp(g)
  - Kle
  - Kqlt
  - Kv(a)
  - PIHf
  - abanicos z5 no selec.
  - Curvas 40m



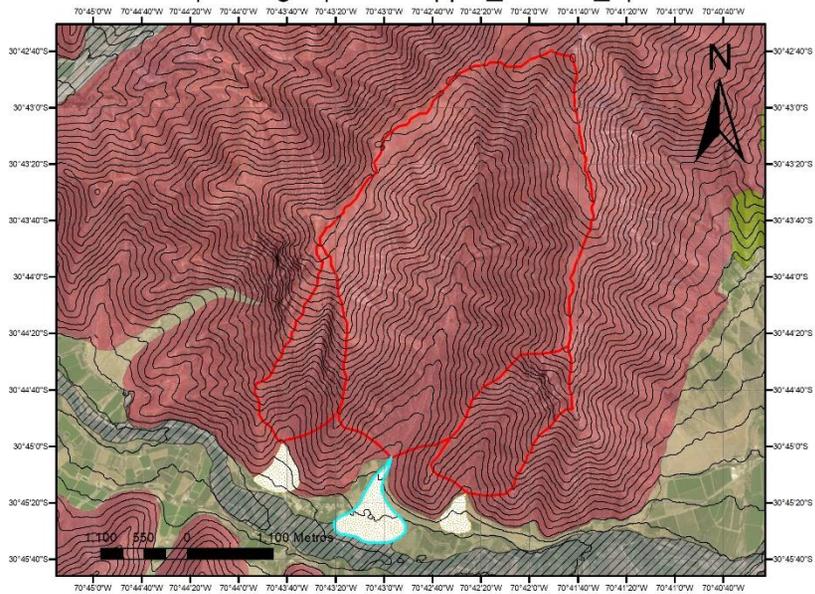
|Geología | Zona 5 | |ab\_extraz5\_2|



- Geologia 30k**
- Código**
- KPadp(g)
  - PIHcc
  - PIHf
  - abanicos z5 no selec.
  - Curvas 40m



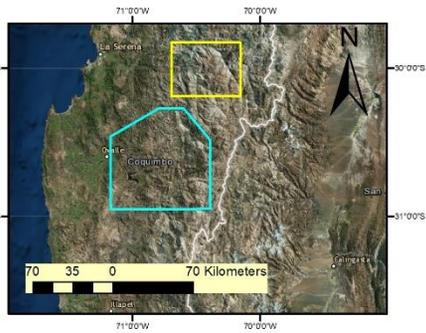
|Geología | Zona 5 | |lab\_extraz5\_3|



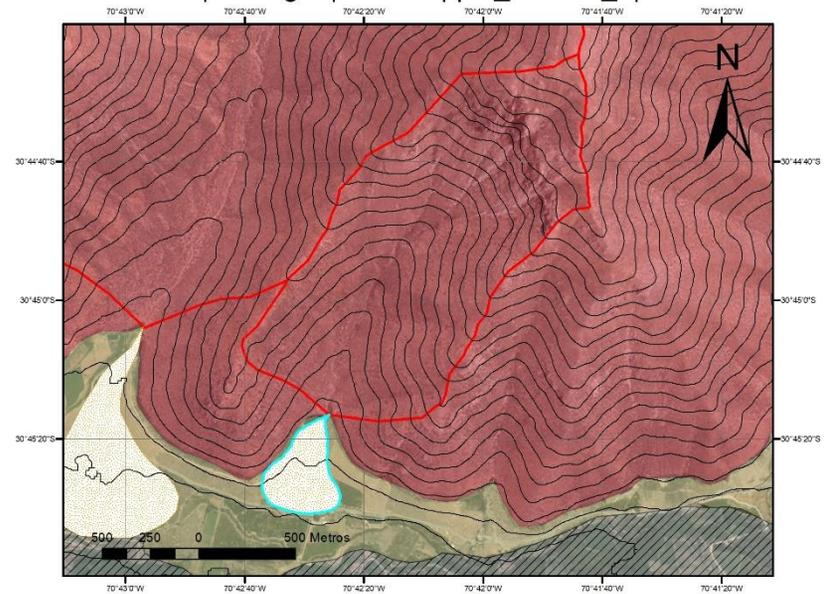
Geología 30k

Código

- KPadp(g)
- Kv(a)
- PIHcc
- PIHf
- abanicos z5 no selec.
- Curvas 40m



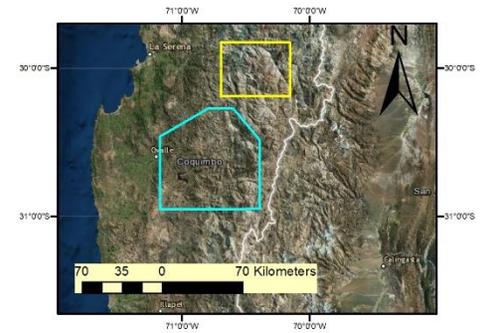
|Geología | Zona 5 | |lab\_extraz5\_4|



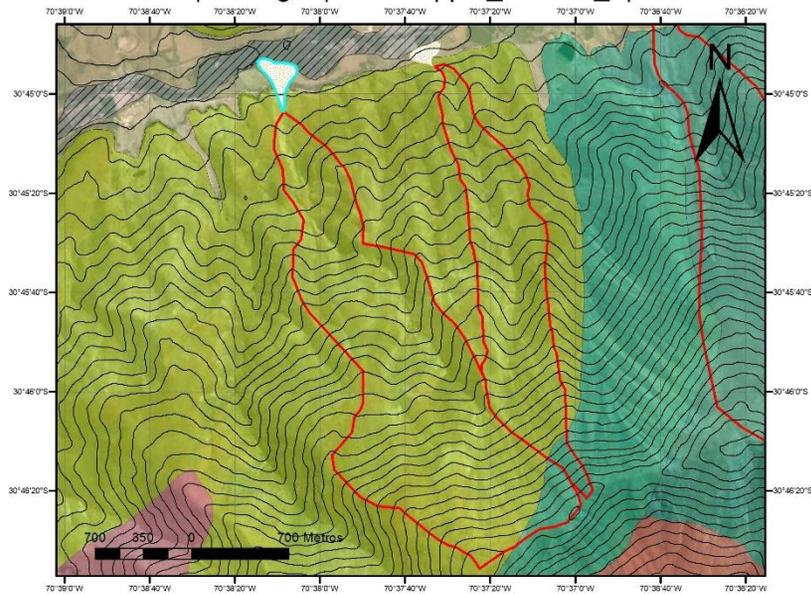
Geología 30k

Código

- KPadp(g)
- PIHcc
- PIHf
- abanicos z5 no selec.
- Curvas 40m



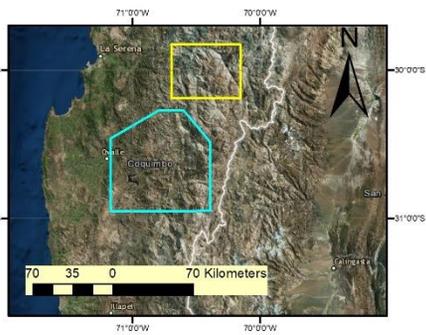
|Geología | Zona 5 | |lab\_extraz5\_5|



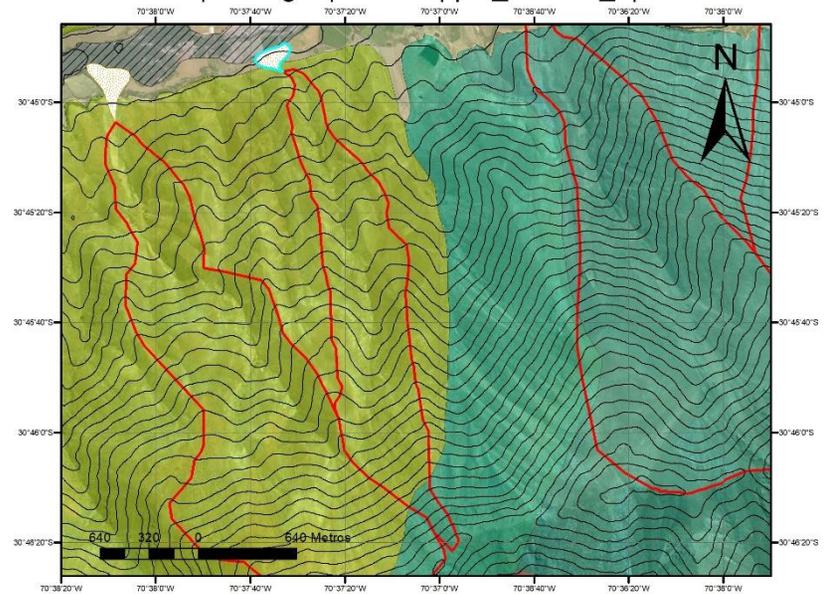
Geología 30k

Código

- Kp
- Krt
- Kv(a)
- PaEdc
- PaEgdr
- PIHcc
- PIHf
- abanicos z5 no selec.
- Curvas 40m



