



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

**ANÁLISIS DEL REGISTRO HISTÓRICO DE CATÁSTROFES
GEOLÓGICAS: EVALUACIÓN DEL PELIGRO REMOCIONES EN MASA
PARA TALTAL, REGIÓN DE ANTOFAGASTA**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGA

MAITE RAYEN ASUN MARINGER

PROFESOR GUÍA:
RODRIGO RAULD PLOTT

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
SOFÍA REBOLLEDO LEMUS
MARISOL LARA CASTILLO

SANTIAGO DE CHILE
2017

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA
OPTAR AL TITULO DE: Geóloga
POR: Maite Rayen Asun Maringer
FECHA: 23 de Mayo de 2017
PROFESOR GUÍA: Rodrigo Rauld

ANÁLISIS DEL REGISTRO HISTÓRICO DE CATÁSTROFES GEOLÓGICAS: EVALUACIÓN DEL PELIGRO REMOCIONES EN MASA PARA TALTAL, REGIÓN DE ANTOFAGASTA

Durante el 24, 25 y 26 de Marzo del 2015, un frente de mal tiempo desarrolló abundantes e intensas lluvias en las regiones de Coquimbo, Atacama y Antofagasta, siendo Taltal una de las ciudades afectadas por los aluviones que se generaron durante este evento climático. El presente trabajo pretende mostrar que la historia de las catástrofes o de los daños que han afectado la zona urbana de Taltal, debido a procesos de remociones en masa, puede ser usada como herramienta elemental para elaborar una evaluación y una zonificación de peligro de la zona urbana actual.

Para realizar la evaluación de peligro se estudiaron las cuencas aportantes a distintas escalas según su magnitud y morfología. En una primera instancia, se elaboró un catastro de eventos de remociones en masa, inundaciones, sismos y maremotos con daños en la zona urbana de Taltal, que permitió reconocer los procesos más recurrentes que han ocurrido en la ciudad, estimar su frecuencia y en algunos casos, determinar su alcance y distribución espacial. Luego, se evaluó la susceptibilidad a escala local e intermedia, considerando la caracterización de los factores condicionantes en el área de estudio y la superposición de los mismos en un mapa. Por último, se evaluó el peligro a partir la elaboración de un mapa de frecuencia para el área de estudio, utilizando la recharacterización de los eventos del catastro, mediante sus descripciones y su contextualización en la ciudad.

Como resultado de este estudio se reconoció dos procesos generadores de daños en la ciudad de Taltal: caídas y flujos o inundaciones, que son principalmente desencadenados por precipitaciones. También se estimaron los distintos efectos de estos procesos según la intensidad y el área de influencia de las precipitaciones, asociándolos a un grado de intensidad de daños y a una estimación del período de retorno. Además, se observó una correlación de las fechas de los eventos con la Oscilación de El Niño y la Oscilación Decadal del Pacífico, que valida los períodos estimados.

DEDICATORIA

"En la persecución del saber, todos los días se adquiere algo.

En la persecución del Tao, todos los días se deja ir algo".

– Lao Tsé (Capítulo 48, Lao Te Ching)

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar quisiera agradecer a mi abuela, por estar ahí siempre detrás, pendiente y constante. Igualmente a mi madre, que siempre intuye cuándo la necesito.

Agradezco a mi familia, que por tanto tiempo me ha apoyado, alentado y sostenido para seguir avanzando, especialmente la Tante Milla, pero también a mis tíos: Mirentxu, Denise y Alberto. También a mi hermana y a mis primos: Gabriela, Paula, Danae y Sebastián.

Agradezco también a mis amigos del rol, por las jornadas llenas de risas constantes, por el espacio de honestidad, diversión, desahogo y compañerismo. Especialmente a Krause, Lanas, Chris y Sepu, por todo el camino recorrido desde que entramos a Beauchef.

Agradezco a mis amigos de la vida, algunos están muy presentes y otros han separado sus caminos, pero están siempre en mi corazón: Maku, Mauro, Pola y Felipe, Nicole, Pame y Claudia.

Agradezco todas las oportunidades de trabajo y sostenimientos económicos que he tenido a lo largo de la carrera: de mi abuelo, de mi abuela, de la tante, de mis tíos, de mi padrino Eric, de Rosa Leal en la biblioteca, de Alfonso Rubilar en las ayudantías y la práctica, de Katja Deckart en las ayudantías, de Luisa Pinto en el laboratorio y de Xterrae durante la elaboración de esta memoria.

Agradezco también a los profesores, que de una u otra manera me influyeron para convertirme en una mejor geóloga y una mejor persona: Fernando Lema, Laura Gallardo, Alfonso Rubilar, Luisa Pinto, Katja Deckart, Diego Morata, Brian Townley y especialmente Rodrigo Rauld, mi profesor guía.

Agradezco a todas aquellas personas que me han acompañado en la parte más álgida de este proceso. Ya que ha sido una etapa de transición muy importante, dejando atrás las inseguridades y convirtiéndome en la persona que siempre he querido ser. Gracias a Blanca Baccola, Sepu, Reymi, al equipo de Xterrae Geología (Kathy, Vicente, Felipe y Vale) y al Uli, mi ayudante de terreno.

Por último, pero igualmente importante, quiero agradecer a mi comisión evaluadora, conformada por Marisol Lara y Sofía Rebolledo, que han estado constantemente pendientes de mis avances.

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Planteamiento del Problema.....	2
1.2. Objetivos.....	3
1.2.1. OBJETIVO GENERAL	3
1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	3
1.3. Metodología propuesta	3
1.4. Área de Estudio.....	5
1.5. Antecedentes Bibliográficos	7
1.5.1. TRABAJOS ANTERIORES EN EL ÁREA	7
1.5.2. ANTECEDENTES SOBRE EL USO DEL REGISTRO HISTÓRICO PARA EVALUACIONES DE PELIGRO.....	8
1.5.3. MARCO TEÓRICO	11
2. CONTEXTO.....	14
2.1. Contexto Tectónico	14
2.1.1. SISMICIDAD.....	15
2.1.2. VOLCANISMO LOCAL	17
2.2. Contexto Climático	19
2.2.1. CLIMA REGIONAL.....	19
2.2.2. VARIACIONES INTERANUALES	21
2.2.2.1. El Niño Oscilación del Sur (ENOS).....	22
2.3. Geomorfología de la Cuenca	25
2.4. Marco Geológico y Estructural de la Cuenca	27
2.4.1. UNIDADES ESTRATIFICADAS.....	27
UNIDADES PALEOZOICAS	27
UNIDADES TRIÁSICAS	29
UNIDADES JURÁSICAS.....	29
UNIDADES CRETÁICAS	29
UNIDADES PALEÓGENAS.....	30
UNIDADES MIOCENAS	30
UNIDADES MODERNAS	30
2.4.2. ESTRUCTURAS	30
SISTEMA DE FALLAS DE DOMEYKO.....	31

SISTEMA DE FALLAS DE ATACAMA	32
ESCARPE COSTERO	34
2.5. Marco Geológico y Geomorfológico del Área Urbana	34
2.5.1. UNIDADES PALEOZOICAS	37
2.5.2. UNIDADES JURÁSICAS	37
2.5.3. UNIDADES CRETÁICAS	43
2.5.4. DEPÓSITOS MIOCENOS	43
2.5.5. DEPÓSITOS CUATERNARIOS	45
2.6. Historia de Taltal.....	52
3. DESARROLLO Y ANÁLISIS DEL CATASTRO	55
3.1. Criterios para la Elaboración del Catastro	55
3.2. Clasificación por Intensidades.....	59
3.3. Inventario y Zonificación de los Eventos	64
3.4. Estimación del Período de Retorno	67
3.4.1. PERÍODOS DE RETORNO POR INTENSIDAD	69
4. EVALUACIÓN DE SUSCEPTIBILIDAD Y DE PELIGRO.....	73
4.1. Escalas de Trabajo	73
4.2. Procesos reconocidos.....	74
4.3. Mapas Base.....	76
4.3.1. FOTOS AÉREAS.....	77
4.3.2. CAMPAÑA DE TERRENO.....	79
4.4. Evaluación de Susceptibilidad	80
4.4.1. METODOLOGÍA	80
4.4.2. ÍNDICES Y PESOS ASIGNADOS	82
4.4.2.1. Geología.....	83
4.4.2.2. Pendiente.....	85
4.4.2.3. Elevación	85
4.4.2.4. Distancia a las fallas	86
4.4.2.5. Zonas potenciales.....	86
4.4.2.6. Pesos.....	89
4.5. Mapas de Susceptibilidad	90
4.5.1. CAÍDAS DE ROCAS, DETRITOS Y TIERRA.	90