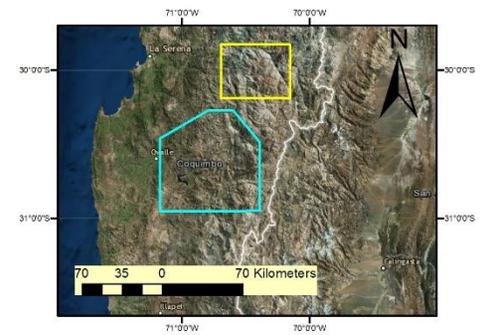
|Geología | Zona 5 | |lab\_extraz5\_6|



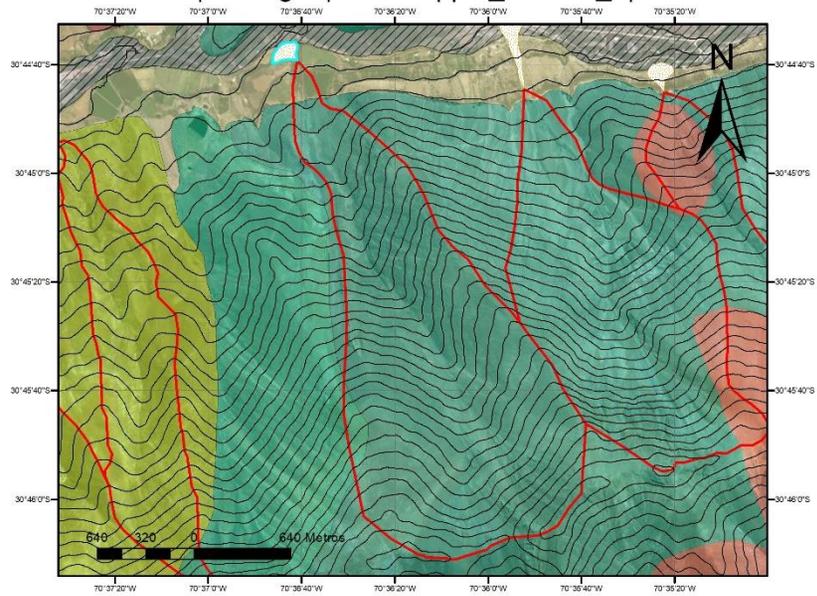
Geología 30k

Código

- Kp
- Krt
- Kv(a)
- PaEdc
- PIHcc
- PIHf
- abanicos z5 no selec.
- Curvas 40m



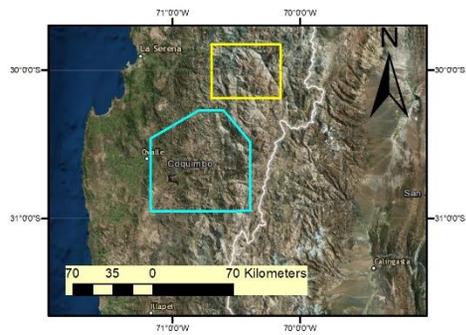
|Geología | Zona 5 | |lab\_extraz5\_7|



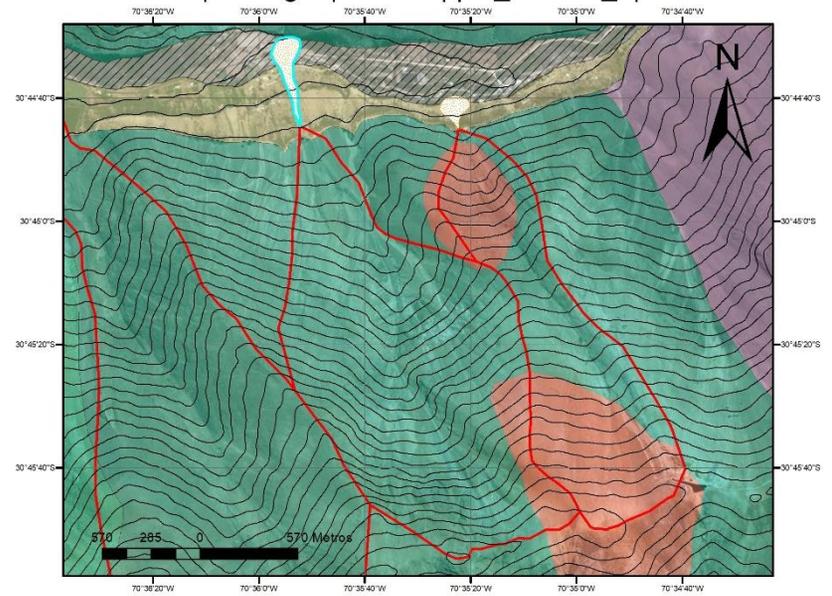
Geología 30k

Código

- Kp
- Krt
- Kv(a)
- PaEdc
- PIHcc
- PIHf
- abanicos z5 no selec.
- Curvas 40m



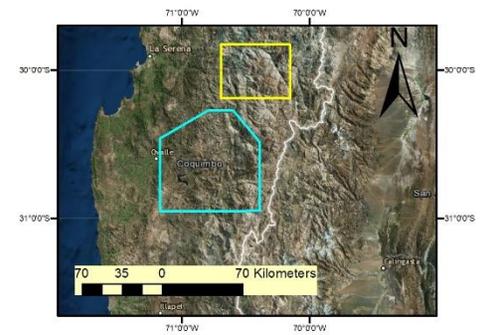
|Geología | Zona 5 | |lab\_extraz5\_8|



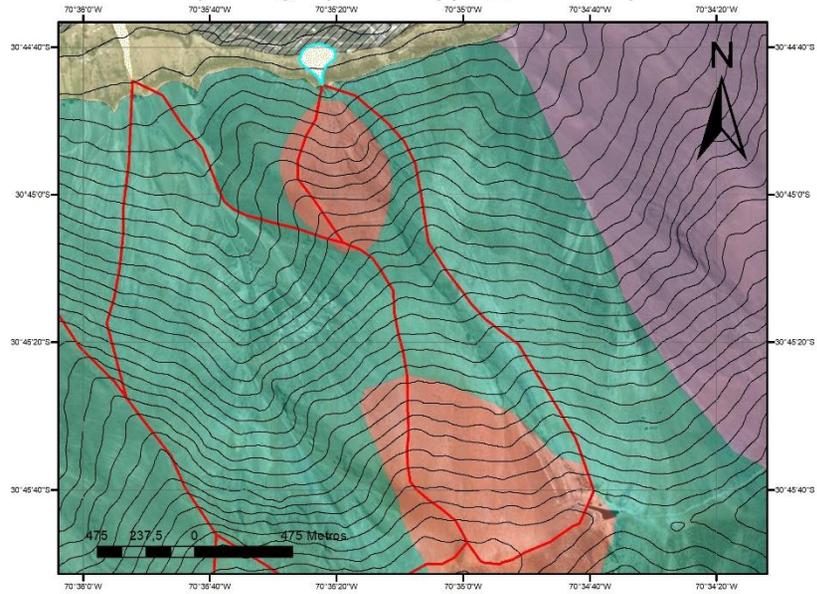
Geología 30k

Código

- Jm
- Kp
- Krt
- PaEdc
- PIHcc
- PIHf
- abanicos z5 no selec.
- Curvas 40m



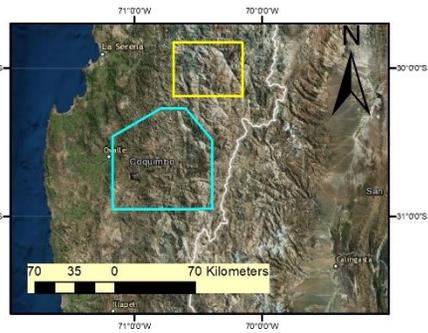
|Geología | Zona 5 | |ab\_extraz5\_9|



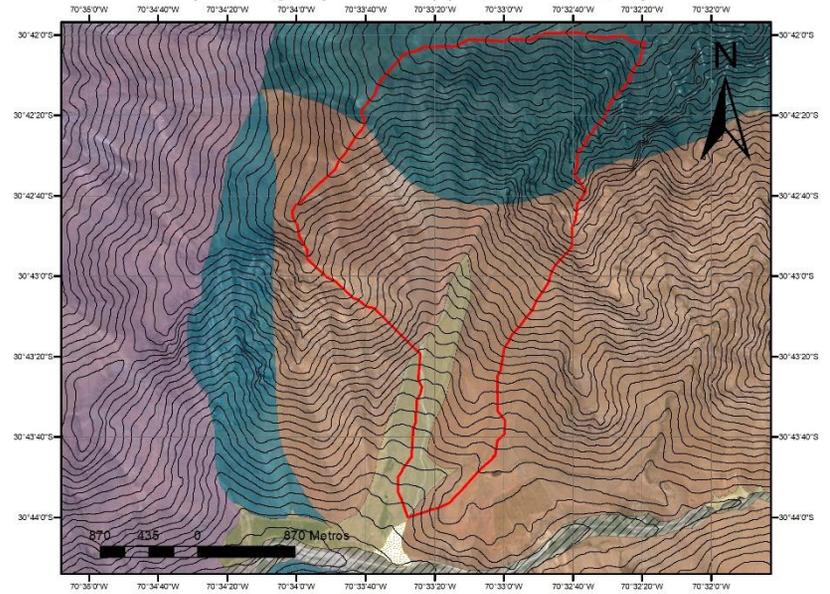
Geología 30k

Código

- Jm
- Krt
- PaEdc
- PIHcc
- PIHf
- abanicos z5 no selec.
- Curvas 40m



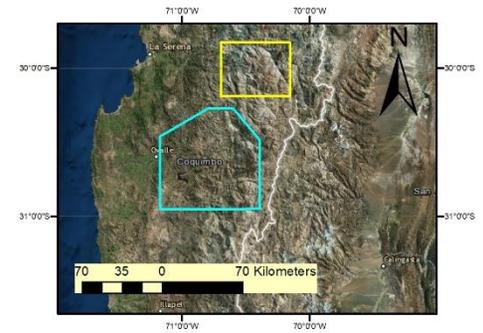
|Geología | Zona 5 | |ab\_extraz5\_10|



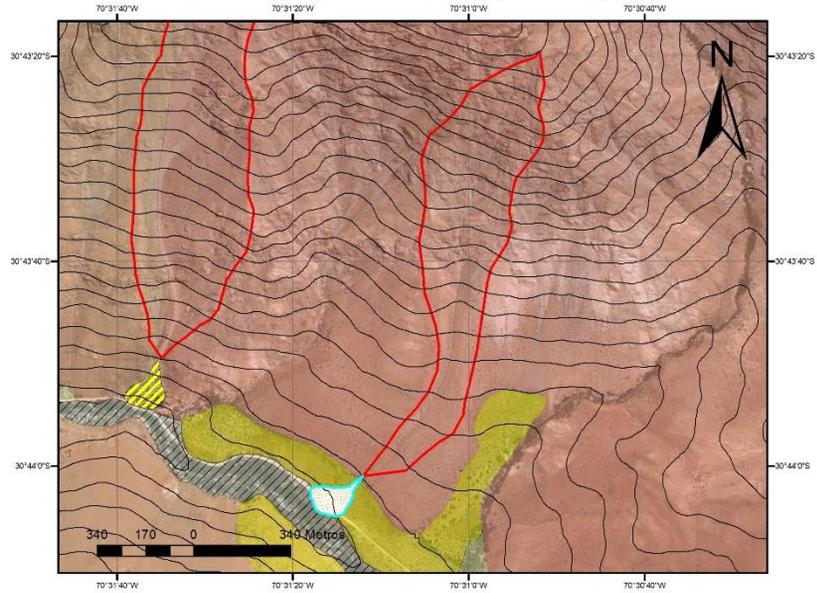
Geología 30k

Código

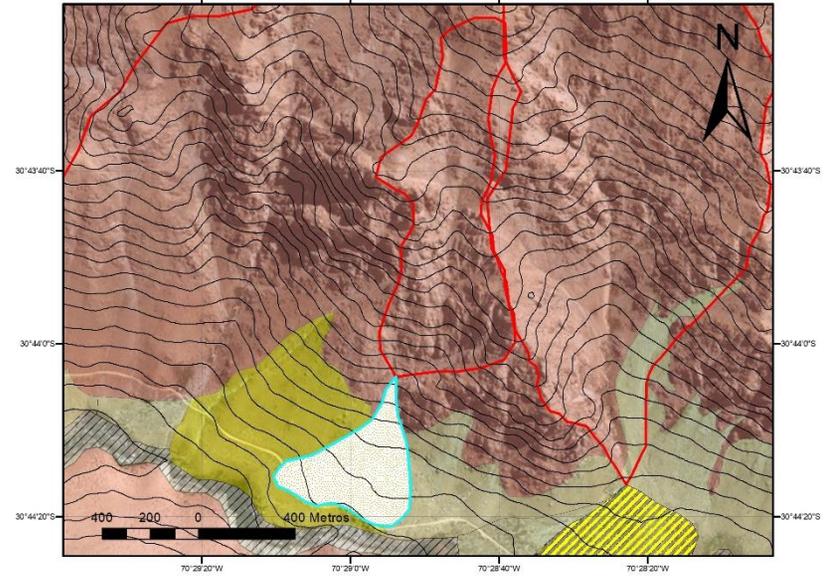
- Ja
- Jm
- Jtc(b)
- Pg
- PIHcc
- PIHf
- abanicos z5 no selec.
- Curvas 40m



|Geología | Zona 5 | |ab\_extraz5\_11|



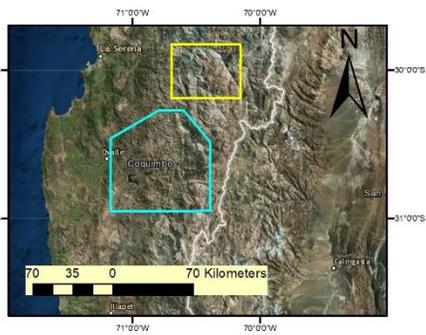
|Geología | Zona 5 | |ab\_extraz5\_12|



**Geología 30k**

**Código**

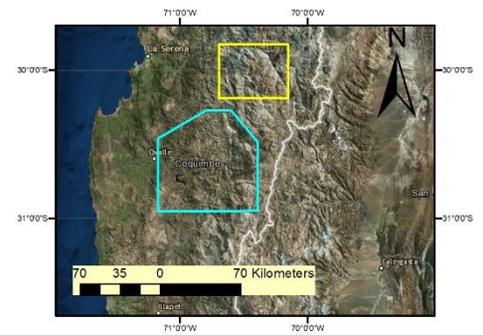
- Cg
- Pg
- PIHcc
- PIHf
- Qac
- abanicos z5 no selec.
- Curvas 40m



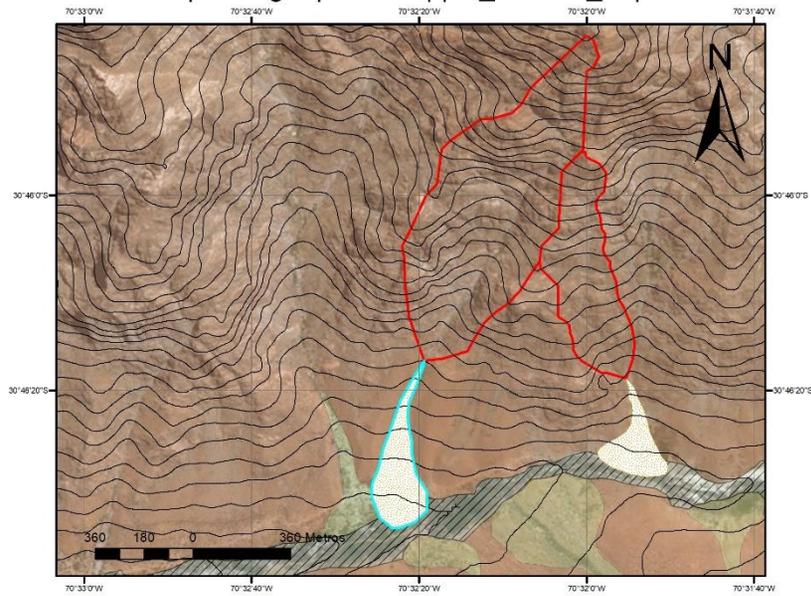
**Geología 30k**

**Código**

- Cg
- PIHcc
- PIHf
- Qac
- abanicos z5 no selec.
- Curvas 40m



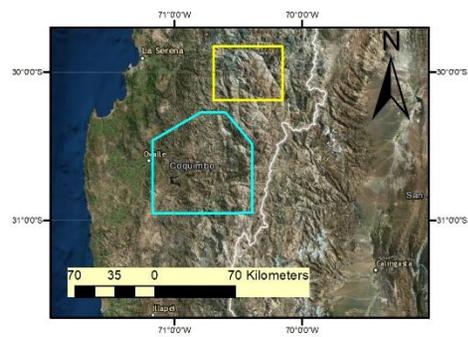
|Geología | Zona 5 | |ab\_extraz5\_13|



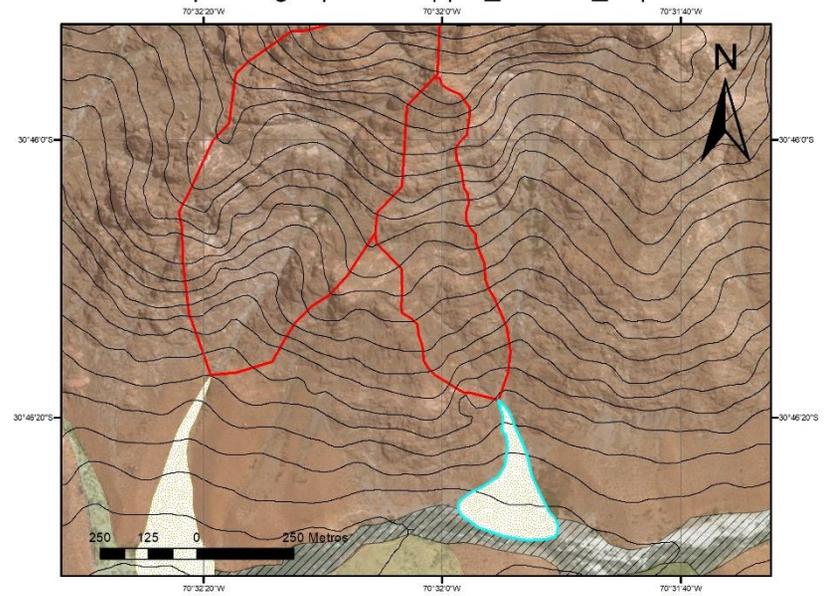
Geología 30k

Código

- Pg
- PIHcc
- PIHf
- abanicos z5 no selec.
- Curvas 40m



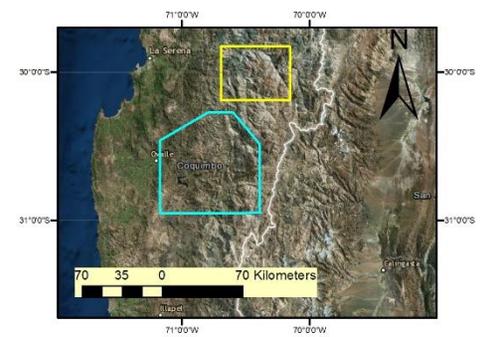
|Geología | Zona 5 | |ab\_extraz5\_14|



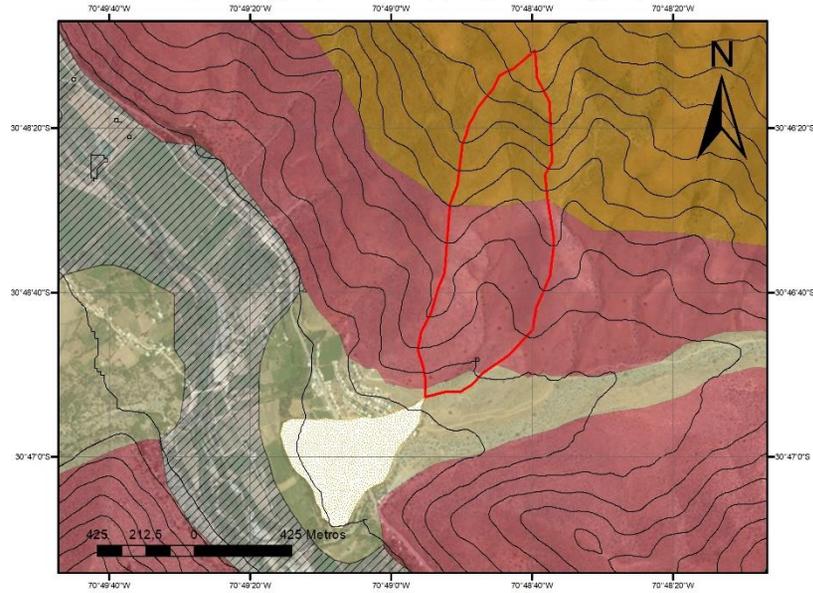
Geología 30k

Código

- Pg
- PIHcc
- PIHf
- abanicos z5 no selec.
- Curvas 40m



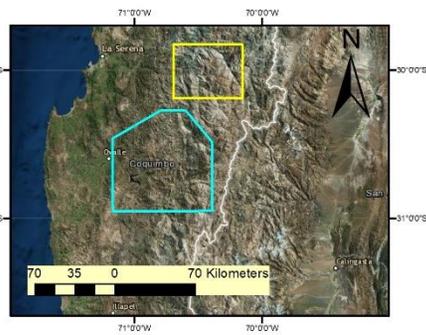
[Geología | Zona 5 | |ab\_extraz5\_15]



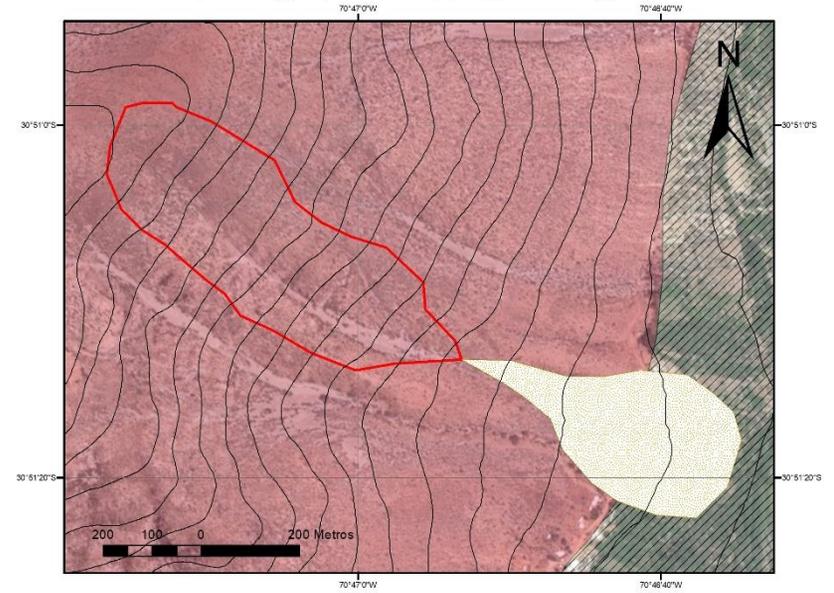
Geología 30k

Código

- KPadp(g)
- Kie
- PIHcc
- PIHf
- abanicos z5 no selec.
- Curvas 40m



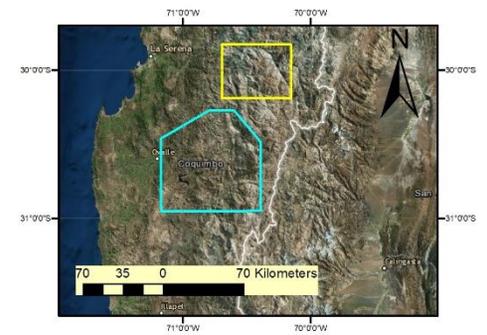
[Geología | Zona 5 | |ab\_extraz5\_16]



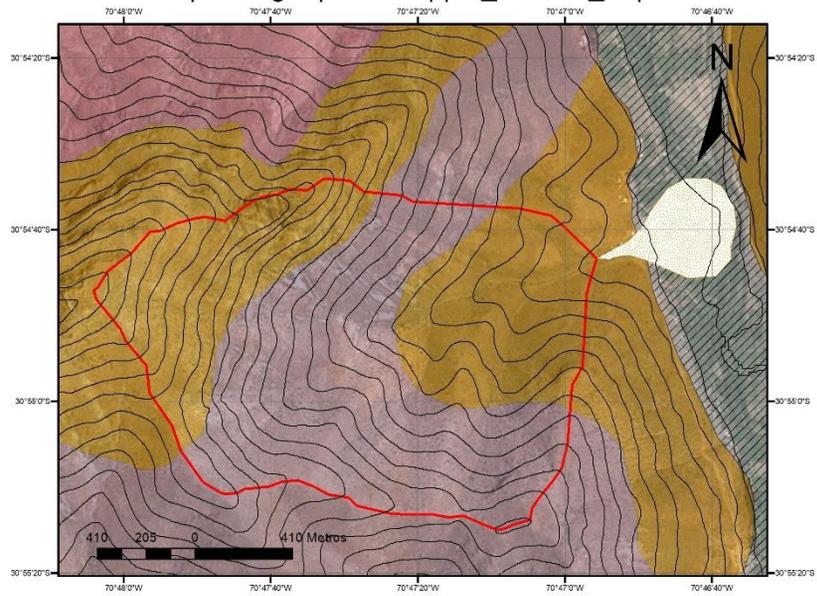
Geología 30k

Código

- PaEgdr
- PIHf
- abanicos z5 no selec.
- Curvas 40m



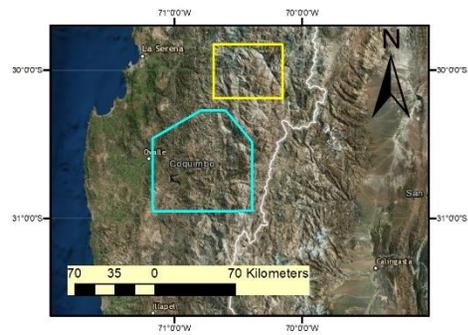
|Geología | Zona 5 | |ab\_extraz5\_17|



Geología 30k

Código

- Kle
- PaEgdg
- PaEgdr
- PIHf
- abanicos z5 no selec.
- Curvas 40m



Anexo B: Tabla de parámetros morfométricos para abanicos aluviales no seleccionados por zona.

Anexo B-1: Tabla de datos para abanicos no seleccionados en zona 1

Código	Largo abanico [m]	Ancho abanico [m]	Pendiente de abanico [°]	Distancia desde ápice [m]	Área abanico [km2]	Largo cuenca aportante [m]	Ancho cuenca aportante [m]	Área cuenca aportante [km2]	Dif. Altura de cuenca aportante [m]	Pendiente cuenca [°]
ab_extraz1_1	664	314,6	14,6	349	0,096	5053	2746	8,13	1000	11,19
ab_extraz1_2	764,1	517,4	9,3	265	0,19	2508	876,4	1,24	520	11,71
ab_extraz1_3	433,5	206	13,8	126	0,04	2124	371,2	0,5	420	11,19
ab_extraz1_4	262	87	12,15	249	0,012	2124	371,2	0,5	420	11,19
ab_extraz1_5	458,2	233,9	17,9	0	0,051	2321	791,7	0,95	500	12,16
ab_extraz1_6	447,8	207,5	8,7	496	0,052	1795	350,1	0,43	580	17,91
ab_extraz1_7	567	264	11,8	217,6	0,073	1474	414,8	0,29	520	19,43
ab_extraz1_8	470,8	339	15,7	891	0,074	1697	812,8	0,69	600	19,47
ab_extraz1_9	949	653	16,97	235	0,309	3611	4513	6,25	900	14,00
ab_extraz1_10	1172	512	16,33	634	0,33	1663	690,5	0,85	600	19,84
ab_extraz1_11	1327	517	13,7	310,6	0,357	1405,6	481,7	0,48	640	24,48
ab_extraz1_12	617,8	360,2	12,9	695	0,139	3914,5	532,6	1,72	950	13,64
ab_extraz1_13	617,3	452,8	9,3	480	0,126	5289,9	856,3	2,49	980	10,50
ab_extraz1_14	747,6	403,6	12	706	0,138	3790,9	930,3	1,86	930	13,78
ab_extraz1_15	905,7	1185,1	11,1	414	0,557	7722,9	4686	1,58	1120	8,25
ab_extraz1_16	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ab_extraz1_17	548	333,8	15,7	399,3	0,094	5106,1	1056,5	3,55	1200	13,23
ab_extraz1_18	586,1	404,7	18,8	0	0,13	4644,8	934,1	2,68	1120	13,56
ab_extraz1_19	594,7	168,4	26,5	475	0,046	1891,1	600,8	0,64	620	18,15
ab_extraz1_20	381,2	289,6	9,5	619,3	0,07	7859,9	3601,5	14,4	920	6,68
ab_extraz1_21	822,5	630	4,4	613,3	0,32	4580,3	2806,6	6,82	740	9,18
ab_extraz1_22	124704	654,1	7,3	0	0,47	5369,6	2205,3	6,14	710	7,53
ab_extraz1_23	686,7	850,6	7,1	0	0,3	3967	1375,4	3,18	830	11,82
ab_extraz1_24	653,7	740,9	6,5	181	0,25	5583,7	1197,9	3,95	940	9,56

## Anexo B-2: Tabla de datos para abanicos no seleccionados de zona 2

Código	Largo abanico [m]	Ancho abanico [m]	Pendiente de abanico [°]	Distancia desde ápice [m]	Área abanico [km2]	Largo cuenca aportante [m]	Ancho cuenca aportante [m]	Área cuenca aportante [km2]	Dif. Altura de cuenca aportante [m]	Pendiente Cuenca [°]
ab_extraz2_1	678	1059,8	7,4	0	0,33	2531,3	961,8	1,16	1270	26,6
ab_extraz2_2	682,5	920,1	8,65	0	0,27	2878	779,6	1,16	1400	25,7
ab_extraz2_3	562,4	305,5	16,11	0	0,073	655	353	0,1	410	32,2
ab_extraz2_4	115,8	229,6	10,6	0	0,014	4429,6	2377,7	5,11	1760	21,8
ab_extraz2_5	1760,8	1960,1	6,41	0	1,66	4622,5	2466,6	6,9	1750	20,9
ab_extraz2_6	1237,9	1542,2	6,5	0	1,24	4800,2	2682,2	7,6	1500	17,3
ab_extraz2_7	1432,2	1049,8	9,2	0	0,66	2626,1	1309,3	1,73	1070	22,3
ab_extraz2_8	574,3	335,1	9,8	0	0,085	684,2	240,2	0,08	420	30,9
ab_extraz2_9	452,3	880,4	9,7	0	0,2	3133,8	1229,1	1,68	1150	20,3
ab_extraz2_10	988,5	531,4	8,1	100,6	0,23	2689,3	845,1	1,49	1200	23,9
ab_extraz2_11	1880,9	1298,7	8,8	0	0,97	9926,5	4463,9	26,2	1050	6,6
ab_extraz2_12	593,3	306,2	14,2	0	0,093	958,5	272,7	0,14	400	22,2
ab_extraz2_13	832	300,9	12,6	0	0,117	1929,8	535,6	0,68	590	17,2
ab_extraz2_14	2163,2	2251,4	4,5	0	2,13	34619,4	8319,8	236,4	1810	3,03
ab_extraz2_15	880,3	765,06	6,7	0	0,31	3990,7	1898,3	4,16	950	13,4

## Anexo B-3: Tabla de datos para abanicos no seleccionados de zona 3

Código	Largo abanico [m]	Ancho abanico [m]	Pendiente de abanico [°]	Distancia desde ápice [m]	Área abanico [km2]	Largo cuenca aportante [m]	Ancho cuenca aportante [m]	Área cuenca aportante [km2]	Dif. Altura de cuenca aportante [m]	Pendiente Cuenca [°]
ab_extraz3_1	516,2	750,7	10,7	0	0,122	2600,7	1098	1,91	1050	21,9
ab_extraz3_2	219,13	146,15	11,8	0	0,009	3851,9	677,4	1,65	1390	19,6
ab_extraz3_3	282,2	393,4	10,12	0	0,046	2210	587,3	0,83	1120	26,8
ab_extraz3_4	107,97	159,54	11,3	168,9	0,006	1642,6	462,1	0,39	850	26,5
ab_extraz3_5	262,35	204,21	8,42	0	0,017	11500	5907,4	32,12	2200	10,8
ab_extraz3_6	249,12	237,17	13,79	127,87	0,017	2421,8	626,6	0,9	1130	25,21
ab_extraz3_7	55,9	302,6	9,29	0	0,069	1980,3	495,6	0,63	950	25,6
ab_extraz3_8	340,4	169,1	21,3	389,2	0,02	1486,19	1166,9	0,64	810	26,8
ab_extraz3_9	252	256,9	13,58	77,3	0,027	1197,6	319,2	0,21	640	28,07
ab_extraz3_10	357,65	298,45	11,3	160,57	0,039	4940,5	1417,2	4,18	1630	18,2
ab_extraz3_11	203,5	159,96	10,7	298	0,013	1156	147,97	0,13	670	29,8
ab_extraz3_12	201,5	165,2	17,7	587,5	0,011	1281,08	225,64	0,17	700	28,3
ab_extraz3_13	257,8	210,47	10,9	321,1	0,017	1540,1	219,12	0,2	800	27,2
ab_extraz3_14	302,8	233,73	17,4	394,8	0,027	861,2	682,5	0,28	470	28,6
ab_extraz3_15	336,31	125,34	8,61	54,3	0,022	2196,9	529,1	0,69	1050	25,5
ab_extraz3_16	298	260,6	11,7	0	0,023	2252	866,4	1,32	1150	27,5
ab_extraz3_17	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ab_extraz3_18	170,1	195,7	17,7	45	0,014	3460	736,6	1,42	1600	24,8
ab_extraz3_19	163,6	162,8	13,3	213,3	0,01	815,6	282,6	0,12	475	30,3
ab_extraz3_20	230,6	340,9	7,4	301	0,034	3509,6	939,3	2,4	880	14,1
ab_extraz3_21	130,8	85,4	12,6	125,9	0,003	923,4	323,3	0,15	440	25,5
ab_extraz3_22	203,1	290,3	21,1	284,4	0,017	2378,8	1174,3	1,65	950	23,2
ab_extraz3_23	260,9	146,1	10,8	0	0,017	2569	568,4	0,8	1050	21,9
ab_extraz3_24	448,2	347,1	9		0,054	2650,6	1699,8	2,35	1100	22,5

## Anexo B-4: Tabla de datos para abanicos no seleccionados de zona 4

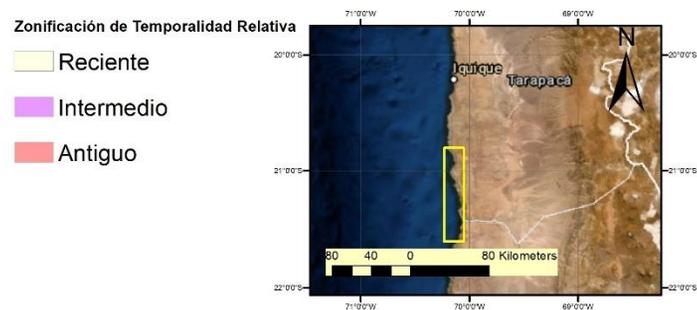
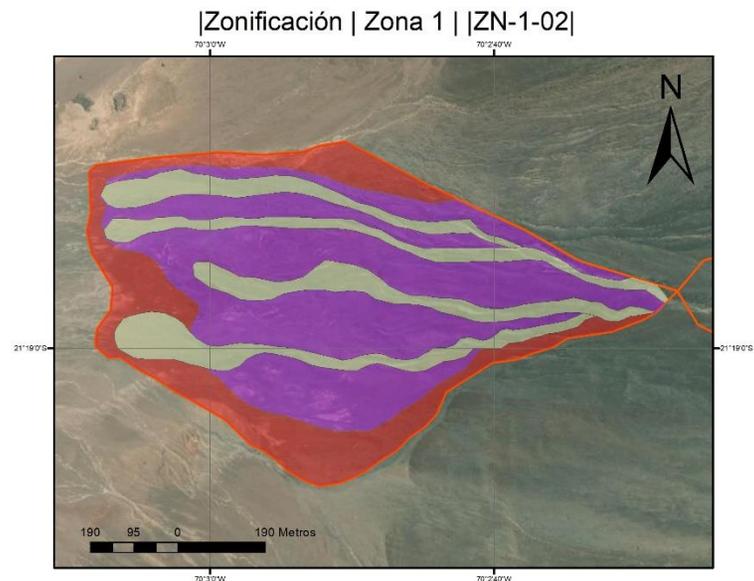
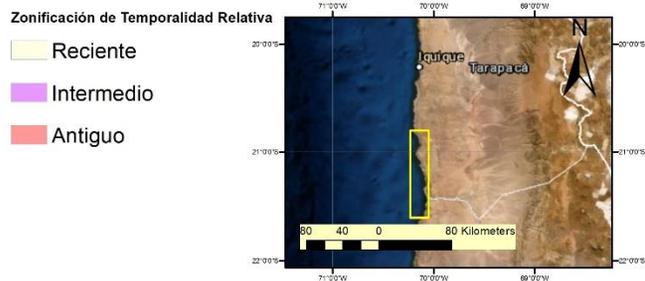
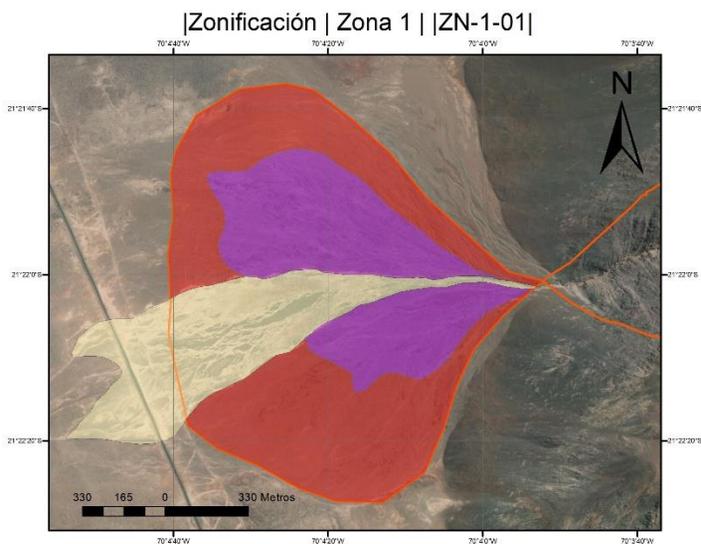
Código	Largo abanico [m]	Ancho abanico [m]	Pendiente de abanico [°]	Distancia desde ápice [m]	Área abanico [km2]	Largo cuenca aportante [m]	Ancho cuenca aportante [m]	Área cuenca aportante [km2]	Dif. Altura de cuenca aportante [m]	Pendiente Cuenca [°]
ab_extraz4_1	1134,7	645,9	7,3	0	0,22	2501,8	1133,5	2,18	1170	25,06
ab_extraz4_2	946,8	728,6	6,3	383	0,24	3979,2	2804,4	3,31	1370	19,00
ab_extraz4_3	923	669,4	6,9	397	0,23	5053	2059,7	0,09	1600	17,57
ab_extraz4_4	422,8	544	17,8	282	0,08	3469	1398,5	4,17	1740	26,64
ab_extraz4_5	421	579,8	16,9	0	0,08	3320,3	1227,4	3,05	1790	28,33
ab_extraz4_6	182	121,5	23,1	0	0,01	784,7	220	1,6	540	34,53
ab_extraz4_7	454,6	359	22	189	0,04	3878,2	1656,5	4,22	1900	26,10
ab_extraz4_8	134,4	200,8	9,9	41	0,01	3971,9	701,8	1,73	1700	23,17
ab_extraz4_9	532,9	513,9	9,3	0	0,06	4863,2	3021	6,6	2150	23,85
ab_extraz4_10	202,4	222,8	26,8	0	0,017	766,9	210,8	0,08	470	31,50
ab_extraz4_11	88,4	66,1	23,5	0	0,0025	1894,7	368,4	0,35	1140	31,03
ab_extraz4_12	301,5	279,9	7,7	78,2	0,03	4607	1520,6	3,65	1700	20,25
ab_extraz4_13	378	435,2	9,7	172,4	0,06	2839,3	1293,7	1,44	1660	30,31
ab_extraz4_14	232,5	187,7	10,2	181,4	0,016	2232,3	730,9	0,78	1370	31,54

## Anexo B-5: Tabla de datos para abanicos no seleccionados de zona 5

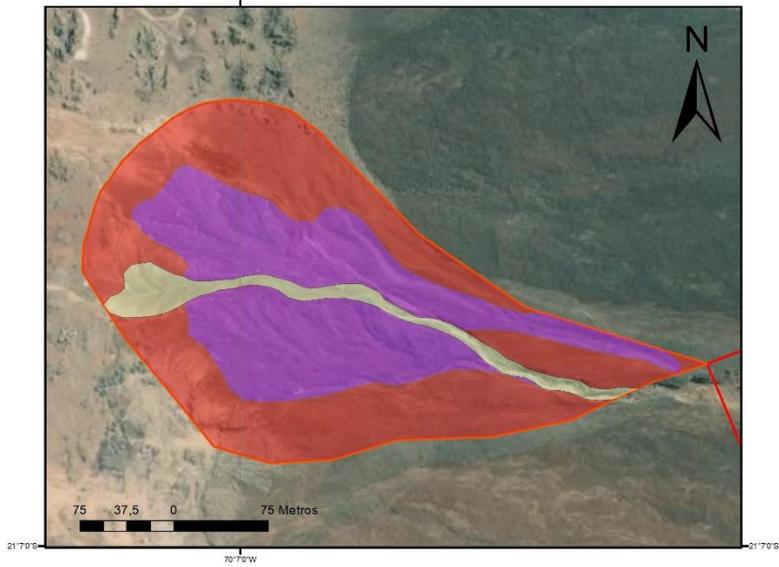
Código	Largo abanico [m]	Ancho abanico [m]	Pendiente de abanico [°]	Distancia desde ápice [m]	Área abanico [km2]	Largo cuenca aportante [m]	Ancho cuenca aportante [m]	Área cuenca aportante [km2]	Dif. Altura de cuenca aportante [m]	Pendiente Cuenca [°]
ab_extraz5_1	602,8	646,1	6,2	107,6	0,21	2862,8	1307,7	2,14	940	18,18
ab_extraz5_2	632,8	585,9	8,2	0	0,14	2589,1	1039,8	1,15	1020	21,50
ab_extraz5_3	1129,6	909,5	4,1	0	0,31	5566,6	2933,6	8,8	1258	12,73
ab_extraz5_4	550,2	414,1	7,1	0	0,08	2274,1	971	1,36	850	20,49
ab_extraz5_5	359	294,3	7,2	114,4	0,03	3588,5	1222,3	2,04	1220	18,78
ab_extraz5_6	180,6	247,2	11,1	0	0,01	3314	493,1	0,93	1220	20,21
ab_extraz5_7	152,7	208,4	6,8	317	0,01	3490,2	1570	2,31	2250	32,81
ab_extraz5_8	524,2	177,8	8,7	0	0,03	2725,8	1393,7	1,74	1200	23,76
ab_extraz5_9	198,9	177,9	18,2	0	0,01	2488,6	803,9	0,92	1120	24,23
ab_extraz5_10	434,3	369	9,1	280	0,04	4933,1	2497,4	4,89	1950	21,57
ab_extraz5_11	199,4	143,3	15,1	0	0,007	1648,4	337	0,25	810	26,17
ab_extraz5_12	585,9	569,3	20,1	0	0,12	1528,4	544,2	0,4	810	27,92
ab_extraz5_13	637,3	206	18,8	0	0,04	1338,8	520,3	0,31	990	36,48
ab_extraz5_14	359,9	264,3	19,6	0	0,027	862,4	239,8	0,11	630	36,15
ab_extraz5_15	639,9	528,3	4,7	0	0,13	1627	437,3	0,4	400	13,81
ab_extraz5_16	596,7	290,9	12,2	0	0,072	885,3	276,8	0,13	480	28,47
ab_extraz5_17	619,6	431,8	6,9	0	0,1	2109,7	1431,1	1,65	860	22,18

## Anexo C: Zonificación de temporalidad relativa para abanicos seleccionados

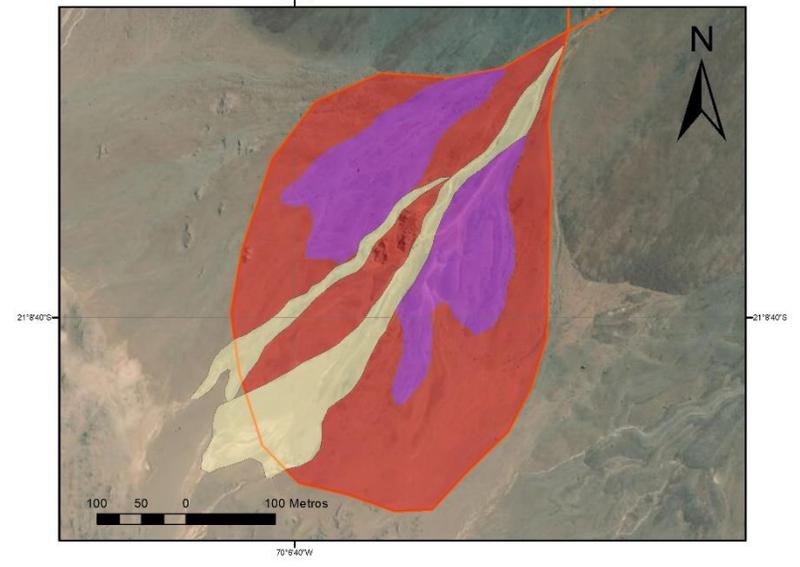
### Anexo C-1: Zonificación de temporalidad relativa para abanicos seleccionados de clasificación I