4.5.2.	INUNDACIONES Y FLUJOS A ESCALA LOCAL	93
4.5.3.	INUNDACIONES Y FLUJOS A ESCALA REGIONAL	96
4.6.	Evaluación de Peligro	98
4.6.1.	EVALUACIÓN DE FRECUENCIA	98
4.6.2.	ELABORACIÓN DE MAPAS DE PELIGRO	102
4.7.	Mapas de Peligro	103
4.7.1.	CAÍDAS DE ROCA, DETRITOS Y TIERRA	103
4.7.2.	INUNDACIONES Y FLUJOS A ESCALA LOCAL	106
4.7.3.	INUNDACIONES Y FLUJOS A ESCALA REGIONAL	110
5.	DISCUSIONES	113
5.1.	Elaboración y Evaluación del Catastro	113
5.1.1.	RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN Y FUENTES	113
5.1.2.	PROCESOS RECONOCIDOS.....	116
5.1.3.	INCERTIDUMBRE EN LA ZONIFICACIÓN	116
5.1.4.	VALORACIÓN DE LOS PERÍODOS DE RETORNO	118
5.2.	Evaluación de Susceptibilidad y Peligro	120
5.2.1.	ADAPTACIÓN DE LA METODOLOGÍA	120
5.2.2.	ELECCIÓN DE ESCALAS	121
5.2.3.	ESTUDIO DE RIESGO ANTERIOR	122
6.	CONCLUSIONES.....	123
	BIBLIOGRAFÍA	126
	ANEXOS	1
	Índice de Ilustraciones y Tablas Incluidas en los Anexos	1
	A. Anexo A: Catastro	4
	B. Anexo B: Períodos de Retorno.....	19
	C. Anexo C: Terreno.....	23
	D. Anexo D: Estimación de Certeza	24
	E. Anexo E: Clasificación de Intensidades.....	29
	F. Anexo F: Eventos Históricos	33
	G. Anexo G: Marco Geológico Regional.....	39
	H. Anexo H: Ajuste Metodológico	52

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.4-1: Fracturas registradas en la Falla Taltal después del terremoto de 1966.	34
Tabla 3.1-1: Bibliografía consultada en catastro de sismos y tsunamis.	56
Tabla 3.1-2: Bibliografía consultada en catastro de eventos meteorológicos.	57
Tabla 3.2-1: Intensidades para clasificar inundaciones y flujos.	59
Tabla 3.2-2: Ejemplos de clasificación según la intensidad.	60
Tabla 3.2-3: Definición de intensidad para remociones en masa.	61
Tabla 3.2-4: Definición de intensidades para tsunamis y terremotos con respecto a la escala de Sieberg y de Mercalli.	62
Tabla 3.3-1: Ejemplos de descripciones vagas de caídas de roca en terremotos.	66
Tabla 3.4-1: Resumen Períodos de Retorno para el registro de precipitaciones.	68
Tabla 3.4-2: Resumen Períodos de Retorno para intensidades estimadas.	70
Tabla 4.1-1: Escalas de trabajo.	74
Tabla 4.2-1: Clasificación de Remociones en Masa de Cruden & Varnes, 1996.	75
Tabla 4.4-1: Pesos e índices de peligro utilizados por Chau <i>et al.</i> , (2004).	81
Tabla 4.4-2: Asignación de los índices de peligro de unidades geológicas para caídas.	83
Tabla 4.4-3: Asignación de los índices de peligro de las unidades geológicas para inundaciones y flujos a escala local.	84
Tabla 4.4-4: Asignación de los índices de peligro de las unidades geológicas para inundaciones y flujos a escala regional.	84
Tabla 4.4-5: Asignación de los índices de peligro para pendientes.	85
Tabla 4.4-6: Asignación de los índices de peligro para elevaciones.	86
Tabla 4.4-7: Asignación de los índices de peligro para distancia a las fallas.	86
Tabla 4.4-8: Asignación de los índices de peligro para zonas potenciales.	87
Tabla 4.4-9: Pesos asignados para mapas de susceptibilidad.	89
Tabla 4.5-1: Categorías de susceptibilidad.	90
Tabla 4.6-1: Valor numérico de la Intensidad.	98

Tabla 4.6-2: Visualización de la suma de la frecuencia acumulada.	99
Tabla 4.6-3: Pesos utilizados para elaboración del mapa de peligro.....	102
Tabla 4.7-1: Categorías de peligro.	103

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1.3-1: Esquema de la Metodología.	4
Ilustración 1.4-1: Cuenca de la Quebrada Taltal.	5
Ilustración 1.4-2: Delimitación del área urbana de Taltal.	6
Ilustración 1.5-1: Mapa Geológico de la Cuenca de la Quebrada Taltal.	7
Ilustración 1.5-2: Evaluación de peligro orientada al área potencialmente afectada.....	9
Ilustración 1.5-3: Esquema de la metodología para estudios de riesgo.	11
Ilustración 2.1-1: Terremotos históricos con magnitud mayor a 7.2.	14
Ilustración 2.1-2: Perfil esquemático de la sismicidad en el margen Chileno.....	15
Ilustración 2.1-3: Sismos registrados por la red sismológica mundial.	16
Ilustración 2.1-4: Peligro volcánico de la comuna de Taltal.	18
Ilustración 2.2-1: Carta de Superficie con condiciones climáticas normales	20
Ilustración 2.2-2: Ocurrencia de ENOS y ODP en Antofagasta durante el siglo XX.	22
Ilustración 2.2-3: Comparaciones entre ENOS y ODP en Antofagasta (norte de Chile) y Tacna (sur de Perú).	23
Ilustración 2.3-1: Principales rasgos morfológicos presentes en la cuenca de la Quebrada Taltal.	26
Ilustración 2.4-1: Unidades geológicas en la cuenca de la Quebrada Taltal.....	28
Ilustración 2.4-2: Mapas estructurales esquemáticos.	31
Ilustración 2.4-3: Fracturas en la zona del Aeropuerto Las Breas.	33
Ilustración 2.5-1: Mapa geológico de escala intermedia.	35
Ilustración 2.5-2: Mapa geológico de Taltal a escala local.	36
Ilustración 2.5-3: Vista al S dentro de la Quebrada Changos.	38

Ilustración 2.5-4: Vista al E de la ladera SW de Taltal.	38
Ilustración 2.5-5: Vista al S de la ladera al SW de Taltal.....	39
Ilustración 2.5-6: Vista al SE de la desembocadura de la Quebrada Puntilla.	40
Ilustración 2.5-7: Vista al NE de la ladera NE de Taltal.	41
Ilustración 2.5-8: Vista al S de la desembocadura de la Qda. San Ramón.	42
Ilustración 2.5-9: Vista al SE del contacto entre el intrusivo y la Formación La Negra.....	43
Ilustración 2.5-10: Vista al SW de la Quebrada Taltal.....	44
Ilustración 2.5-11: Vista al N de la quebrada El Hueso.	45
Ilustración 2.5-12: Vista al SE nivel aterrazado de la quebrada principal.	47
Ilustración 2.5-13: Vista al NE nivel aterrazado de la quebrada principal.	47
Ilustración 2.5-14: Depósitos proximales en la ladera SW de Taltal.....	48
Ilustración 2.5-15: Vista hacia el NW de pique en calle Riquelme.....	48
Ilustración 2.5-16: Vista al NE niveles de terrazas marinas.	50
Ilustración 2.5-17: Esquema de los niveles de terrazas marinas.	51
Ilustración 2.6-1: Carta del Puerto de Taltal en 1854.	52
Ilustración 2.6-2: Carta del Puerto de Taltal en 1903.	53
Ilustración 2.6-3: Plano Catastral de Taltal de 1907.....	54
Ilustración 3.2-1: Representación temporal de los eventos meteorológicos y sus intensidades.	63
Ilustración 3.2-2: Representación temporal de las intensidades de los terremotos y tsunamis.	63
Ilustración 3.3-1: Mapa Inventario del Terremoto de 1936.	65
Ilustración 3.3-2: Mapa Inventario del aluvión de 1927.....	65
Ilustración 3.3-3: Ejemplos zonificación de eventos.	66
Ilustración 3.4-1: Distribución de probabilidad de precipitaciones en Taltal.	68
Ilustración 3.4-2: Distribución de probabilidad de precipitaciones en Aguas Verdes.....	69
Ilustración 3.4-3: Comparación de Intensidades con índices ENOS y ODP.	71
Ilustración 3.4-4: Distribución de probabilidad para sismos mayores a magnitud 4.	72
Ilustración 4.1-1: Visualización de las escalas de trabajo.	73
Ilustración 4.3-1: Foto SAF (1997) y mapeo con estereoscopio.	78
Ilustración 4.3-2: Foto HYCON (1956) y mapeo con estereoscopio.....	79

Ilustración 4.3-3: Recorrido y puntos de control visitados en terreno.	80
Ilustración 4.4-1: Zonas Potenciales identificadas para cada proceso.	88
Ilustración 4.5-1: Variaciones de la susceptibilidad de caídas para distintos pesos.	91
Ilustración 4.5-2: Mapa susceptibilidad de caídas.	92
Ilustración 4.5-3: Variaciones de la susceptibilidad de inundaciones y flujos locales para distintos pesos.	94
Ilustración 4.5-4: Mapa susceptibilidad de inundaciones y flujos locales.	95
Ilustración 4.5-5: Combinación DI para inundaciones y flujos regionales.	96
Ilustración 4.5-6: Mapa susceptibilidad de inundaciones y flujos regionales.	97
Ilustración 4.6-1: Planos de frecuencia para cada Intensidad.	100
Ilustración 4.6-2: Planos de frecuencia acumulada.....	101
Ilustración 4.7-1: Variaciones al mapa de peligro de caídas.	104
Ilustración 4.7-2: Mapa de peligro de caídas.	105
Ilustración 4.7-3: Vista hacia el N de rodados del escarpe cortero, en el sector de Playa Las Palmeras.	106
Ilustración 4.7-4: Mapa de peligro de inundaciones y flujos locales.	108
Ilustración 4.7-5: Variaciones al mapa de peligro de inundaciones y flujos locales.	109
Ilustración 4.7-6: Mapa de peligro para inundaciones y flujos regionales.	111
Ilustración 4.7-7: Variaciones del mapa de peligro para inundaciones y flujos regionales.	112

1. INTRODUCCIÓN

Durante el 24, 25 y 26 de Marzo del 2015, un frente de mal tiempo generó abundantes e intensas lluvias en las regiones de Coquimbo, Atacama y Antofagasta. Dando origen, el día 25, a flujos de detritos, de barro e inundaciones en las cuencas de las quebradas Las Rocas y Taltal (Antofagasta), los ríos Salado, Copiapó y Tránsito (Atacama), y el río Elqui (Coquimbo) (ONEMI, 2015). El gran aporte de agua (64 mm de precipitación máxima acumulada, en la estación de Pastillo, DGA) (ONEMI, 2015) fue drenado a través de los cauces, quebradas secas y ríos, generando aluviones, inundaciones y anegamientos en las ciudades aledañas a las quebradas afectadas. Lo anterior provocó cortes en caminos y carreteras, cortes de servicios básicos y aislamiento. Además de cuantiosas pérdidas, humanas y comerciales.

Debido a la gravedad de los hechos, se destinaron recursos inmediatos para la reparación de los daños. Como también, dentro del marco de la Ley de Sismos y Catástrofes (Ley Nº 16.282, artículo Nº27), se encomendó la realización de varios estudios a largo plazo que buscan actualizar los planes reguladores regionales y comunales, con el fin mejorar las normas urbanas en zonas de posible riesgo a la población y a las propiedades. La ciudad de Taltal, a pesar de contar con piscinas de control aluvional, fue afectada por flujos de barro, dejando 74 viviendas con daños graves o irreparables y un total de 274 viviendas afectadas, con daños mayores, moderados y leves (MINVU, 2015).

El presente trabajo pretende mostrar que la historia de las catástrofes o los daños que han afectado la zona urbana de Taltal, debido a procesos geológicos de remociones en masa, puede ser usada como herramienta primaria para elaborar una zonificación de peligro de la zona urbana actual. Se espera que esta zonificación de peligro pueda servir al municipio para solicitar estudios de riesgo y planificación urbana para realizar actualizaciones al plan regulador actual (MINVU, 2001).

A lo largo del presente trabajo se mostrarán los antecedentes geológicos, morfológicos, climatológicos y bibliográficos sobre los que se fundamenta este estudio, explicando las metodologías utilizadas para construir, analizar y utilizar tanto el catastro histórico, como la susceptibilidad, con el fin de elaborar una evaluación de los peligros reconocidos que puedan afectar al área urbana de Taltal.

1.1. Planteamiento del Problema

El registro histórico con el fin de realizar evaluaciones de peligro se ha utilizado hasta el momento de manera tangencial, apenas mencionando el tema como un dato. Los trabajos más recientes, como Martínez (2009), utilizaron la metodología de Lara (2007), que tomó en cuenta los eventos declarados y le asignó un factor de importancia según el tipo de remoción. Solamente en el caso de los flujos se tomó en cuenta la frecuencia de los mismos, asignándole un factor de influencia. Esa metodología es apropiada para un estudio de susceptibilidad, en el que solo se menciona si el lugar ha sido o no, afectado previamente. Otra aproximación fue realizada por Náquira (2009), que realizó una recopilación de registros históricos para evaluar la susceptibilidad de remociones en masa en fiordos de Hornopirén, pero debido a la baja cantidad de antecedentes para su zona de estudio, este punto se convirtió en una limitación.

Ahora bien, en la memoria de Alfaro (2011), sobre peligro sísmico en la región del Maule sí fueron utilizados análisis estadísticos para establecer el peligro sísmico probabilístico de esa zona. Sin embargo, para este caso, el registro descriptivo de los daños ocasionados por cada sismo y en cada localidad carece de sentido o es innecesario, así como la caracterización de las unidades morfológicas a escala local. Ya que, fue generado un enfoque estadístico y a escala regional, sin una evaluación de peligro a escala local, asociada a las morfologías presentes del área a evaluar.

Respecto a las tres formas planteadas de enfrentar el problema del registro histórico, surge la inquietud sobre si se está afrontando de forma apropiada la información disponible, y si es posible, generar un método por el cual darle un mejor uso a los datos. Para el caso que se presenta en este estudio, se propone estimar la frecuencia de los eventos recopilados, asociándolos a sus mecanismos desencadenantes y a su recurrencia, como también, aproximar la probabilidad asociada al período de retorno de estos procesos, creando una zonificación de peligro cuantitativa o semi-cuantitativa mediante la re-caracterización de los eventos pasados. Principalmente, usando el registro histórico de catástrofes: descripciones locales, contexto histórico y contexto urbano, que generan información primaria para poder evaluar las amenazas a las que se expone esta localidad.

1.2. Objetivos

1.2.1. OBJETIVO GENERAL

- Demostrar que los registros históricos disponibles sobre catástrofes son una base elemental en el estudio de peligro de remociones en masa, con el caso de la ciudad de Taltal.

1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Desarrollar un catastro histórico de eventos de remociones en masa con daños a la zona urbana de Taltal, para estimar su recurrencia.
- Identificar qué procesos de remociones en masa se desarrollan en Taltal y sus mecanismos condicionantes, con el fin de elaborar una evaluación de susceptibilidad.
- Analizar los procesos desencadenantes y estimar los posibles escenarios de peligro para el área urbana.