|Zonificación | Zona 1 | |ZN-1-03|

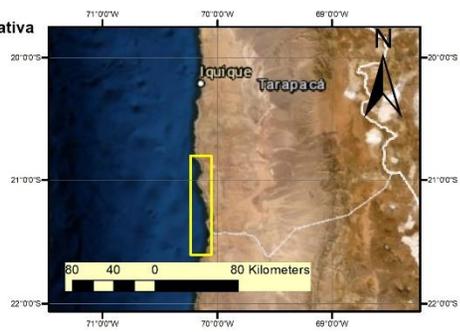


|Zonificación | Zona 1 | |ZN-1-04|



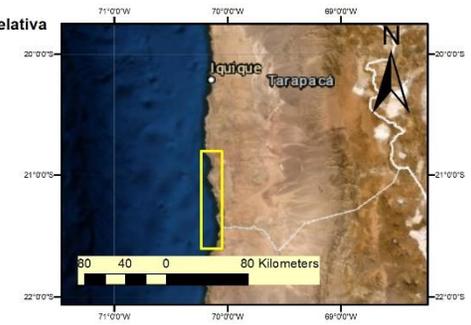
Zonificación de Temporalidad Relativa

- Reciente
- Intermedio
- Antiguo

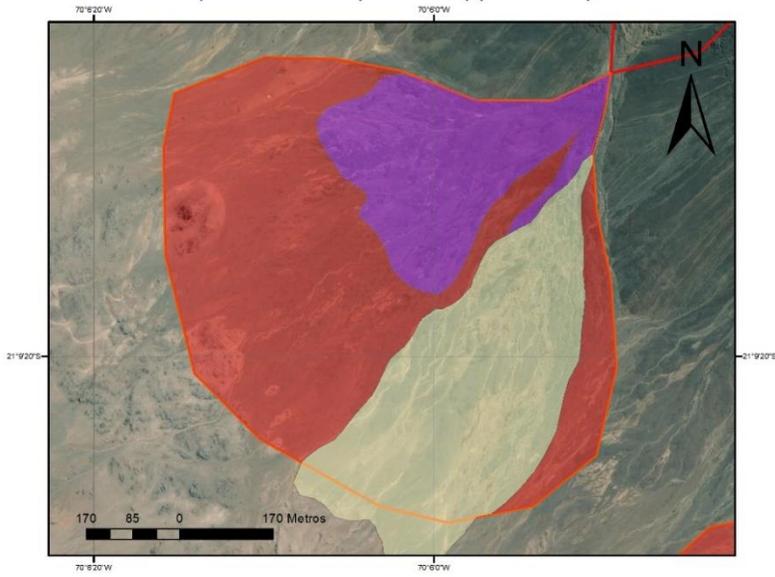


Zonificación de Temporalidad Relativa

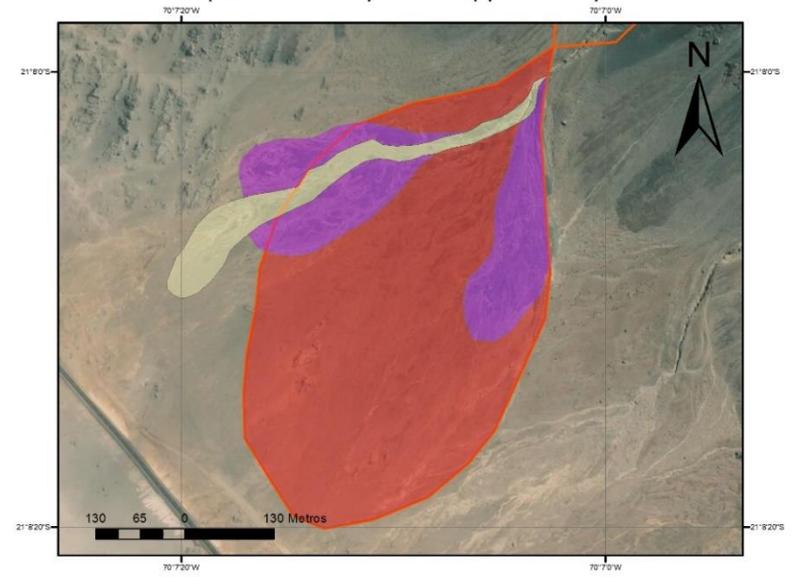
- Reciente
- Intermedio
- Antiguo



[Zonificación | Zona 1 | |ZN-1-05]

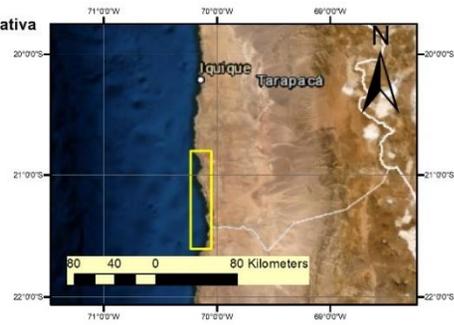


[Zonificación | Zona 1 | |ZN-1-07]



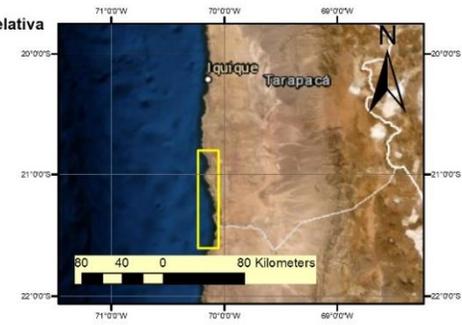
Zonificación de Temporalidad Relativa

- Reciente
- Intermedio
- Antiguo

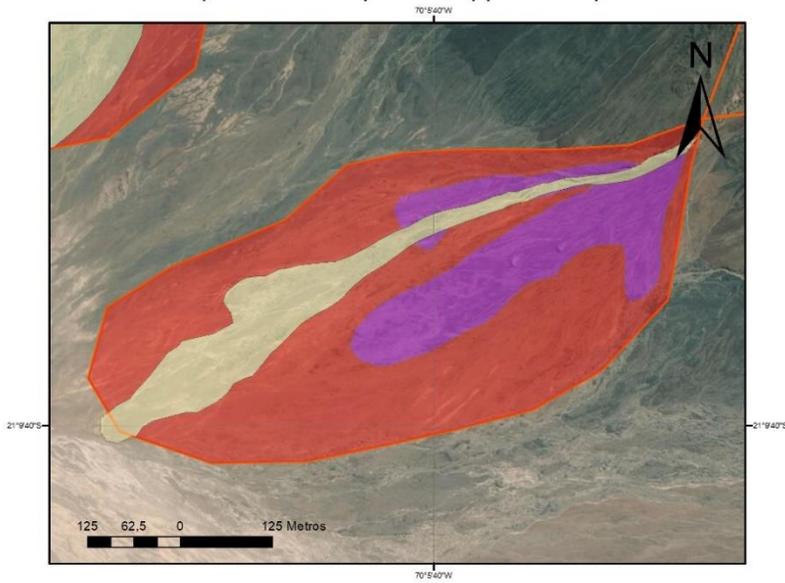


Zonificación de Temporalidad Relativa

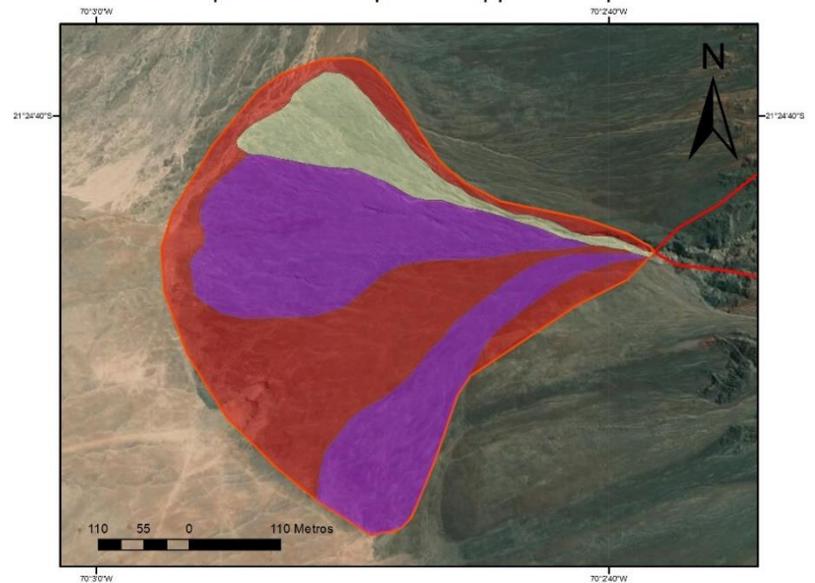
- Reciente
- Intermedio
- Antiguo



[Zonificación | Zona 1 | |ZN-1-08|]

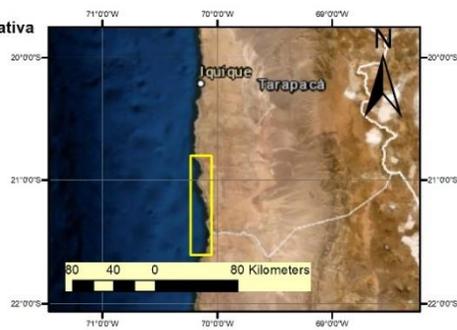


[Zonificación | Zona 1 | |ZN-1-09|]



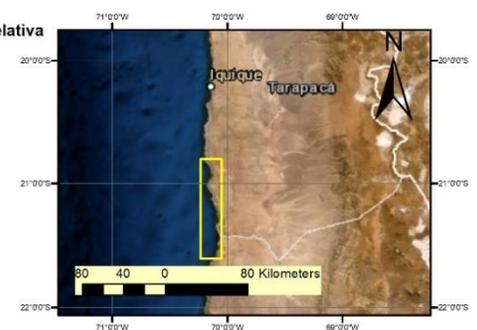
Zonificación de Temporalidad Relativa

- Reciente
- Intermedio
- Antiguo

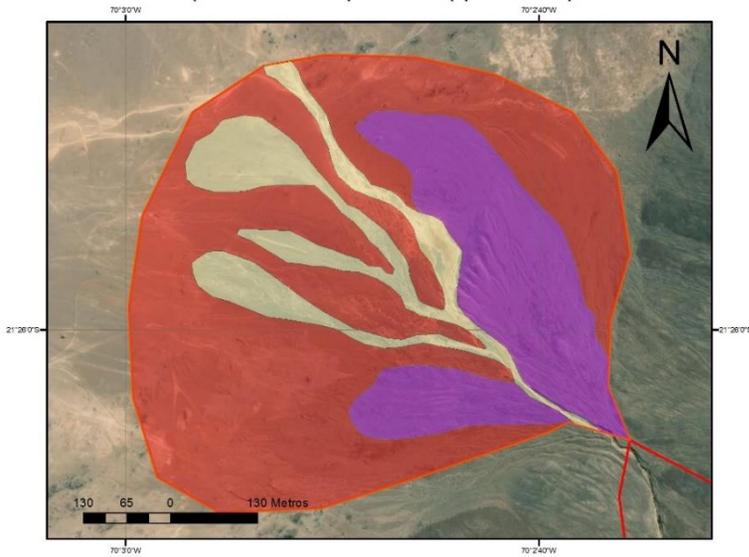


Zonificación de Temporalidad Relativa

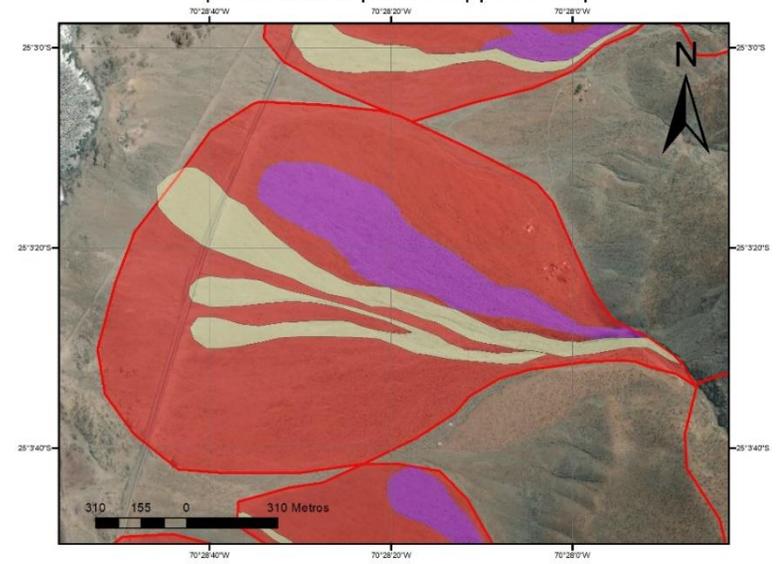
- Reciente
- Intermedio
- Antiguo



[Zonificación | Zona 1 | |ZN-1-10]

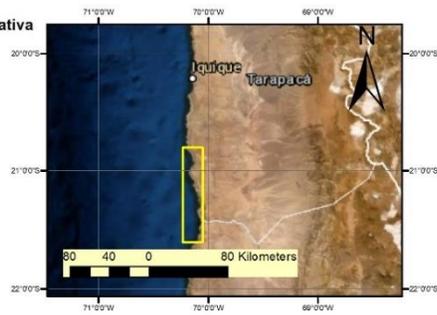


[Zonificación | Zona 2 | |ZN-2-01]



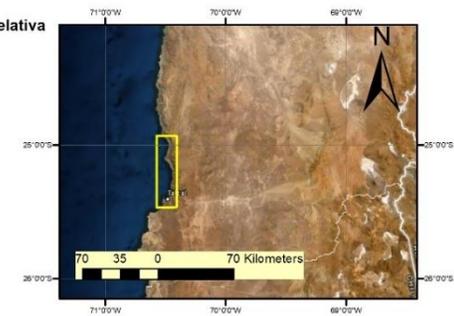
Zonificación de Temporalidad Relativa

- Reciente
- Intermedio
- Antiguo

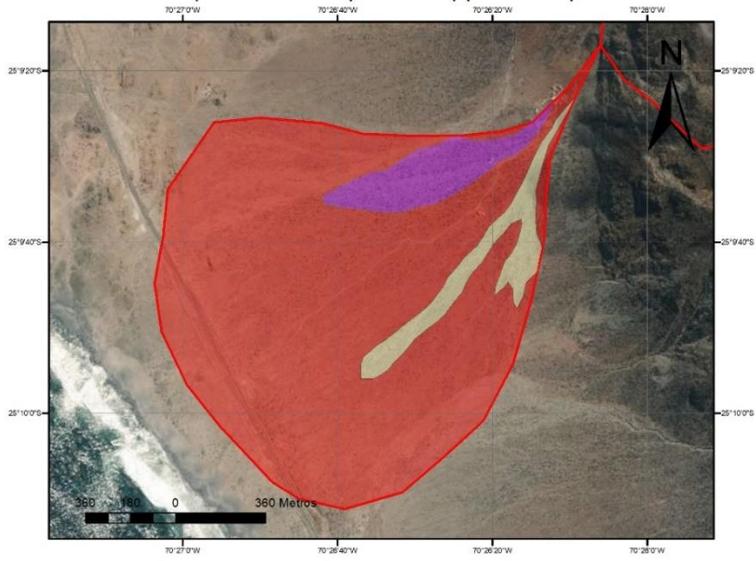


Zonificación de Temporalidad Relativa

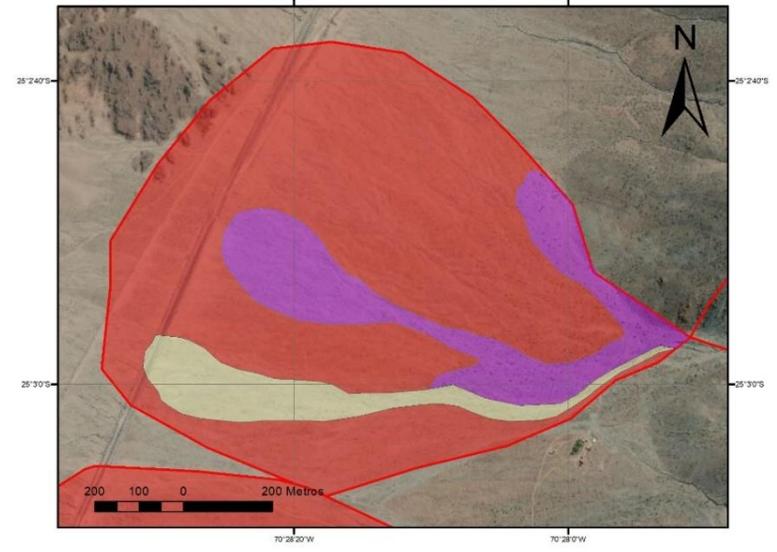
- Reciente
- Intermedio
- Antiguo



[Zonificación | Zona 2 | |ZN-2-02]

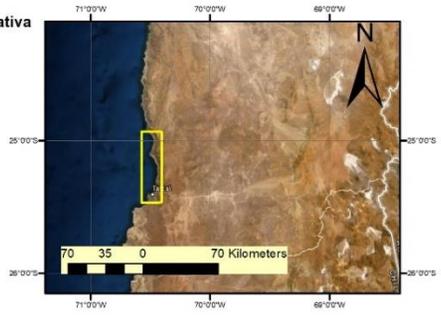


[Zonificación | Zona 2 | |ZN-2-03]