1.3. Metodología propuesta

La metodología que se propone para cumplir cada uno de los objetivos se presenta resumida en el esquema de la Ilustración 1.3-1. Esta metodología y sus resultados serán expuestos en detalle dentro de los capítulos 3 y 4 de este informe. A continuación se explican a grandes rasgos los procedimientos realizados para alcanzar cada uno de los objetivos específicos y su relación con la figura ya mencionada:

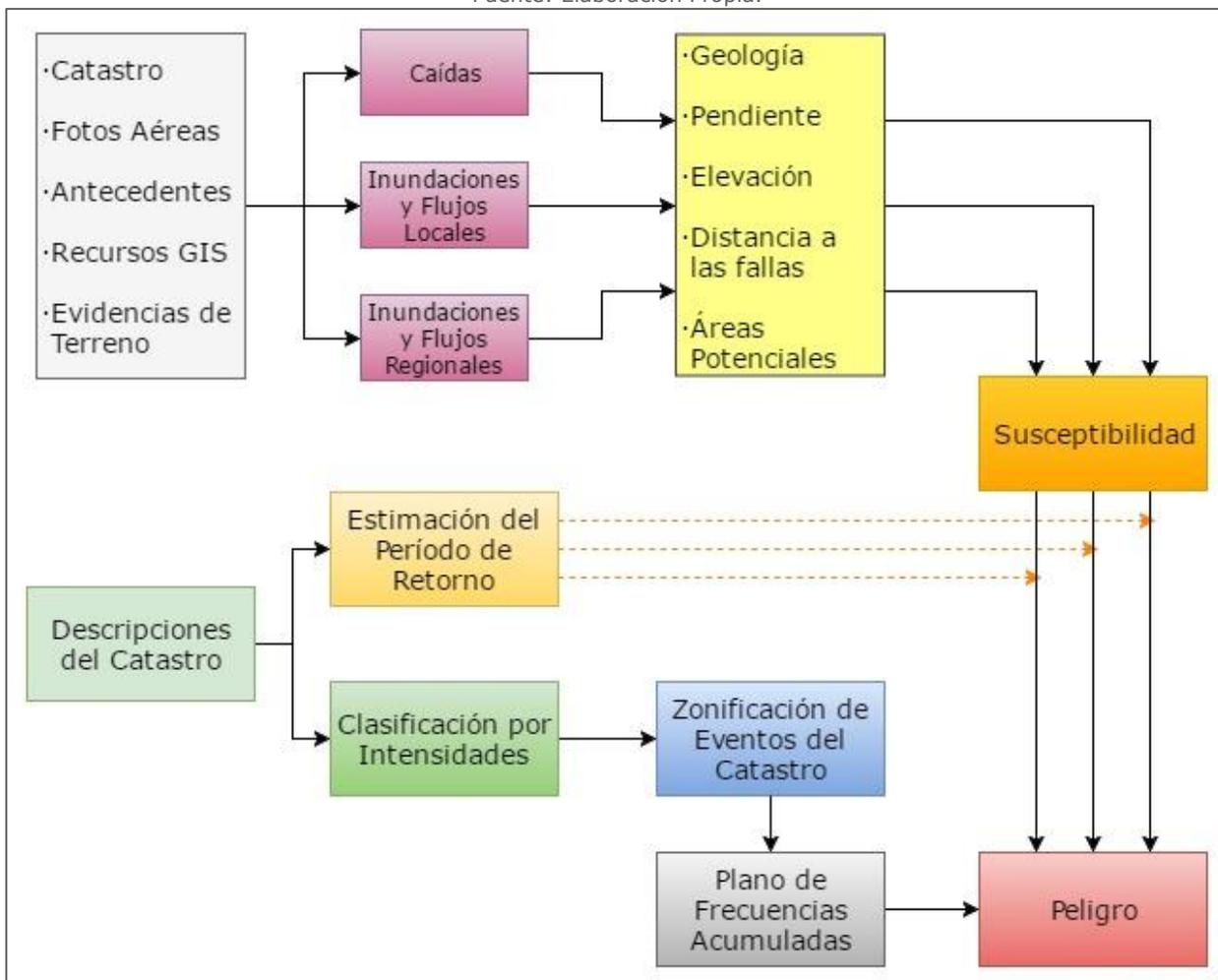
- Elaborar un catastro de eventos de remociones en masa, inundaciones y sismos con daños en la zona urbana de Taltal. Construir una tabla con los detalles de cada evento, con base en bibliografía científica, registros históricos, registros noticiosos y registros estadísticos. Reconocer descripciones de los daños ocasionados. Además, comparar los datos encontrados con bases de datos sobre sismos y eventos hidrometeorológicos. Según las posibilidades, estimar la recurrencia de cada peligro de forma directa o indirecta. (Primera columna de la Ilustración 1.3-1)
- Evaluar la susceptibilidad a escala local y escala intermedia, considerando caracterización de los factores condicionantes en el área de estudio y la

superposición en un mapa de los mismos: geología, estructuras y geomorfología local y regional, imágenes satelitales disponibles en programas GIS, fotos aéreas y el levantamiento de información en terreno. (Parte superior de la Ilustración 1.3-1)

- Evaluar el peligro a partir la elaboración de mapas de frecuencia para el del área de estudio, utilizando la recaracterización de los eventos del catastro, mediante sus descripciones y su contextualización en la ciudad, zonificando los efectos de cada evento y sus intensidades, que serán integrados con la evaluación de susceptibilidad. (Parte inferior de la Ilustración 1.3-1)

Ilustración 1.3-1: Esquema de la Metodología.

Fuente: Elaboración Propia.

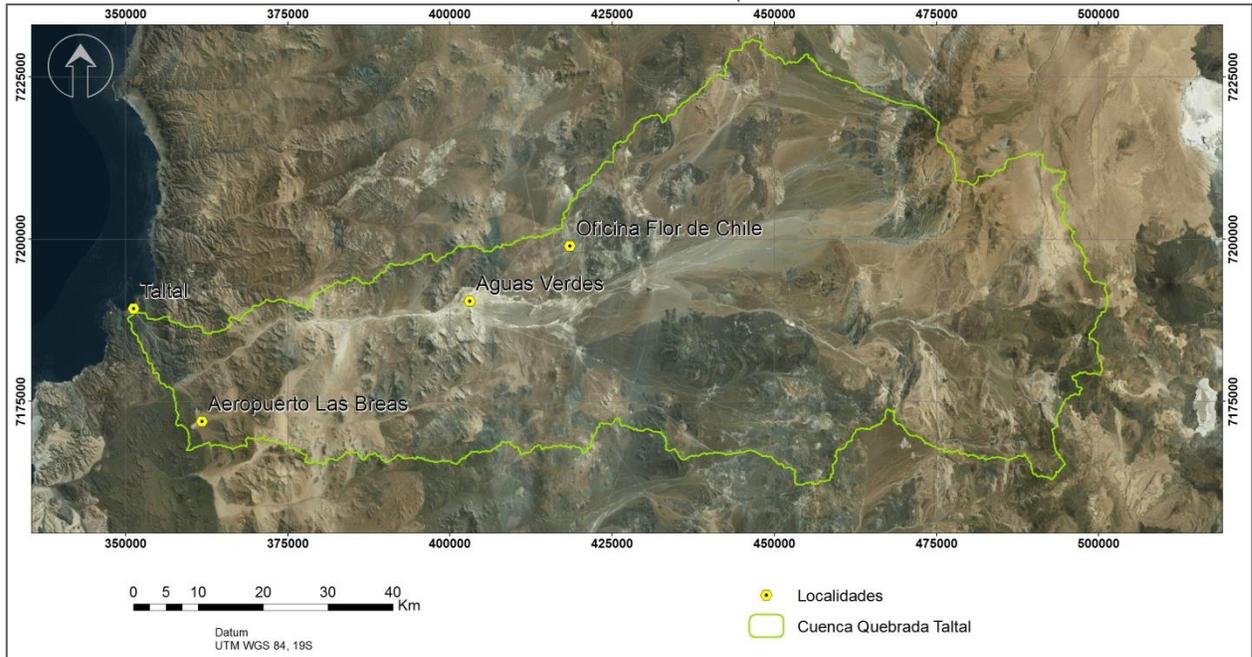


1.4. Área de Estudio

Para poner a prueba esta problemática se ha elegido la ciudad de Taltal, una ciudad costera ubicada al sur de la región de Antofagasta, en la desembocadura de la Quebrada Taltal, cuya hoya hidrográfica abarca un área entre los 25°00' y 25°30' de latitud S, limitando con el mar por el oeste y con el flanco occidental de la Cordillera de Los Andes, por el este (Ilustración 1.4-1). El área urbana de Taltal se encuentra en los 25°12' de latitud S, y el límite urbano se ha determinado a partir del límite anteriormente trazado por el plan regulador (MINVU, 2001) y la inclusión de las áreas recientemente pobladas según las imágenes de Google Earth (2016), como se muestra en la Ilustración 1.4-2. Sobre ese límite desembocan varias quebradas más pequeñas.

Ilustración 1.4-1: Cuenca de la Quebrada Taltal.

Fuente: Elaboración Propia.

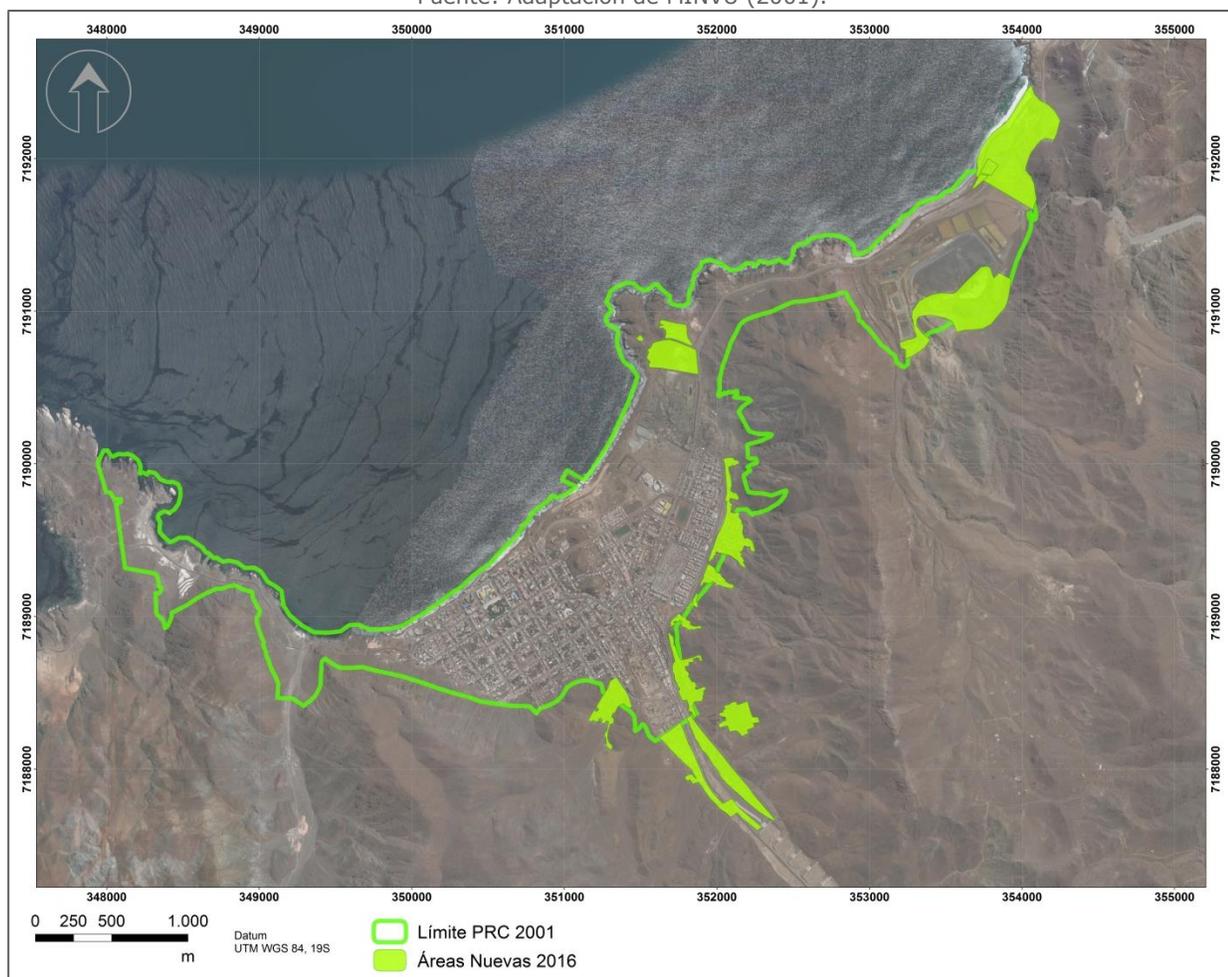


La evaluación de peligro se realizará en el área dentro del límite urbano de Taltal. Para ello se requiere el estudio de las quebradas aportantes ya mencionadas, de las laderas colindantes con la ciudad y de los distintos factores condicionantes y desencadenantes en una escala apropiada para cada caso. Por este motivo, se ha decidido dividir el área de estudio en tres escalas de trabajo: escala regional, escala intermedia y escala local. La escala regional es de 1:250.000 y considera el estudio de la cuenca que se concentra en la quebrada Taltal. La escala intermedia, considera un acercamiento 1:20.000 y se utiliza de forma auxiliar para realizar el estudio local. Por último, la escala local es de 1:5.000 y considera la elaboración de

los mapas de susceptibilidad y peligro finales. En el capítulo 4, sobre la evaluación de peligro y de susceptibilidad se abordará este tema con mayor especificación.

Ilustración 1.4-2: Delimitación del área urbana de Taltal.

Fuente: Adaptación de MINVU (2001).



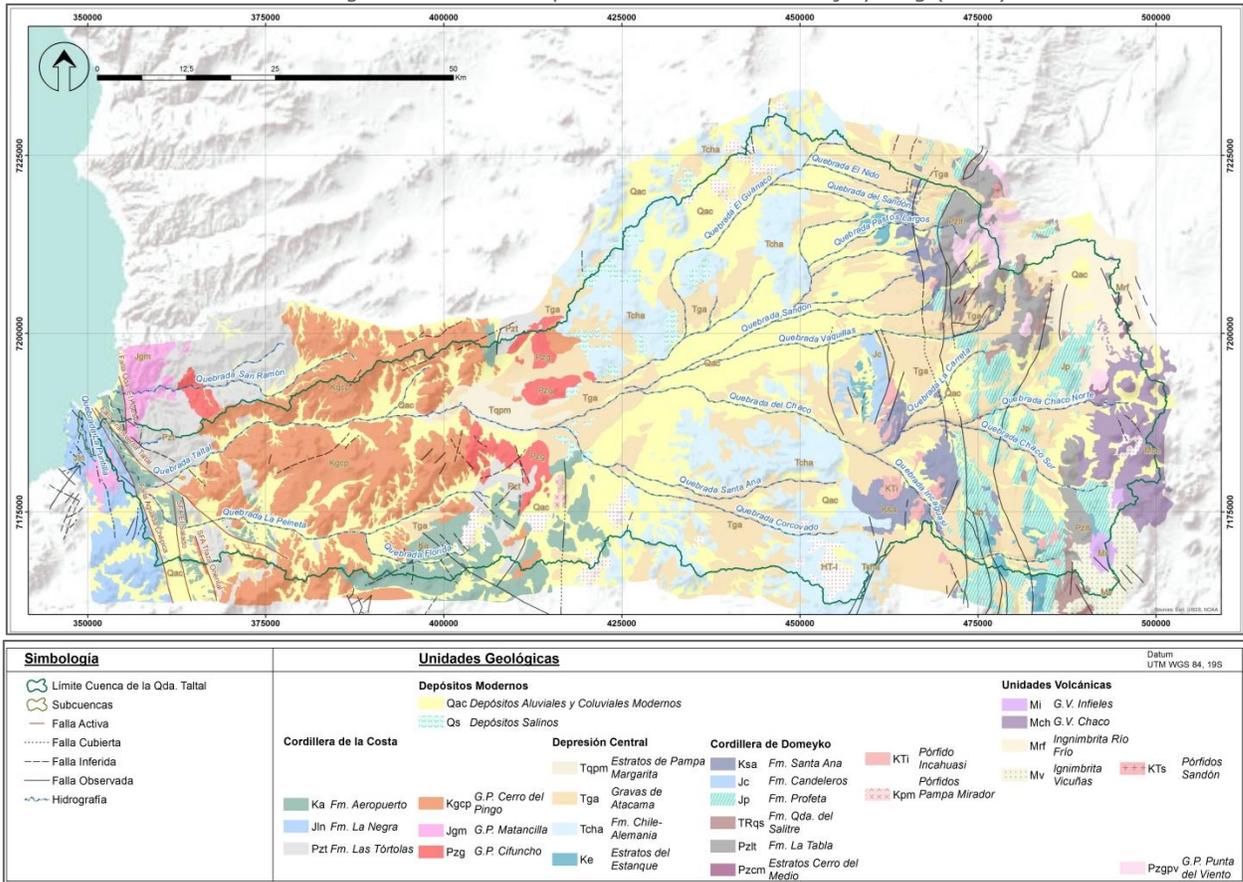
1.5. Antecedentes Bibliográficos

1.5.1. TRABAJOS ANTERIORES EN EL ÁREA

Para el área de estudio de escala regional se encuentran las 'Hojas Taltal y Chañaral' (Naranjo & Puig, 1984) a escala 1:250.000, que cuenta con una detallada descripción de las unidades geológicas y su evolución. Como este trabajo no cuenta con una versión digital, para facilitar su manejo se ha traspasado a GIS la información de la hoja correspondiente a la hoya de la quebrada Taltal y las quebradas aledañas a la ciudad, como se observa en el acercamiento de la Ilustración 1.5-1. Manteniendo las unidades descritas por los autores y la apariencia del mapa original, dentro de lo posible. Este mapa puede ser consultado en el archivo anexo: Carta Geológica.