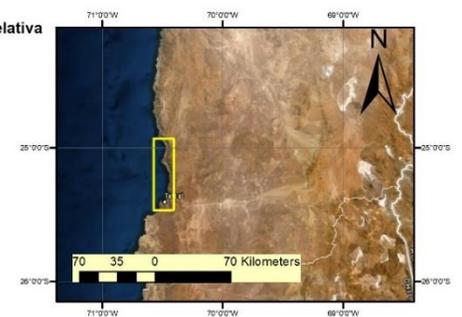
Zonificación de Temporalidad Relativa

- Reciente
- Intermedio
- Antiguo

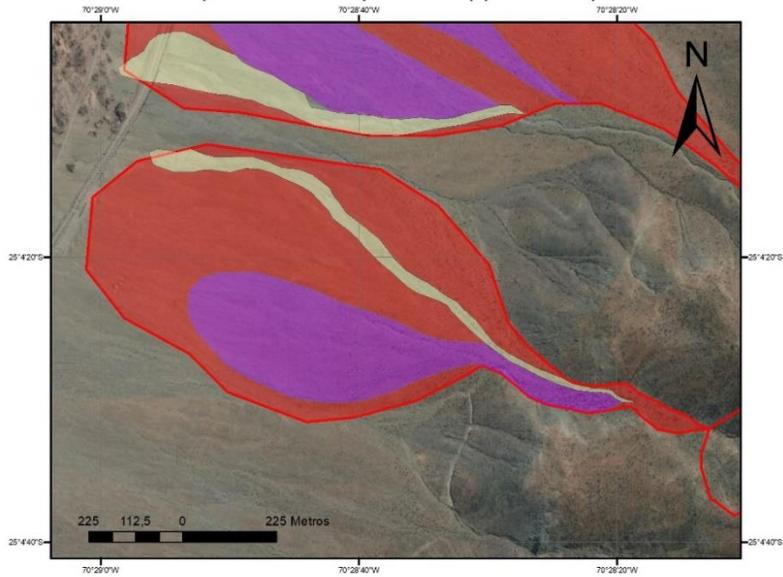


Zonificación de Temporalidad Relativa

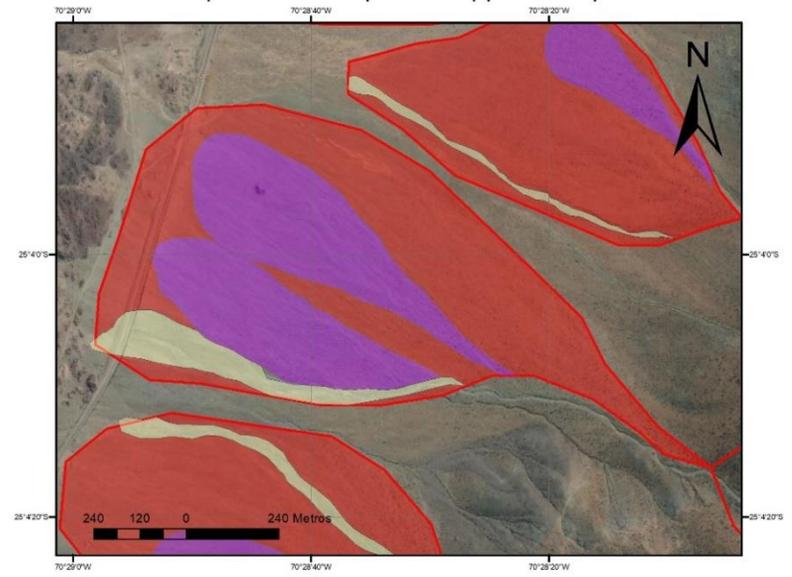
- Reciente
- Intermedio
- Antiguo



|Zonificación | Zona 2 | |ZN-2-04|

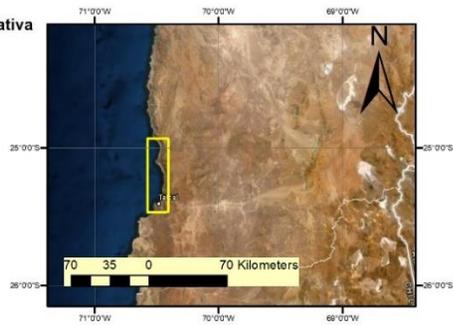


|Zonificación | Zona 2 | |ZN-2-05|



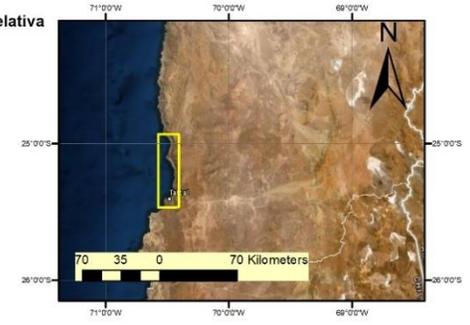
Zonificación de Temporalidad Relativa

- Reciente
- Intermedio
- Antiguo

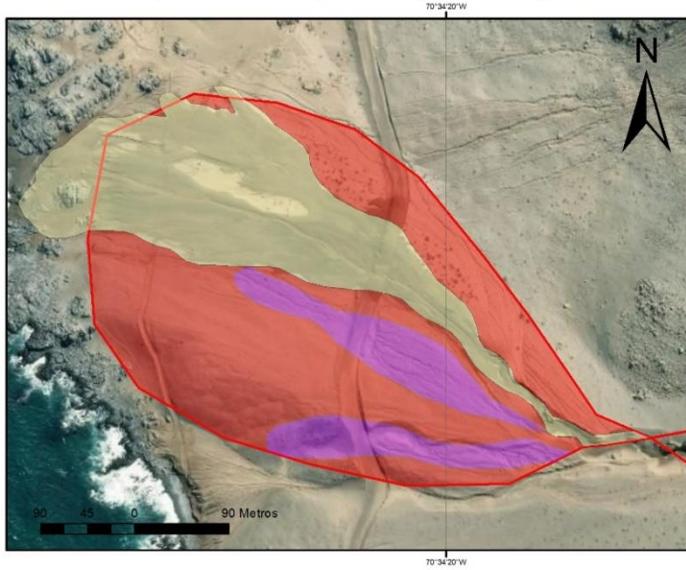


Zonificación de Temporalidad Relativa

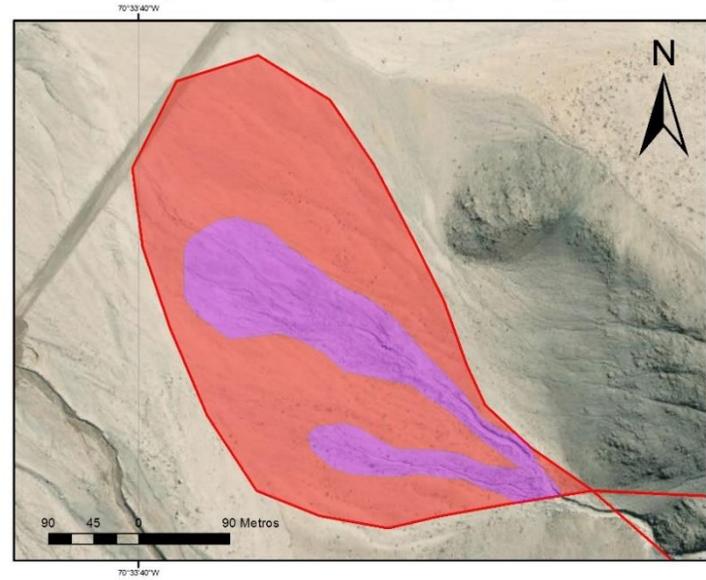
- Reciente
- Intermedio
- Antiguo



[Zonificación | Zona 2 | |ZN-2-06|]

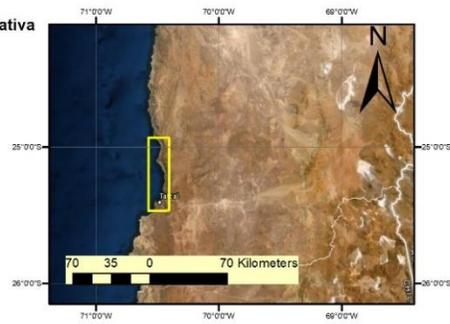


[Zonificación | Zona 2 | |ZN-2-07|]



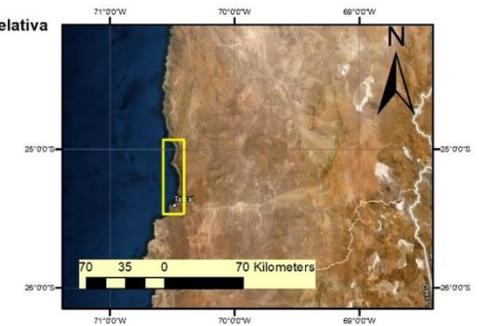
Zonificación de Temporalidad Relativa

- Reciente
- Intermedio
- Antiguo

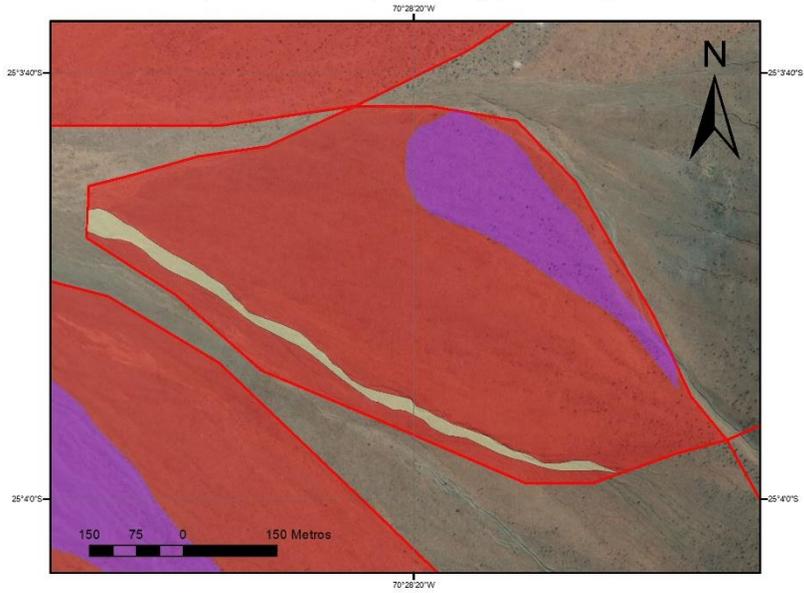


Zonificación de Temporalidad Relativa

- Intermedio
- Antiguo

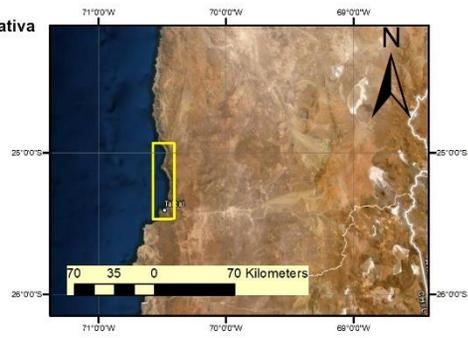


|Zonificación | Zona 2 | |ZN-2-08|



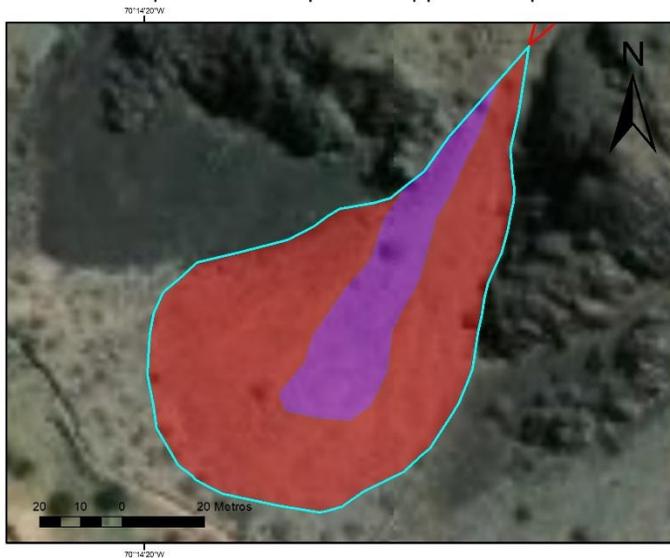
Zonificación de Temporalidad Relativa

- Reciente
- Intermedio
- Antiguo



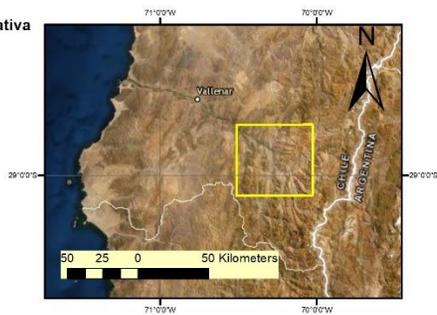
## Anexo C-2: Zonificación de temporalidad relativa para abanicos de clasificación II