Ilustración 1.5-1: Mapa Geológico de la Cuenca de la Quebrada Taltal.

Fuente: Digitalización de una parte de la carta de Naranjo y Puig (1984).



Para las áreas de estudio intermedias y locales, se utilizaron las 'Cartas Bahía Isla Blanca y Taltal' (Escribano, et al., 2013), que incorporan información actualizada sobre las unidades a escala 1:100.000. Además, se consultaron cuatro trabajos: Urbe Arquitectos (2012), Garrido et al., (2015), León (2014)

y Alfaro *et al.*, (2015). El primero, es el Estudio Fundado de Riesgo para la ciudad de Taltal, sobre el que se basa el Plan Regulador Comunal actual. El segundo, es un informe técnico sobre riesgos de remociones en masa y tsunamis solicitado por ONEMI luego de la emergencia, en Marzo de 2015. El tercero, es una memoria sobre la geología marina entre Taltal y Paposo. El último, corresponde a la primera descripción oficial del aluvión de Marzo de 2015.

1.5.2. ANTECEDENTES SOBRE EL USO DEL REGISTRO HISTÓRICO PARA EVALUACIONES DE PELIGRO.

La revisión de antecedentes bibliográficos sobre metodologías de zonificación de peligro y susceptibilidad, muestra que se han elaborado muchos métodos de modelamiento de remociones en masa. Para enfrentar el problema de evaluar la frecuencia de las remociones, el trabajo de Corominas y Moya (2008) describe distintas metodologías para utilizar los datos disponibles en la estimación de probabilidad, para distintas escalas de trabajo y metas de investigación. Por otro lado, en el trabajo de Cascini (2008), se clasifica estas metodologías en categorías según el detalle y nivel de sofisticación que alcanzan. Ambos trabajos se utilizaron para tomar decisiones en el manejo de los datos disponibles.

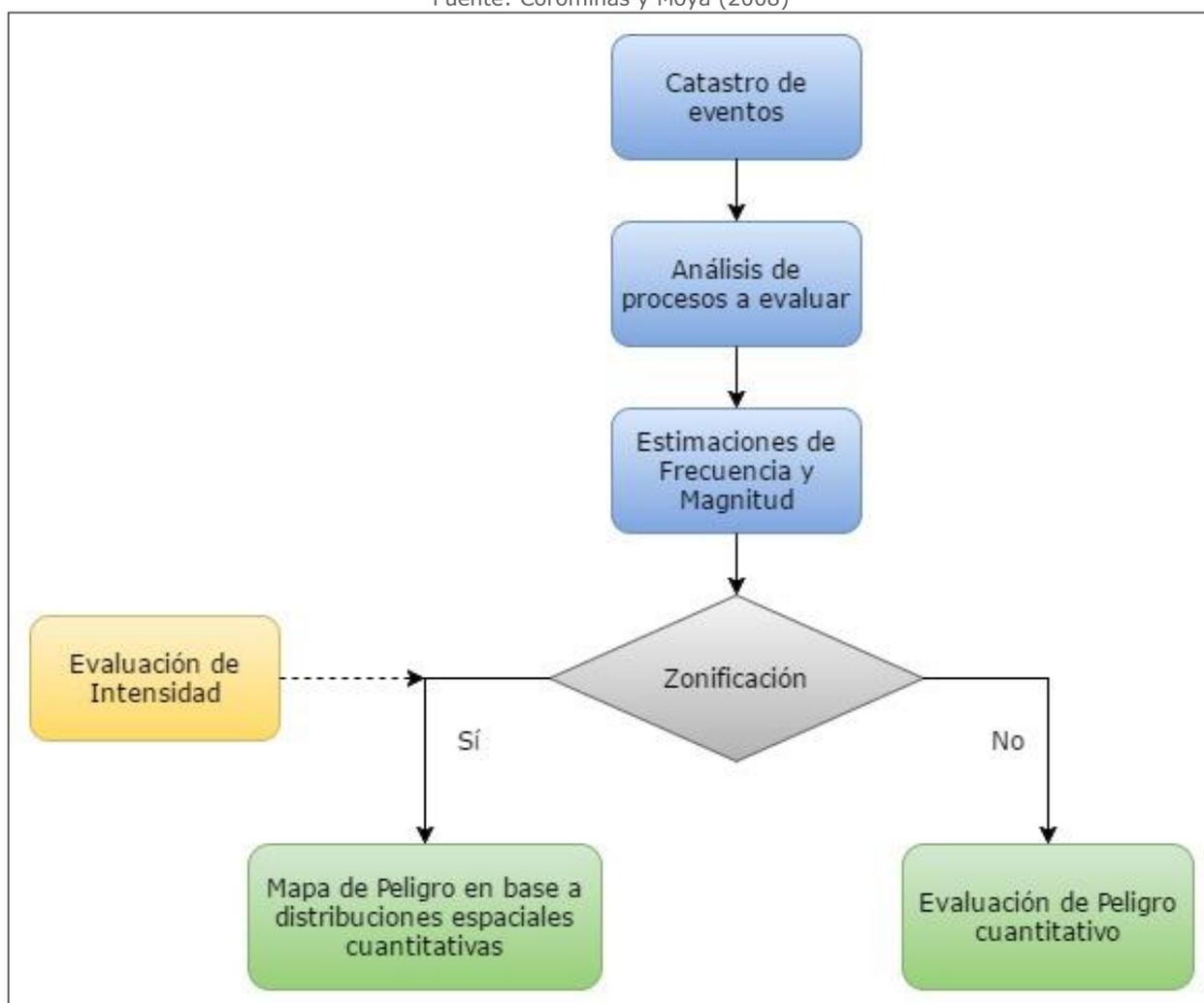
En la Ilustración 1.5-2 se observa una de las metodologías que propone Corominas y Moya (2008). Esta metodología se orienta al estudio de una zona específica, que podría ser potencialmente afectada, tomando en cuenta el inventario de eventos anteriores y las intensidades esperadas para evaluar y zonificar el peligro. Para este enfoque, los autores recomiendan combinar la estimación de la frecuencia con modelos cinemáticos que puedan determinar la distribución espacial de los eventos de distinta intensidad. También recomiendan el uso de fuentes directas y confiables para la elaboración del inventario, como organismos técnicos que mantengan una inspección constante de la zona, registros de noticias, archivos históricos o informes técnicos. Aunque, hacen la salvedad, de que en general, los registros disponibles describen los eventos más grandes, que afectan solo áreas urbanas importantes y que, los eventos más pequeños pasan desapercibidos, por lo que se puede complementar con fuentes indirectas y aun así, tener un registro incompleto.

En el caso de Hong Kong, Chau *et al.*, (2004) revisa un inventario de 1448 remociones recopilado durante 14 años, que permite realizar un minucioso análisis estadístico para realizar una evaluación de peligro con base en siete capas de información, demostrando la correlación entre las remociones y las

lluvias como desencadenantes y mostrando la importancia del registro de los eventos como parte de la evaluación de peligro. En Taltal, la relación entre las lluvias y la generación de remociones es aún más estrecha, debido a las condiciones climáticas de esta región (que se detallan en el punto 2.5), por lo que en este trabajo se considera que, el catastro de registros históricos de los últimos 130 años presenta información suficiente para aplicar este método ajustándolo a las condiciones de la ciudad y a los procesos de remociones en masa e inundaciones.

Ilustración 1.5-2: Evaluación de peligro orientada al área potencialmente afectada.

Fuente: Corominas y Moya (2008)



Para hacer una evaluación sobre el peligro volcánico, deben estudiarse primero los posibles alcances que puedan tener los centros volcánicos activos cercanos a la ciudad, según las recomendaciones de la USGS (2008). Luego de determinar los alcances y las evidencias de actividad volcánica pueden hacerse entonces recomendaciones para analizar este peligro, pero de

manera preliminar, se observa que el arco volcánico activo no se encuentra dentro del radio de influencia de la ciudad, este punto se examinará con mayor detalle en la sección VOLCANISMO LOCAL (2.1.2) de este trabajo.

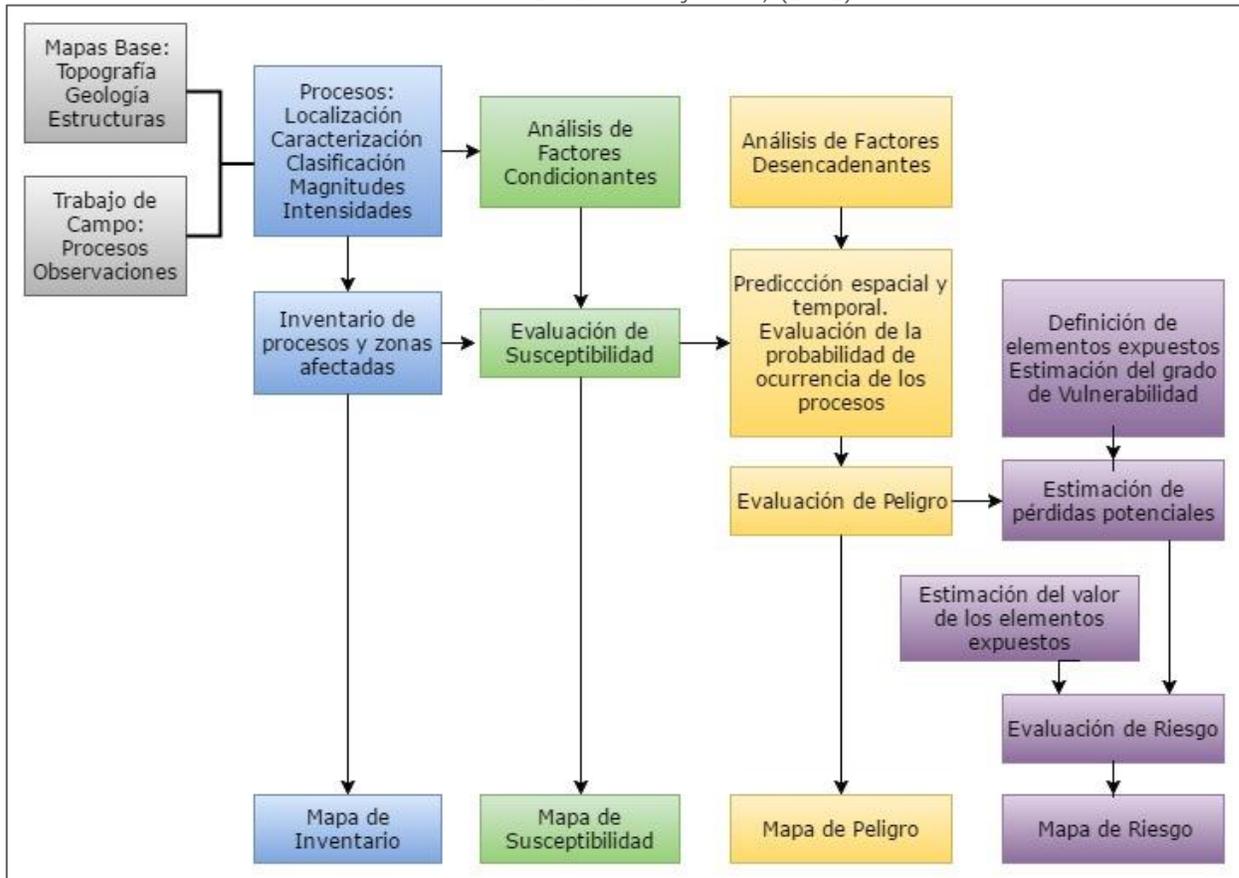
El análisis de peligro sísmico con una aproximación probabilística de las aceleraciones sísmicas máximas (PGA) es ampliamente reconocido y se han realizado estudios para Chile Central (Leyton, et al., 2010), la región del Maule (Alfaro, 2011) y la ciudad de Antofagasta (Fernández, et al., 2014). Este tipo de estudio es especialmente adecuado para las condiciones sísmicas de Chile (que serán detalladas en el punto 2.1), pero se considera de carácter regional. Para la escala local en la que se realizará la evaluación de peligro, se considerará que la respuesta sísmica de toda el área es homogénea, ya que no se encuentra dentro de los alcances de este trabajo realizar un análisis de microzonificación sísmica. Por este motivo, se propone usar el catastro de eventos sísmicos para establecer este proceso como un condicionante de las remociones en masa.

1.5.3. MARCO TEÓRICO

A continuación se definen los términos utilizados para la elaboración de este trabajo. La mayor parte de estas definiciones fueron consultadas de González de Vallejo *et al.*, (2002) pero también se han adaptado según las definiciones de Fell *et al.*, (2008) y los usos que se le han dado a estos términos dentro de este estudio. La Ilustración 1.5-3 resume las asociaciones entre ellos.

Ilustración 1.5-3: Esquema de la metodología para estudios de riesgo.

Fuente: González de Vallejo *et al.*, (2002)



En primer lugar, existen variados procesos que generan daños y por lo tanto pueden constituir un peligro para las zonas pobladas, para el contexto de este trabajo se reconocen como '**Procesos geológicos externos**':

- Remociones en masa
- Inundaciones
- Terremotos y tsunamis
- Erupciones volcánicas

Estos procesos geológicos externos pueden ocurrir con variada magnitud y características y pueden afectar de forma directa o indirecta, a las actividades humanas.

La **susceptibilidad**, es una evaluación cualitativa o cuantitativa que clasifica la distribución espacial de los potenciales procesos ocurridos, o que podrían ocurrir, en un área determinada. Esta evaluación incluye una descripción de la intensidad de eventos pasados o potenciales y de los **factores condicionantes** de ese proceso. En general, se entiende que en áreas más susceptibles podría haber una mayor frecuencia de eventos, pero el análisis de susceptibilidad explícitamente no toma en cuenta el transcurso del tiempo. La susceptibilidad incluye procesos que se generan dentro del área de estudio o que pueden generarse fuera del área y transportarse hasta allí.

El **peligro o amenaza** es una condición con el potencial para causar una consecuencia no deseada. La descripción de peligro de un determinado proceso incluye su ubicación espacial, área de influencia y clasificación. Su evaluación se expresa en grados de **peligrosidad**, que integra la posible intensidad del proceso que se desarrolla, con las consecuencias de su trayectoria y con la probabilidad de que ocurra en un determinado período de tiempo, por lo que se encuentra directamente ligado a los **mecanismos desencadenantes** de cada proceso.

La **intensidad**, corresponde a los efectos del proceso en relación a la zona que se ve afectada y la gravedad de los daños, independientemente de su magnitud. Para este trabajo en particular, la definición de los grados de intensidad se detalla más adelante, en el punto 3.2.

La **probabilidad** es un grado de certeza, que tiene valor entre 0 (ninguna posibilidad) y 1 (total certeza). Es una estimación de la posibilidad de que ocurra un evento de una determinada intensidad. Desde un análisis estadístico se entiende como el resultado de un experimento repetitivo como tirar una moneda y se conoce como probabilidad de frecuencia relativa.

El **período de retorno**, corresponde al número de años transcurridos entre dos eventos similares.

La **vulnerabilidad** es el grado de daños o pérdidas de elementos que se encuentren dentro del área de peligro de un determinado proceso. Se expresa en una escala de 0 (sin pérdidas) a 1 (pérdidas totales). Para propiedades, evalúa como el valor de los daños con respecto al valor total de la propiedad; para vidas, corresponde a la probabilidad de que una vida en particular se pierda, si la persona se encuentra afecta al área de influencia de un proceso particular.

Los **elementos expuestos** corresponden a personas, bienes, propiedades privadas, propiedades comerciales, infraestructura vial, servicios públicos, vehículos u otros elementos que puedan encontrarse en la zona de peligro de uno o más procesos.