|Zonificación | Zona 3 | |ZN-3-01|

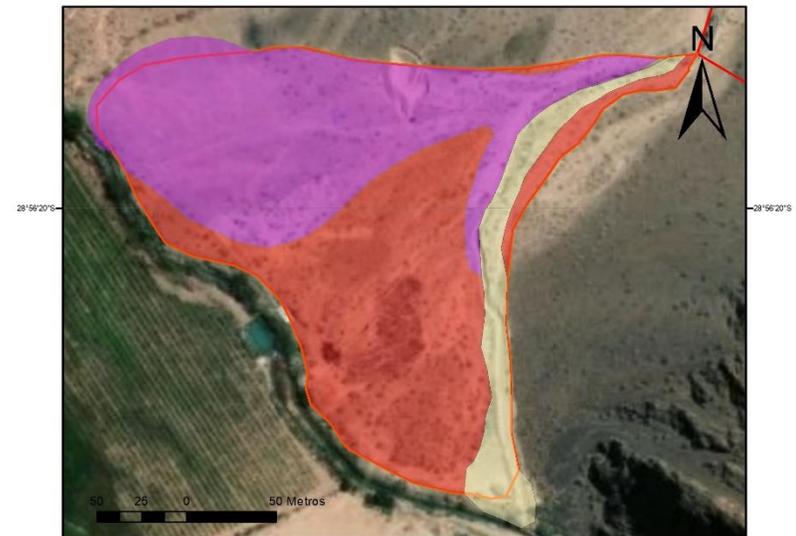


Zonificación de Temporalidad Relativa

- Intermedio
- Antiguo

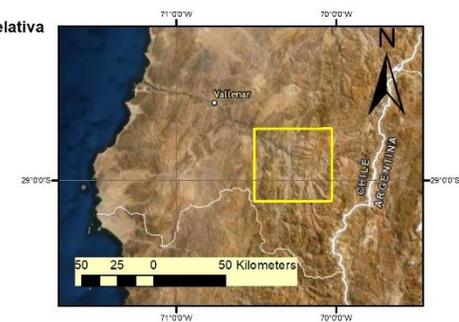


|Zonificación | Zona 3 | |ZN-3-02|



Zonificación de Temporalidad Relativa

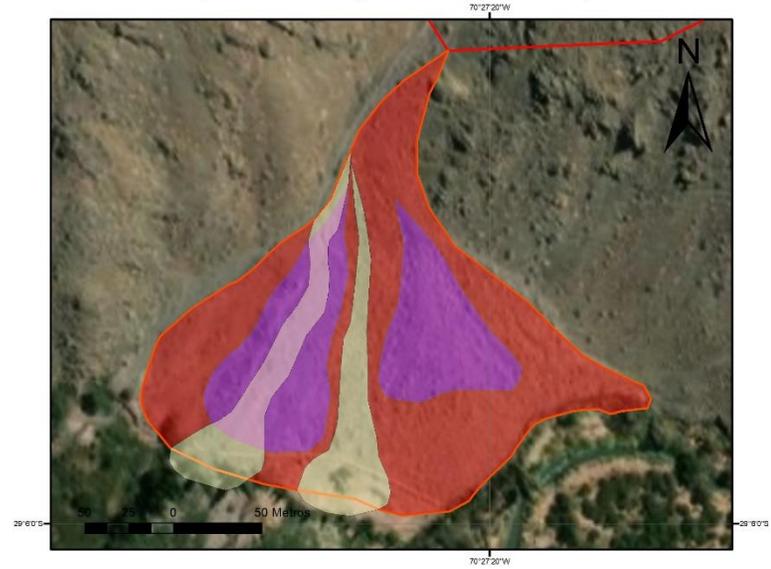
- Reciente
- Intermedio
- Antiguo



|Zonificación | Zona 3 | |ZN-3-03|

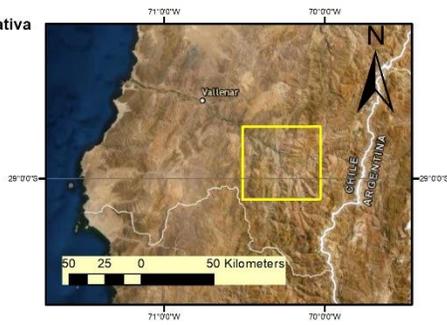


|Zonificación | Zona 3 | |ZN-3-04|



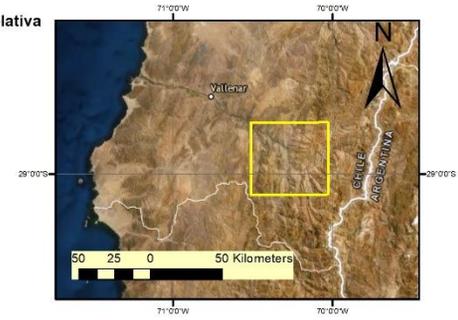
Zonificación de Temporalidad Relativa

- Intermedio
- Antiguo

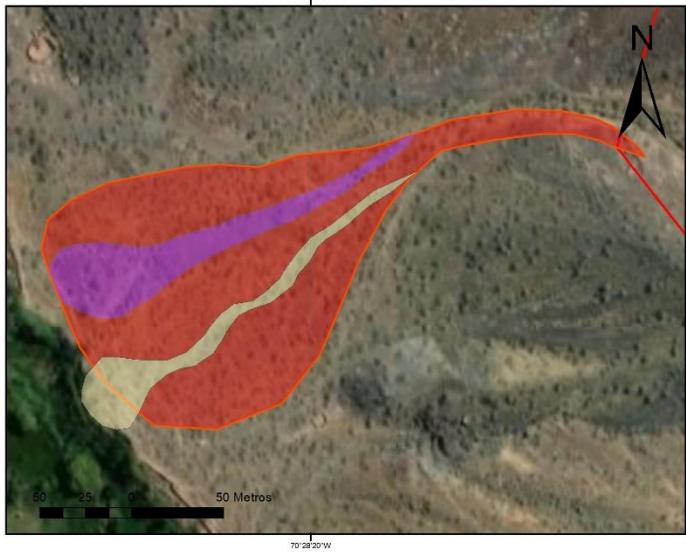


Zonificación de Temporalidad Relativa

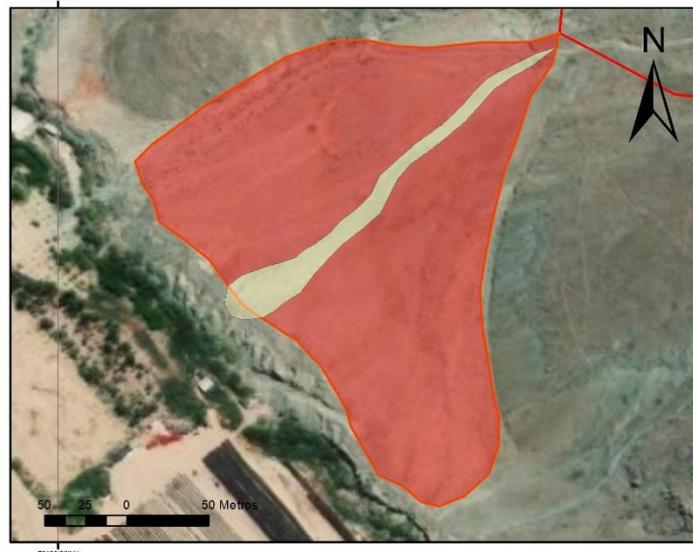
- Reciente
- Intermedio
- Antiguo



|Zonificación | Zona 3 | |ZN-3-05|

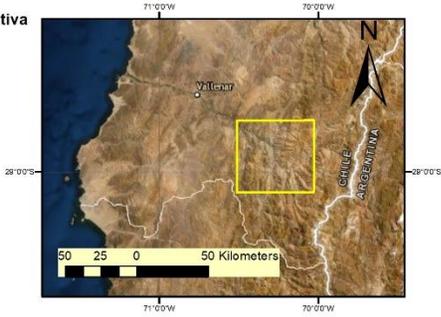


|Zonificación | Zona 3 | |ZN-3-06|



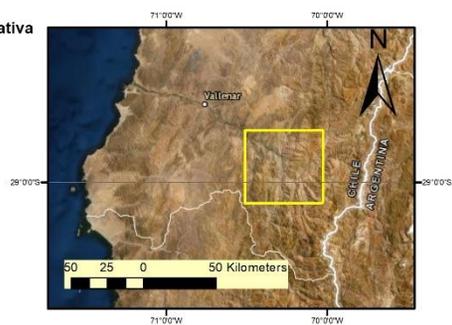
Zonificación de Temporalidad Relativa

- Reciente
- Intermedio
- Antiguo



Zonificación de Temporalidad Relativa

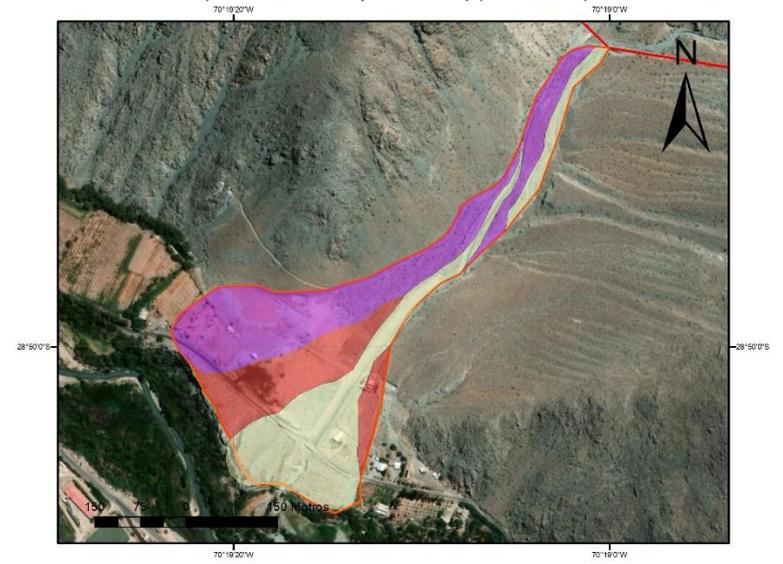
- Reciente
- Antiguo



|Zonificación | Zona 3 | |ZN-3-07|

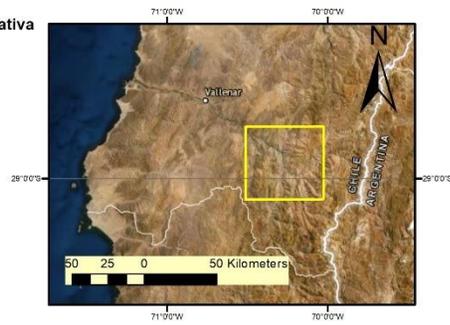


|Zonificación | Zona 3 | |ZN-3-08|



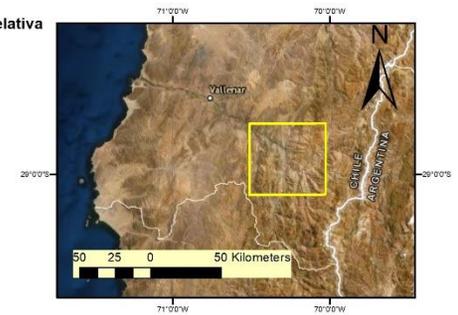
Zonificación de Temporalidad Relativa

- Reciente
- Antiguo

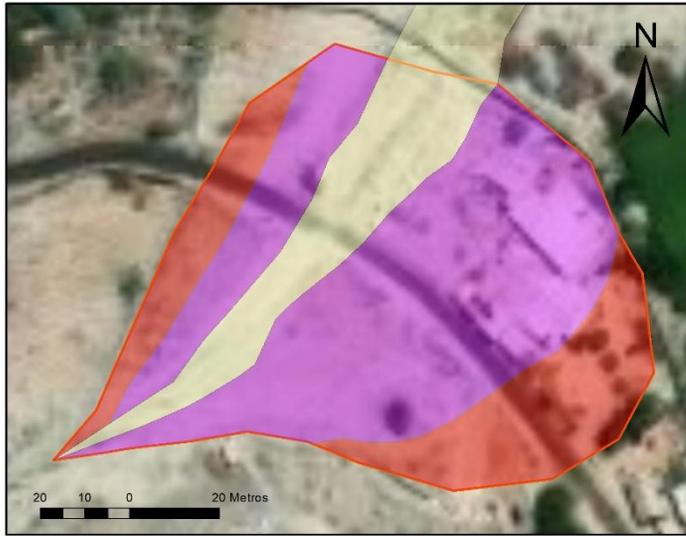


Zonificación de Temporalidad Relativa

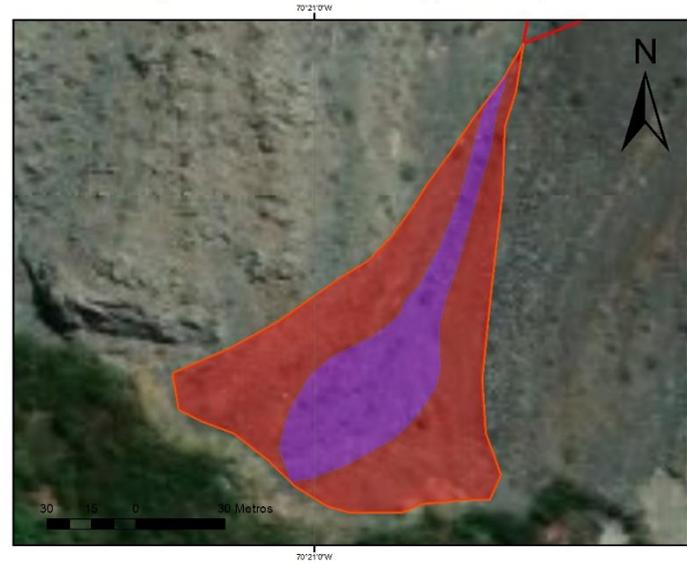
- Reciente
- Intermedio
- Antiguo



[Zonificación | Zona 3 | |ZN-3-09|]

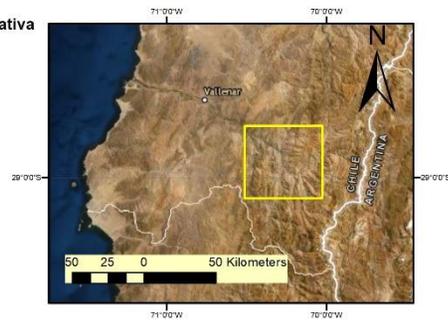


[Zonificación | Zona 3 | |ZN-3-10|]



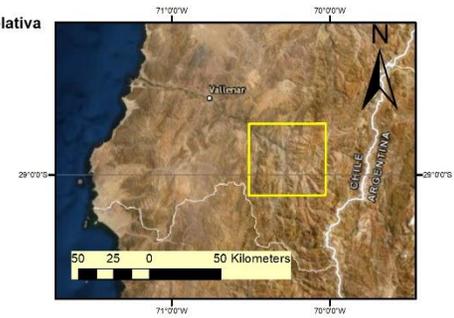
Zonificación de Temporalidad Relativa

- Reciente
- Intermedio
- Antiguo

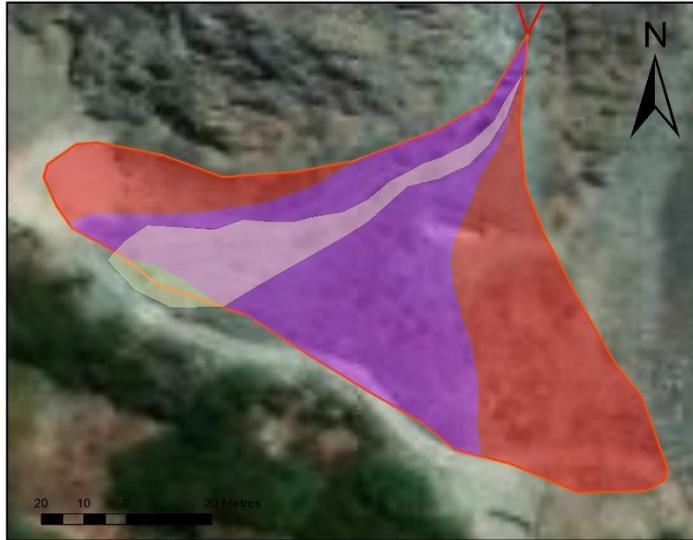


Zonificación de Temporalidad Relativa

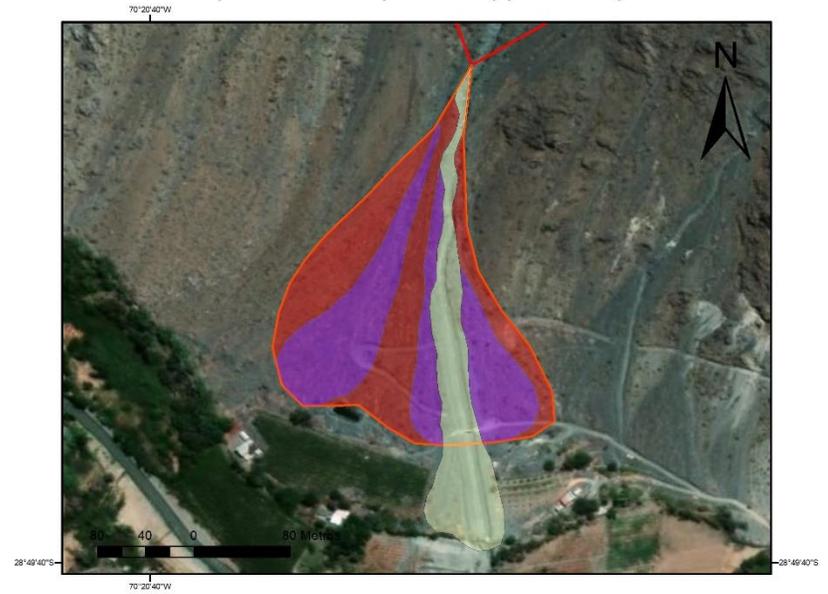
- Intermedio
- Antiguo



|Zonificación | Zona 3 | |ZN-3-11|

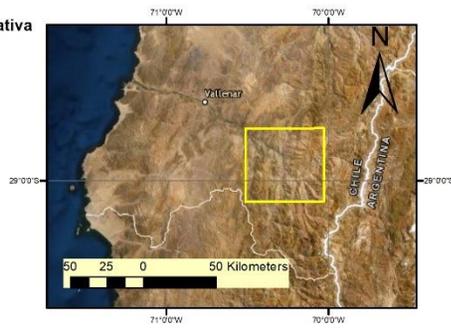


|Zonificación | Zona 3 | |ZN-3-12|



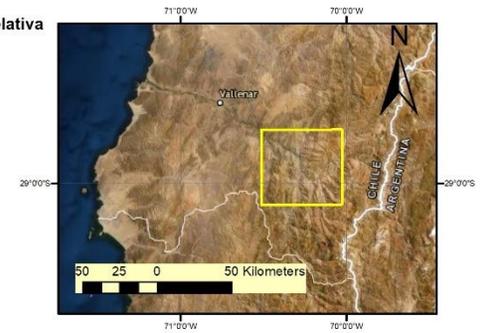
Zonificación de Temporalidad Relativa

- Reciente
- Intermedio
- Antiguo

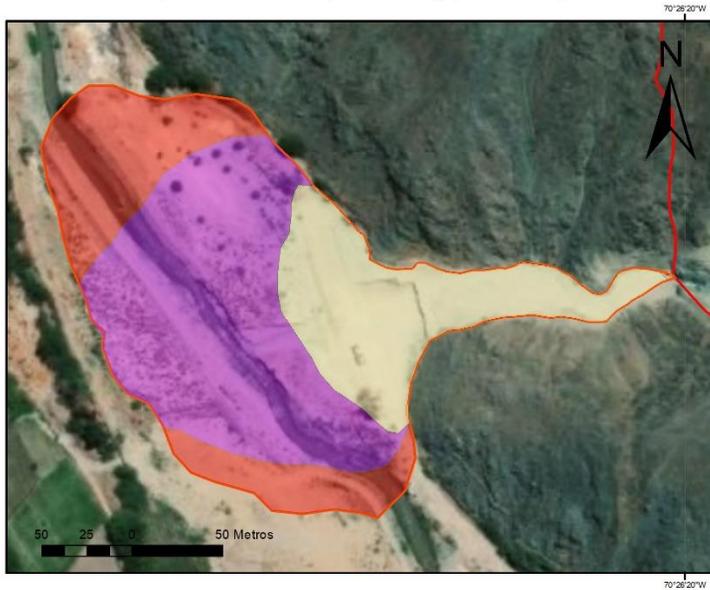


Zonificación de Temporalidad Relativa

- Reciente
- Intermedio
- Antiguo

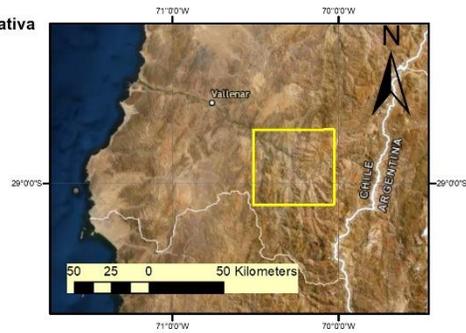


|Zonificación | Zona 3 | |ZN-3-13|



Zonificación de Temporalidad Relativa

- Reciente
- Intermedio
- Antiguo



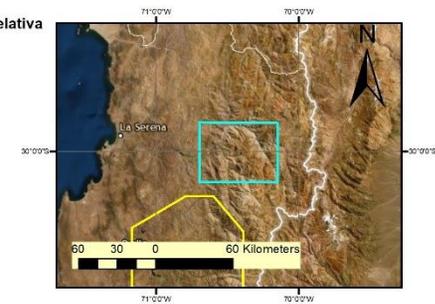
Anexo C-3: Zonificación de temporalidad relativa para abanicos de clasificación III.

|Zonificación | Zona 4 | |ZN-4-01|

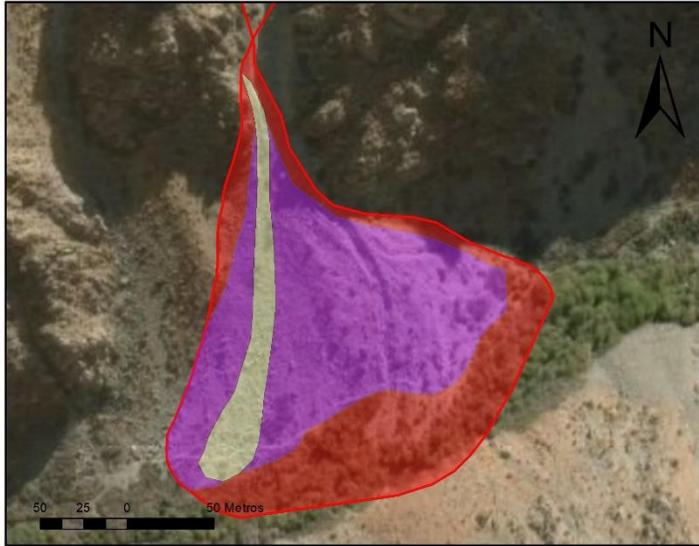


Zonificación de Temporalidad Relativa

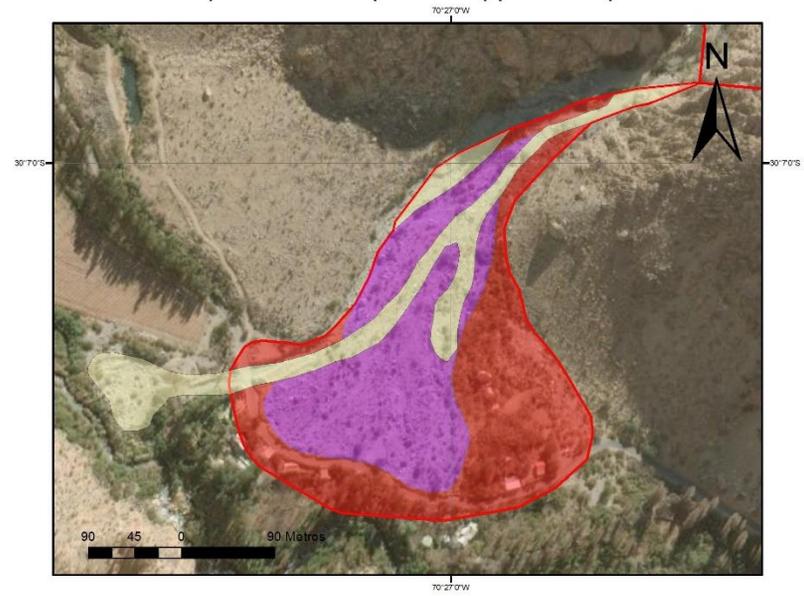
- Reciente
- Intermedio
- Antiguo



|Zonificación | Zona 4 | |ZN-4-02|

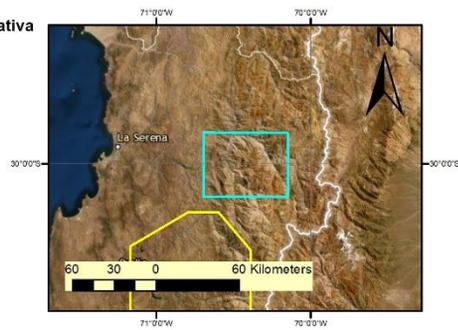


|Zonificación | Zona 4 | |ZN-4-03|



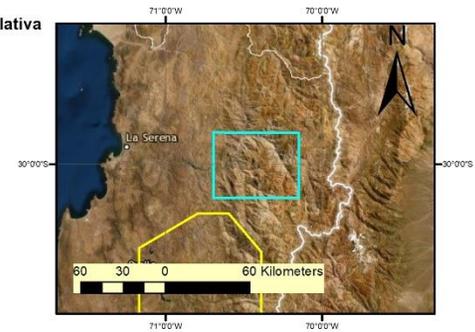
Zonificación de Temporalidad Relativa

- Reciente
- Intermedio
- Antiguo

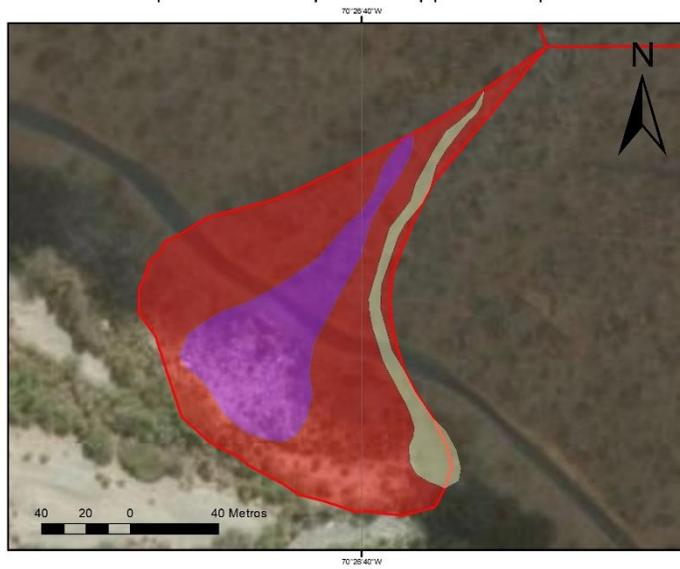


Zonificación de Temporalidad Relativa

- Reciente
- Intermedio
- Antiguo

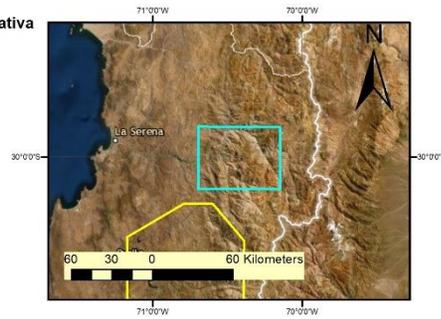


|Zonificación | Zona 4 | |ZN-4-04|

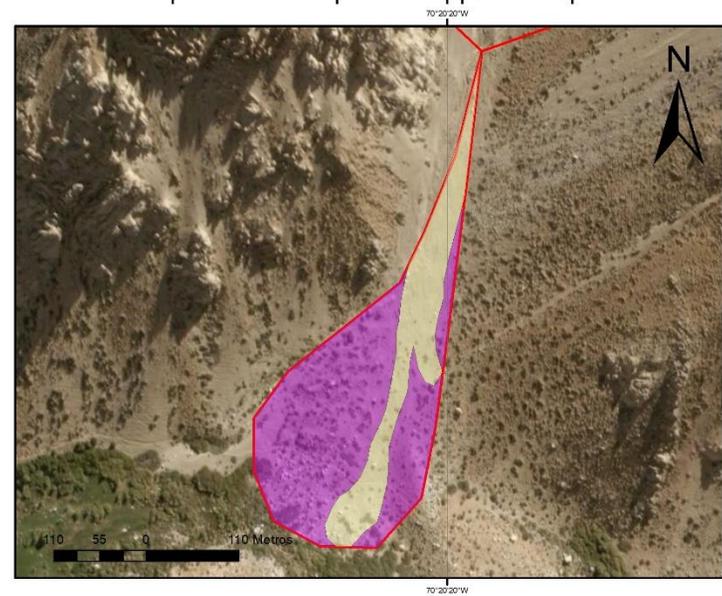


Zonificación de Temporalidad Relativa

- Reciente
- Intermedio
- Antiguo

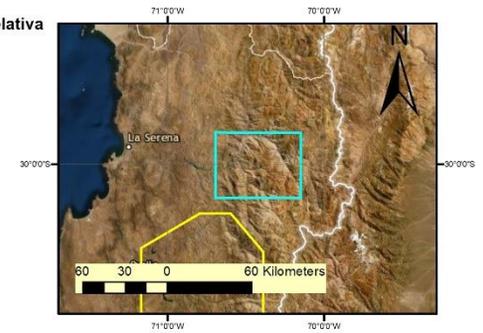


|Zonificación | Zona 4 | |ZN-4-05|

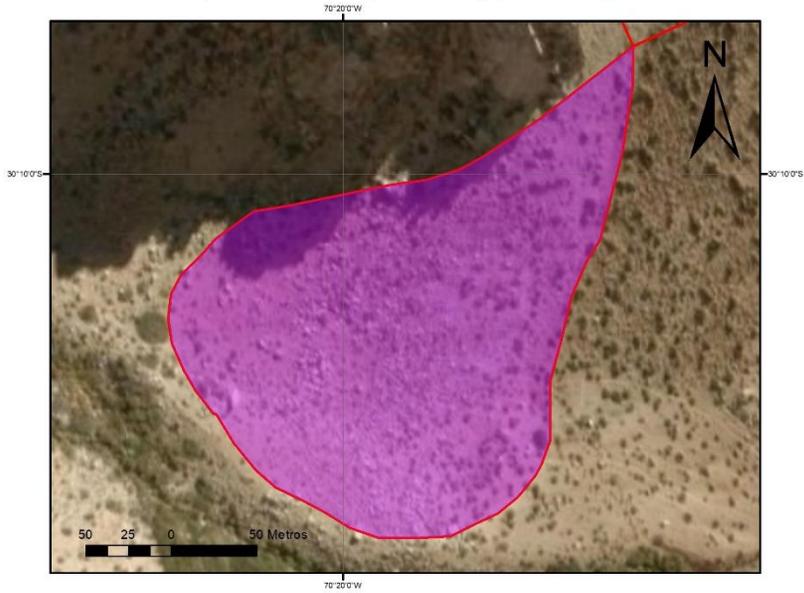


Zonificación de Temporalidad Relativa

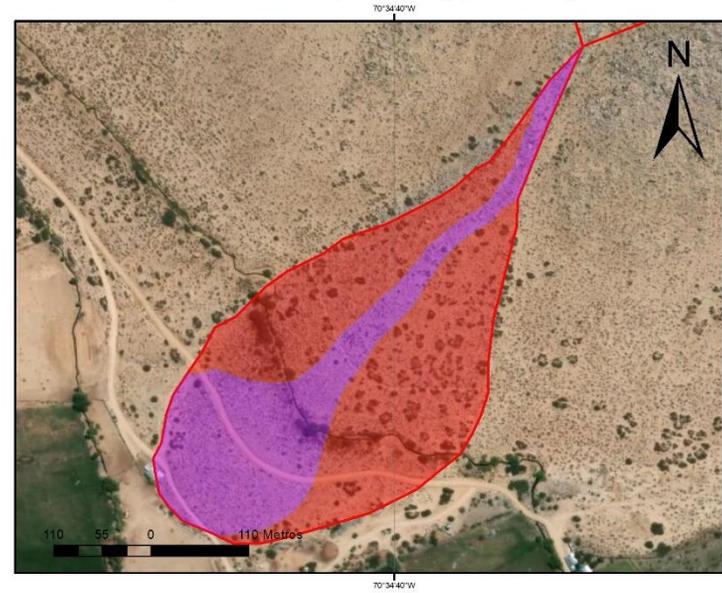
- Reciente
- Intermedio



|Zonificación | Zona 4 | |ZN-4-06|

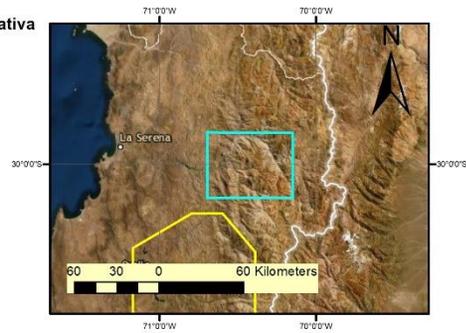


|Zonificación | Zona 4 | |ZN-4-07|



Zonificación de Temporalidad Relativa

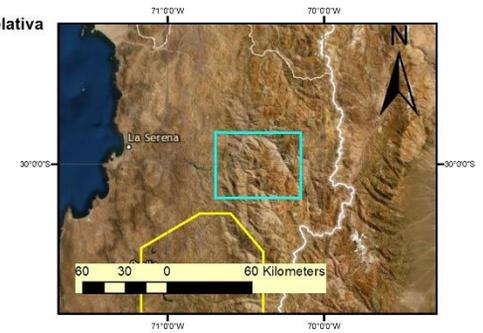
Intermedio



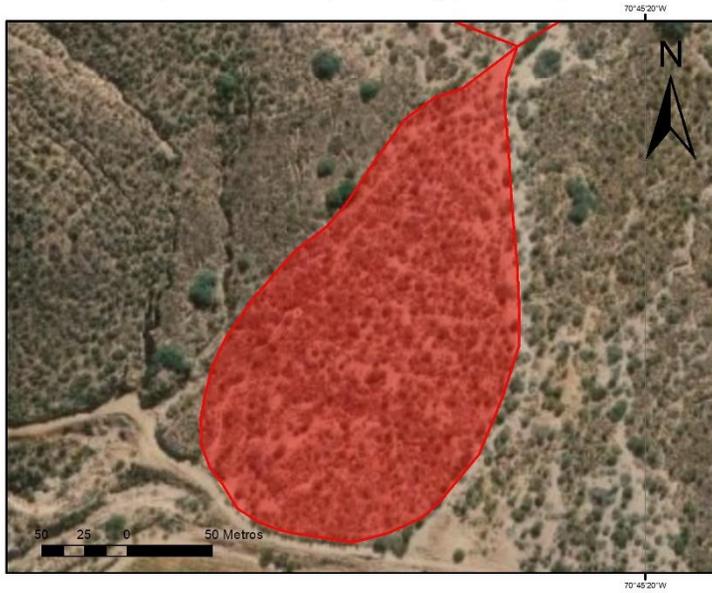
Zonificación de Temporalidad Relativa

Intermedio

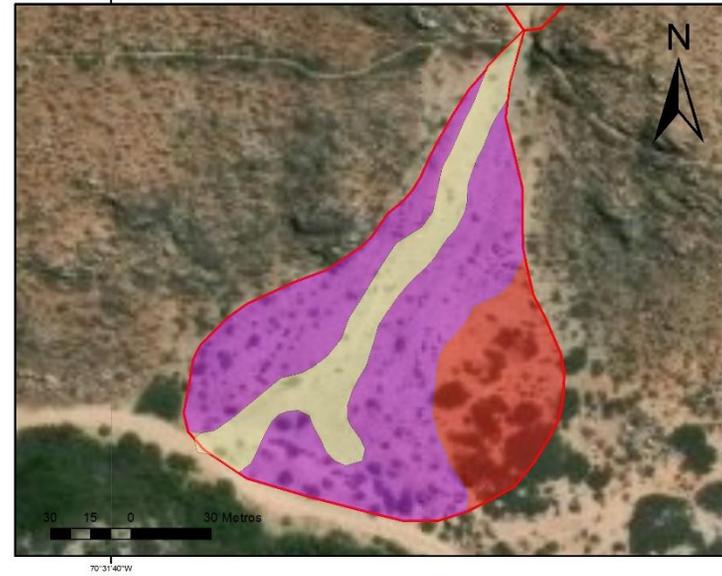
Antiguo



|Zonificación | Zona 5 | |ZN-5-01|

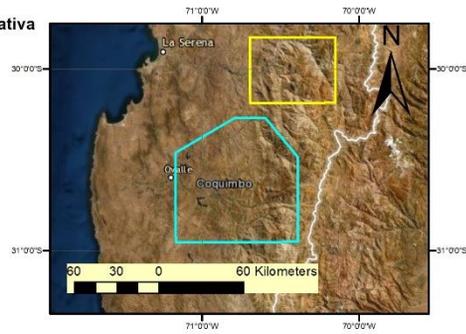


|Zonificación | Zona 5 | |ZN-5-02|



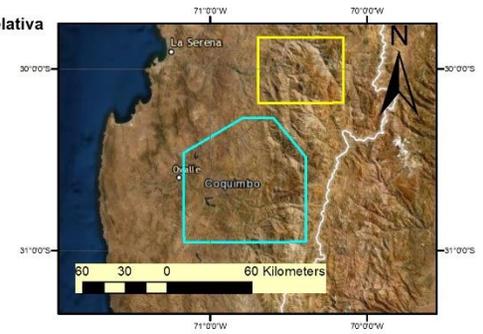
Zonificación de Temporalidad Relativa

Antiguo

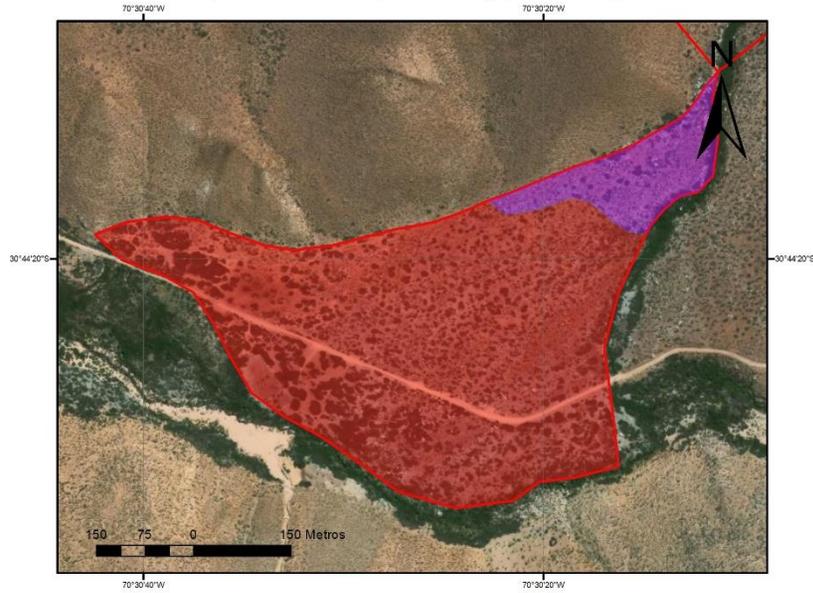


Zonificación de Temporalidad Relativa

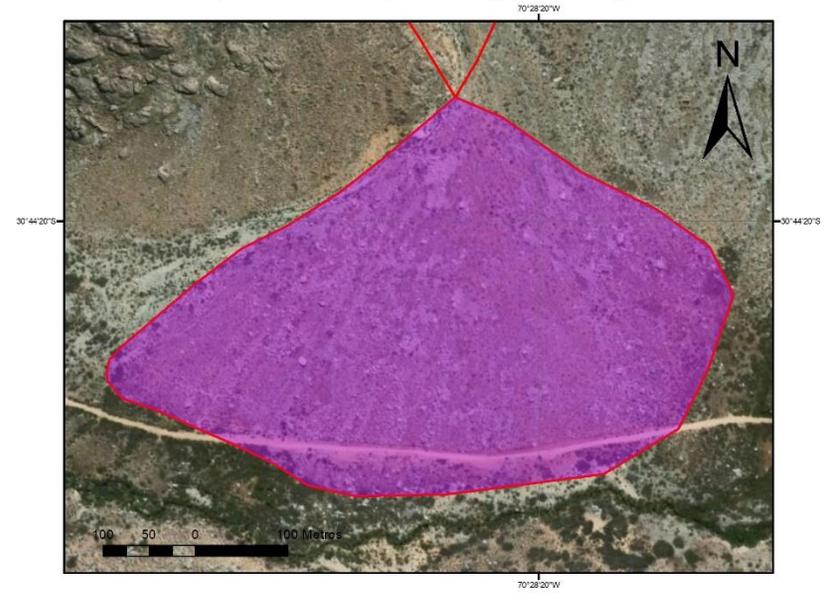
Reciente  
Intermedio  
Antiguo



|Zonificación | Zona 5 | |ZN-5-03|

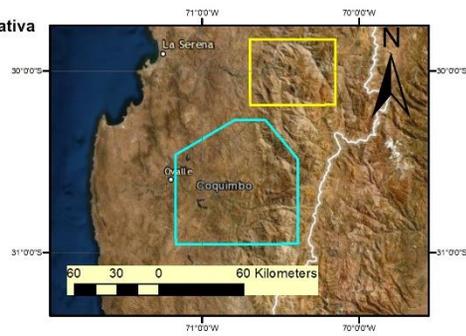


|Zonificación | Zona 5 | |ZN-5-04|



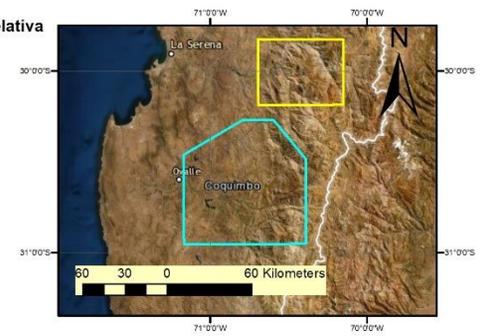
Zonificación de Temporalidad Relativa

- Intermedio
- Antiguo

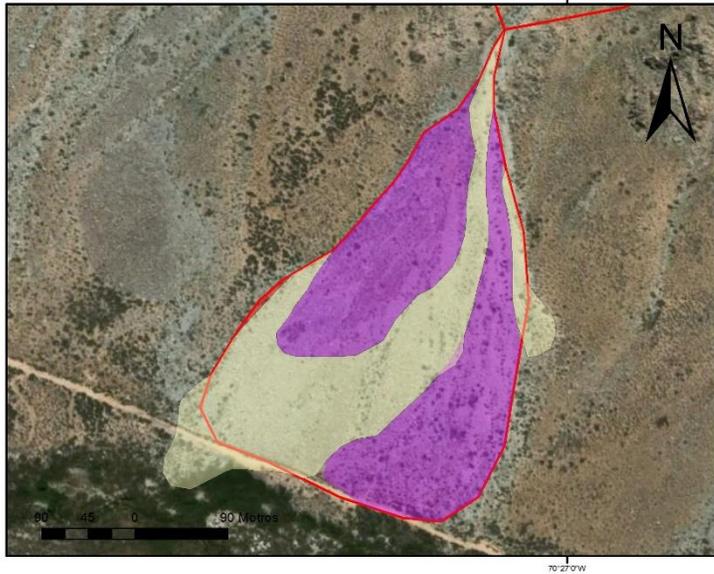


Zonificación de Temporalidad Relativa

- Intermedio

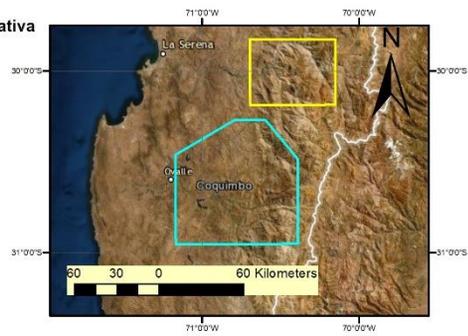


|Zonificación | Zona 5 | |ZN-5-05|



Zonificación de Temporalidad Relativa

-  Reciente
-  Intermedio
-  Antiguo



Anexo D: Tabla de datos de precipitación durante marzo de 2015 en cada una de las zonas de estudio

Anexo D-1: Tabla de precipitaciones durante marzo de 2015 en zona 1 de estudio.

*Tabla 9: Precipitaciones diarias para el mes de marzo de 2015 en la estación meteorológica de la localidad de Quillagua.*

Precipitaciones Estación Quillagua[02112008-1/DGA]		
Día	Precipitaciones [mm]	Acumulado
1	0,00	0,00
2	0,00	0,00
3	0,00	0,00
4	0,00	0,00
5	0,00	0,00
6	0,00	0,00
7	0,00	0,00
8	0,00	0,00
9	0,00	0,00
10	0,00	0,00
11	0,00	0,00
12	0,00	0,00
13	0,00	0,00
14	0,00	0,00
15	0,00	0,00
16	0,00	0,00
17	0,00	0,00
18	0,00	0,00
19	0,00	0,00
20	0,00	0,00
21	0,00	0,00
22	0,00	0,00
23	2,40	2,40
24	2,00	4,40
25	0,00	4,40
26	0,00	4,40
27	0,00	4,40
28	0,00	4,40
29	0,00	4,40
30	0,00	4,40
31	0,00	4,40

Tabla 10: Precipitaciones diarias para el mes de marzo de 2015 en la estación meteorológica de la localidad de Tocopilla.

Precipitaciones Estación Tocopilla[02112008-1/DGA]		
Día	Precipitaciones [mm]	Acumulado
1	0,00	0,00
2	0,00	0,00
3	0,00	0,00
4	0,00	0,00
5	0,00	0,00
6	0,00	0,00
7	0,00	0,00
8	0,00	0,00
9	0,00	0,00
10	0,00	0,00
11	0,00	0,00
12	0,00	0,00
13	0,00	0,00
14	0,00	0,00
15	0,00	0,00
16	0,00	0,00
17	0,00	0,00
18	0,00	0,00
19	0,00	0,00
20	0,00	0,00
21	0,00	0,00
22	0,00	0,00
23	0,50	0,50
24	10,50	11,00
25	0,00	11,00
26	0,00	11,00
27	0,00	11,00
28	0,00	11,00
29	0,00	11,00
30	0,00	11,00
31	0,00	11,00

Anexo D-2: Tabla de precipitaciones durante marzo de 2015 en zona 2 de estudio.

Tabla 11: Precipitaciones diarias para el mes de marzo de 2015 en la estación meteorológica de la localidad de Taltal.

Precipitaciones Estación Taltal [02943001-2/DGA]		
Día	Precipitaciones [mm]	Acumulado
1	0,00	0,00
2	0,00	0,00
3	0,00	0,00
4	0,00	0,00
5	0,00	0,00
6	0,00	0,00
7	0,00	0,00
8	0,00	0,00
9	0,00	0,00
10	0,00	0,00
11	0,00	0,00
12	0,00	0,00
13	0,00	0,00
14	0,00	0,00
15	0,00	0,00
16	0,00	0,00
17	0,00	0,00
18	0,00	0,00
19	0,00	0,00
20	0,00	0,00
21	0,00	0,00
22	0,00	0,00
23	0,00	0,00
24	30,00	30,00
25	0,00	30,00
26	0,00	30,00
27	0,00	30,00
28	0,00	30,00
29	0,00	30,00
30	0,00	30,00
31	0,00	30,00

Anexo D-3: Tabla de precipitaciones durante marzo de 2015 en zona 3 de estudio.

Tabla 12: Precipitaciones diarias para el mes de marzo de 2015 en la estación meteorológica de la localidad de Junta del Carmen.

Precipitaciones Estación Junta del Carmen[03804007-3/DGA]		
Día	Precipitaciones [mm]	Acumulado
1	0,00	0,00
2	0,00	0,00
3	0,00	0,00
4	0,00	0,00
5	0,00	0,00
6	0,00	0,00
7	0,00	0,00
8	0,00	0,00
9	0,00	0,00
10	0,00	0,00
11	0,00	0,00
12	0,00	0,00
13	0,00	0,00
14	0,00	0,00
15	0,00	0,00
16	0,00	0,00
17	0,00	0,00
18	0,00	0,00
19	0,00	0,00
20	0,00	0,00
21	0,00	0,00
22	0,00	0,00
23	6,00	6,00
24	25,00	31,00
25	20,00	51,00
26	0,00	51,00
27	0,00	51,00
28	0,00	51,00
29	0,00	51,00
30	0,00	51,00
31	0,00	51,00

Tabla 13: Precipitaciones diarias para el mes de marzo de 2015 en la estación meteorológica de la localidad de El Tránsito.

Precipitaciones Estación El Tránsito[03806002-3/DGA]		
Día	Precipitaciones [mm]	Acumulado
1	0,00	0,00
2	0,00	0,00
3	0,00	0,00
4	0,00	0,00
5	0,00	0,00
6	0,00	0,00
7	0,00	0,00
8	0,00	0,00
9	0,00	0,00
10	0,00	0,00
11	0,00	0,00
12	0,00	0,00
13	0,00	0,00
14	0,00	0,00
15	0,00	0,00
16	0,00	0,00
17	0,00	0,00
18	0,00	0,00
19	0,00	0,00
20	0,00	0,00
21	0,00	0,00
22	0,00	0,00
23	18,50	18,50
24	24,60	43,10
25	15,00	58,10
26	3,50	61,60
27	0,00	61,60
28	0,00	61,60
29	0,00	61,60
30	0,00	61,60
31	0,00	61,60

Anexo D-4: Tabla de precipitaciones durante marzo de 2015 en zona 3 de estudio.

Tabla 14: Precipitaciones diarias para el mes de marzo de 2015 en la estación meteorológica de la localidad de Rivadavia.

Precipitaciones Estación Rivadavia[04308003-2/DGA]		
Día	Precipitaciones [mm]	Acumulado
1	0,00	0,00
2	0,00	0,00
3	0,00	0,00
4	0,00	0,00
5	0,00	0,00
6	0,00	0,00
7	0,00	0,00
8	0,00	0,00
9	0,00	0,00
10	0,00	0,00
11	0,00	0,00
12	0,00	0,00
13	0,00	0,00
14	0,00	0,00
15	0,00	0,00
16	0,00	0,00
17	0,00	0,00
18	0,00	0,00
19	0,00	0,00
20	0,00	0,00
21	0,00	0,00
22	0,00	0,00
23	0,00	0,00
24	23,00	23,00
25	20,00	43,00
26	0,00	43,00
27	0,00	43,00
28	0,00	43,00
29	0,00	43,00
30	0,00	43,00
31	0,00	43,00

Tabla 15: Precipitaciones diarias para el mes de marzo de 2015 en la estación meteorológica de la localidad de Monte Grande.

Precipitaciones Estación Monte Grande[04314003-5/DGA]		
Día	Precipitaciones [mm]	Acumulado
1	0,00	0,00
2	0,00	0,00
3	0,00	0,00
4	0,00	0,00
5	0,00	0,00
6	0,00	0,00
7	0,00	0,00
8	0,00	0,00
9	0,00	0,00
10	0,00	0,00
11	0,00	0,00
12	0,00	0,00
13	0,00	0,00
14	0,00	0,00
15	0,00	0,00
16	0,00	0,00
17	0,00	0,00
18	0,00	0,00
19	0,00	0,00
20	0,00	0,00
21	0,00	0,00
22	0,00	0,00
23	1,50	1,50
24	25,80	27,30
25	18,50	45,80
26	0,00	45,80
27	0,00	45,80
28	0,00	45,80
29	0,00	45,80
30	0,00	45,80
31	0,00	45,80

Anexo D-5: Tabla de precipitaciones durante marzo de 2015 en zona 3 de estudio.

Tabla 16: Precipitaciones diarias para el mes de marzo de 2015 en la estación meteorológica de la localidad de Rapel.

Precipitaciones Estación Rapel[04522003-6/DGA]		
Día	Precipitaciones [mm]	
1	0,00	0,00
2	0,00	0,00
3	0,00	0,00
4	0,00	0,00
5	0,00	0,00
6	0,00	0,00
7	0,00	0,00
8	0,00	0,00
9	0,00	0,00
10	0,00	0,00
11	0,00	0,00
12	0,00	0,00
13	0,00	0,00
14	0,00	0,00
15	0,00	0,00
16	0,00	0,00
17	0,00	0,00
18	0,00	0,00
19	0,00	0,00
20	0,00	0,00
21	0,00	0,00
22	0,00	0,00
23	2,00	2,00
24	13,50	15,50
25	21,00	36,50
26	0,00	36,50
27	0,00	36,50
28	0,00	36,50
29	0,00	36,50
30	0,00	36,50
31	0,00	36,50

Tabla 17: Precipitaciones diarias para el mes de marzo de 2015 en la estación meteorológica de la localidad de Tulahuén.

Precipitaciones Estación Tulahuén[04513003-7/DGA]		
Día	Precipitaciones [mm]	Acumulado
1	0,00	0,00
2	0,00	0,00
3	0,00	0,00
4	0,00	0,00
5	0,00	0,00
6	0,00	0,00
7	0,00	0,00
8	0,00	0,00
9	0,00	0,00
10	0,00	0,00
11	0,00	0,00
12	0,00	0,00
13	0,00	0,00
14	0,00	0,00
15	0,00	0,00
16	0,00	0,00
17	0,00	0,00
18	0,00	0,00
19	0,00	0,00
20	0,00	0,00
21	0,00	0,00
22	0,00	0,00
23	17,50	17,50
24	23,50	41,00
25	14,00	55,00
26	4,00	59,00
27	0,00	59,00
28	0,00	59,00
29	0,00	59,00
30	0,00	59,00
31	0,00	59,00

## Anexo E: Geología detallada por región

### Anexo E-1: Geología predominante en la región de Tarapacá

Región	Dom. Geomorfológico	Nombre	Descripción Litológica	Código
Tarapacá	Planicies litorales y Cordillera de la Costa	Depósitos aluviales y coluviales	Depósitos aluviales, subordinadamente coluviales o lacustres con gravas, arenas y limos.	Qa
		Depósitos evaporíticos	Depósitos evaporíticos de sulfatos, cloruros, carbonatos y niveles detríticos finos, localmente con bórax y/o litio.	MQs
		Formación Altos de Pica	Secuencias sedimentarias continentales parálicas o aluviales con conglomerados, areniscas, lutitas, calizas y mantos de carbón.	OM1c
		Formación Suca y Formación Punta Barranco	Secuencia y complejos volcánicos continentales conformados por lavas y brechas basálticas a andesíticas, rocas piroclásticas de andesíticas a riolíticas y algunas intercalaciones sedimentarias.	Kia3
		Batolitos Punta Negra y Huara – Pozo Almonte	Granodioritas, dioritas, monzodioritas y granitos. También es posible encontrar pórfidos dacíticos. Esta unidad se extiende casi únicamente en la Región de Tarapacá y está acotada a la Cordillera de la Costa.	JKg
		Formación Caramara y Formación La Negra	Secuencias volcánicas continentales y marinas. Contiene lavas y agomerados basálticos a andesíticos, tobas riolíticas con intercalaciones de areniscas, calizas marinas y conglomerados continentales.	J3i
		Formación Los Tarros y Formación Chiza	Secuencias sedimentarias marinas litorales conformadas por calizas, areniscas, lutitas calcáreas, en parte bituminosas, con intercalaciones epiclásticas y niveles evaporíticos superiores.	Js1m

Depresión Central y Precordillera	Secuencias sedimentarias de piedemonte	Secuencias sedimentarias clásticas de piedemonte, aluviales, coluviales o fluviales formados por conglomerados, areniscas y limolitas.	MP1c
	Secuencias de abanicos aluviales	Secuencia sedimentaria de abanicos aluviales, piedemonte o fluviales conformado por gravas, arenas y limos con ignimbritas. Se encuentra asociado a la Formación Diablo y Formación Chucal.	M1c
	Ignimbritas Huasco, Maricnga y Vega	Secuencia piroclástica dacíticas a riolíticas asociadas a calderas de colapso.	M3t
	Formación Oxaya	Secuencias y centros volcánicos intermedios a ácidos, compuestos por lavas, brechas, domos y rocas piroclásticas andesíticas.	OM3
	Volcanes Larancagua y Miño	Centros volcánicos con lavas, domos y depósitos piroclásticos andesíticos y dacíticos, conos de piroclastos y lavas basálticas a andesítico-basálticas.	P3i
	Formación Guaviña	Secuencias sedimentarias continentales aluviales y lacustres conformadas por conglomerados, brechas, areniscas y limolitas rojas con intercalación de tobas riolíticas y lavas andesíticas.	Ks1c
	Formación Chacarilla	Secuencias sedimentarias continentales aluviales, fluviales y eólicas, en parte transicionales de areniscas, limolitas, lutitas y conglomerados rojos.	JK1c
	Formación Quipisca	Secuencias volcánicas continentales con tobas y brechas de andesíticas a riolíticas en intercalaciones con areniscas, conglomerados y calizas.	CP3

## Anexo E-2: Geología predominante en la región de Antofagasta

Región	Dom. Geomorfológico	Nombre	Descripción	Litología
Antofagasta	Cordillera de la Costa	Batolitos y plutones	Monzodioritas cuarcíferas, dioritas y granodioritas de biotita, piroxeno y hornblenda.	Jsg
		Plutones Flamenco y Caldera-Pajonales	Dioritas, gabros y monzodioritas de piroxeno, dioritas cuarcíferas y granodioritas y tonalitas de hornblenda y biotita.	Jig
		Formaciones Camaraca y La Negra	Unidad definida previamente.	J3i
	Depresión Central y Precordillera	Formación Lauca y Pastos Chicos	Unidad definida previamente.	MP1c
		Formación Chucal y Formación Altos de Pica	Unidad definida previamente.	M1c
		Complejos volcánicos ácidos	Secuencias y complejos volcánicos continentales ácidos conformados por domos, y rocas piroclásticas de dacíticas a riolíticas asociadas a calderas de colapso.	PE3a
		Formación Quebrada Mala	Secuencias volcanosedimentarias continentales conformadas por rocas epiclásticas y piroclásticas riolíticas, lavas andesíticas y traquíticas.	Ks2c
		Ignimbritas del Cerro Los Trigos	Secuencias y complejos volcánicos ácidos conformados por ignimbritas, domos e intrusivos dacíticos a riolíticos, asociados a calderas de colapso.	Ks3a
		Dioritas y monzodioritas	Dioritas y monzodioritas de piroxeno y hornblenda, granodioritas, monzogranitos de hornblenda y biotita. Se emplaza desde la precordillera hasta la Cordillera de la Costa, a este del Sistema de Fallas de Atacama.	Kiag
	Alta Cordillera	Ignimbritas Tuyajto y Cajón	Depósitos de flujo piroclástico localmente soldado.	Q3t
		Ignimbritas Puripican, Atana y Tucúcaro	Depósitos piroclásticos dacíticos a riolíticos parcialmente soldados.	P3t
		Depósitos asociados a Volcanes Copiapó y Wheelwright	Centros y secuencias volcánicas conformados por domos y depósitos piroclásticos de andecíticos a dacíticos con intercalaciones aluviales asociadas a depósitos epitermales de Au-Ag.	Ms3i

### Anexo E-3: Geología predominante en la región de Atacama

Región	Dom. Geomorfológico	Nombre	Descripción	Litología
Atacama	Cordillera de la Costa	Depósitos aluviales	Unidad definida previamente.	Qa
		Depósitos eólicos	Unidad definida previamente.	Qe
		Estratos de Caldera	Secuencias sedimentarias marinas litorales o fluviales estuarias conformadas coquinas, conglomerados dispuestos en niveles aterrizados emergidos.	Pl1m
		Dioritas y monzodioritas	Unidad definida previamente.	Kiag
		Monzodioritas y dioritas de piroxeno	Monzodiorita y dioritas de piroxeno, hornblenda y biotita, granodioritas y tonalitas.	Kibg
		Grupo Chañarillo	Secuencias sedimentarias marinas litorales conformada por calizas, calcarenitas, areniscas, margas y coquinas.	Ki1m
		Formación El Toco y Complejo Epimetamórfico Chañaral	Metaarenitas, filitas y, en menor proporción, mármoles, cherts, metabasaltos, metaconglomerados a partir de metaturbiditas con facies de 'melange'.	DC4
	Depresión Central	Depósitos aluviales	Unidad definida previamente.	Qa
		Gravas de Copiapó	Unidad definida previamente.	MP1c
		Gravas de Atacama	Unidad definida previamente.	M1c

Precordillera	Formación Chile-Alemania	Secuencias y complejos volcánicos continentales con lavas y domos de andesítico-basálticos a dacíticos con intercalaciones piroclásticas y epiclásticas.	PE3i
	Unidad Cerro Cabeza de	Monzodioritas de piroxeno y biotita, granodioritas y granitos de hornblenda y biotita con pórfidos dacíticos y riolíticos, asociados a mineralización tipo pórfido cuprífero y chimeneas de brecha.	Pag
	Formación Hornitos	Unidad definida previamente.	Ks2c
	Formación La Ternera	Secuencias volcánicas continentales y transicionales con lavas, domos, brechas de basálticos a riolíticos, con intercalaciones de areniscas y conglomerados.	TrJ3
	Unidad Cordillera de Domeyko	Granitos, granodioritas, tonalitas y dioritas de hornblenda y biotita, localmente de muscovita.	CPg
Alta Cordillera	Unidad Volcán Ojos del Salado	Estratovolcanes y complejos volcánicos con lavas basálticas a riolíticas, domos y depósitos piroclásticos andesítico-basálticos a dacíticos, principalmente calcoalcalinos.	Q3i
	Volcanes Peñas Blancas y Laguna Escondida	Centros volcánicos con lavas, domos y depósitos piroclásticos andesíticos a dacíticos, conos de piroclásticos y lavas basálticas a andesítico-basálticas.	P3i
	Unidad Volcán Wheelwright	Unidad definida previamente.	Ms3i

## Anexo E-4: Geología predominante en la región de Coquimbo

Región	Dom. Geomorfológico	Nombre	Descripción	Litología
Coquimbo	Cordillera de la Costa	Rocas Plutónicas	Monzodioritas y dioritas de piroxeno, hornblenda y biotita, granodioritas y tonalitas. Asociada al Sistema de Fallas de Atacama – El Romeral y mineralización de Fe.	Kibg
		Secuencias Volcánicas	Secuencias volcánicas con lavas de basálticas a riolíticas, domos, brechas y aglomerados andesíticos a dacíticos con intercalaciones clásticas continentales y marítimas. Representada en la zona por la Formación Arqueros.	JK3
		Batolito y plutones	Monzodioritas cuarcíferas, dioritas y granodioritas de biotita, piroxeno y hornblenda.	Jsg
		Rocas plutónicas	Granodioritas, monzogranitos, monzodioritas, dioritas y gabros de piroxeno y hornblenda; sienogranitos.	TrJg
	Precordillera	Rocas plutónicas	Granodioritas, tonalitas y dioritas cuarcíferas de hornblenda y biotita, dioritas y monzodioritas de piroxeno y biotita.	Eg
		Granitoides	Monzodioritas de piroxeno y biotita, granodioritas y monzogranitos de hornblenda y biotita, dioritas, gabros y pórfidos riolíticos y dacíticos.	PEg
		Secuencias volcánicas continentales	Lavas, domos y brechas basálticas a dacíticos con intercalaciones piroclásticas y epiclásticas. Formación Cerro Los Carneros.	Ks3i
		Secuencias volcanosedimentarias continentales	Rocas epiclásticas y piroclásticas riolíticas, lavas andesíticas y traquíticas. Formación Quebrada Seca.	Ks2c
		Secuencias sedimentarias continentales aluviales, fluviales y lacustres	Areniscas, conglomerados, limolitas, calcilitas y brechas sedimentarias con intercalación de tobas. Formaciones Pucalume y Viñita.	Kia1c

Alta Cordillera	Batolitos y plutones	Granodioritas, monzogranitos, tonalitas, dioritas de hornblenda y biotita. Plutón Río Las Cuevas.	Og
	Secuencias volcánicas continentales	Unidad definida previamente.	Ks3i
	Secuencias sedimentarias y volcánicas continentales	Rocas epiclásticas, piroclásticas y lavas andesíticas a riolíticas	Js2c
	Secuencias volcánicas continentales y complejos subvolcánicos	Tobas, brechas, lavas y domos riolíticos y dacíticos con intercalaciones de areniscas y conglomerados. Estratos de Guanaco Sonso.	PTr3
	Rocas plutónicas	Granitos, granodioritas, tonalitas y dioritas de hornblenda y biotita, localmente de muscovita. Batolito Elqui-Limarí.	CPg