El **riesgo** es una medida de la probabilidad y severidad de un efecto adverso para la salud, los bienes materiales o el medioambiente. Comúnmente se estima como el producto de la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno de una determinada magnitud por las consecuencias. Sin embargo, una interpretación más general del riesgo involucra la comparación entre la probabilidad y las consecuencias en una forma cualitativa, en la que se recomienda el uso de la intensidad de los procesos. Para este caso, el riesgo de pérdida de vidas humanas se define como la probabilidad anual de que una persona en riesgo pierda su vida, tomando en cuenta el peligro del evento, y la vulnerabilidad de la ubicación espacial y temporal de la persona. El riesgo de pérdida de bienes materiales, es la probabilidad anual de un determinado nivel de pérdida, tomando en cuenta los elementos en riesgo y la vulnerabilidad de su ubicación espacial y temporal.

Una **zonificación**, es la división del terreno en áreas o dominios en rangos o grados de intensidad, magnitud, susceptibilidad, peligro o riesgo.

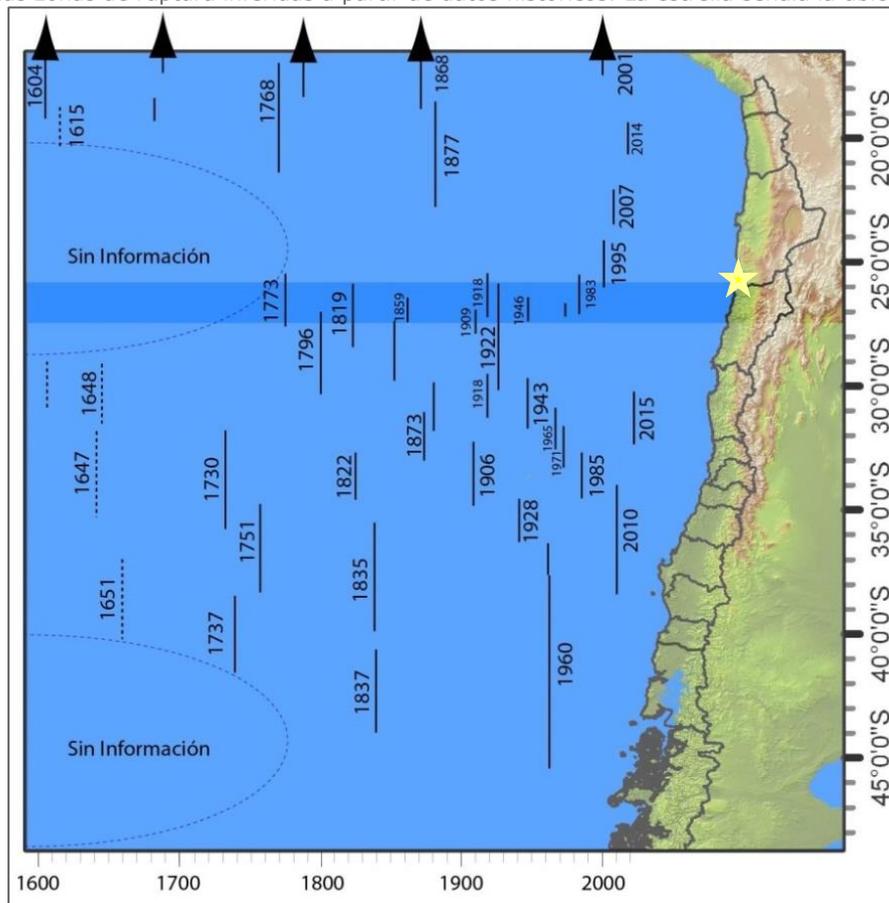
2. CONTEXTO

2.1. Contexto Tectónico

Chile se encuentra sobre un margen de placas convergente, donde la Placa Oceánica de Nazca subducta a la Placa Continental Sudamericana, con una tasa de convergencia anual de 7-9 cm (Stern, et al., 2007). Taltal se encuentra, aproximadamente en los 25°S, en esta latitud el margen convergente presenta un estilo de subducción normal cercano a los 30° de inclinación hacia el este. Este contexto tectónico es el principal generador de las morfologías presentes en la región, como también es la causa directa del volcanismo activo presente en el Arco Magmático de la Precordillera. Además, la acumulación de esfuerzos debido a la convergencia y su posterior relajación de forma súbita, da origen a sismos y terremotos de forma frecuente en todo el margen de convergencia. En la Ilustración 2.1-1 se grafican los terremotos de subducción históricos con magnitud estimada y calculada mayor a 7.2, y sus áreas de ruptura, mostrando que esta zona se mantiene sísmicamente activa a lo largo de la historia.

Ilustración 2.1-1: Terremotos históricos con magnitud mayor a 7.2.

Fuente: Habiterra Consultores (2017). En línea continua, las zonas de ruptura bien identificadas. En línea discontinua, las zonas de ruptura inferidas a partir de datos históricos. La estrella señala la ubicación de Taltal.



2.1.1. SISMICIDAD

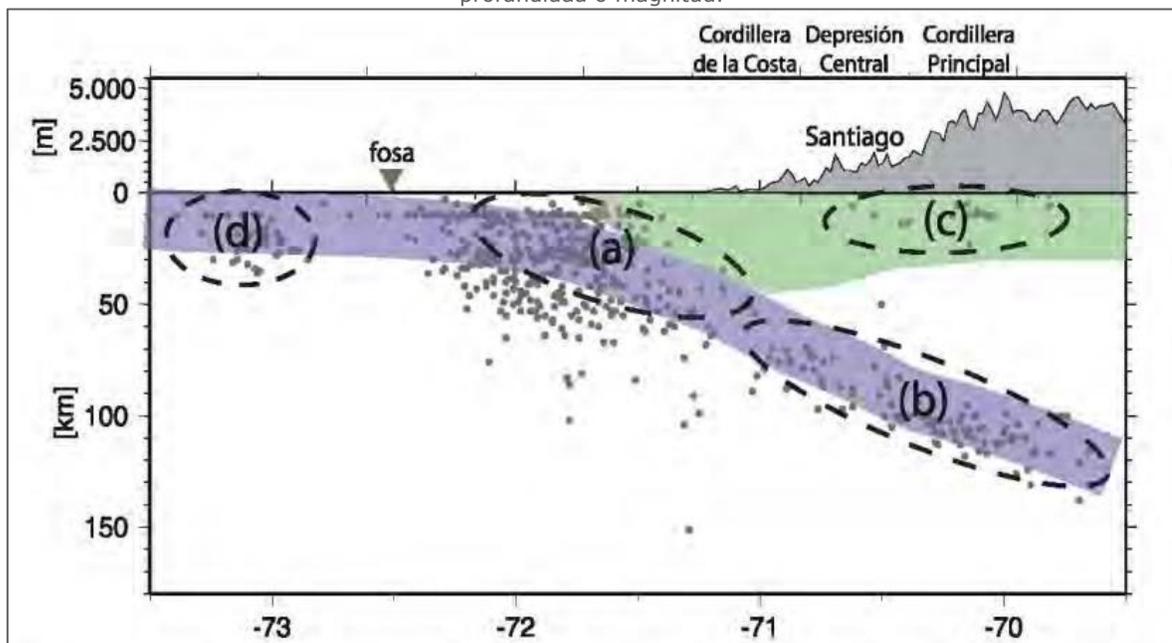
La interacción entre las placas de Nazca y sudamericana genera sismos a lo largo de todo el margen de las costas chilenas, pero también existen otras fuentes de sismos relacionadas al límite convergente, según Leyton *et al.*, (2010) estas fuentes se pueden resumir en:

- a) **Sismicidad Interplaca:** se produce en el contacto de las placas Sudamericana y de Nazca, extendiéndose desde la fosa hasta unos 50 a 60 Km de profundidad.
- b) **Sismicidad Intraplaca:** actividad sísmica de profundidad intermedia (50 a 200 Km) que ocurre dentro de la placa de Nazca, en Chile no se han observado daños producidos por sismos de mayor profundidad.
- c) **Sismicidad Cortical:** ocurre en el interior de la placa Sudamericana, principalmente en los sectores precordilleranos y cordilleranos y se ubica en profundidades menores a los 30 Km.
- d) **Sismicidad de Flanco Lejano:** producida por la flexión de la placa de Nazca previa a la subducción. Se caracteriza por generar sismos de magnitud moderada más de 150 Km de la costa, sin producir daños significativos en el continente.

La Ilustración 2.1-2 muestra un perfil esquemático de estas fuentes sísmogénicas, para terremotos registrados por el NEIC entre 1973 y 2007, para los 33,5° de latitud S, y que es aplicable para la zona de estudio.

Ilustración 2.1-2: Perfil esquemático de la sísmica en el margen Chileno.

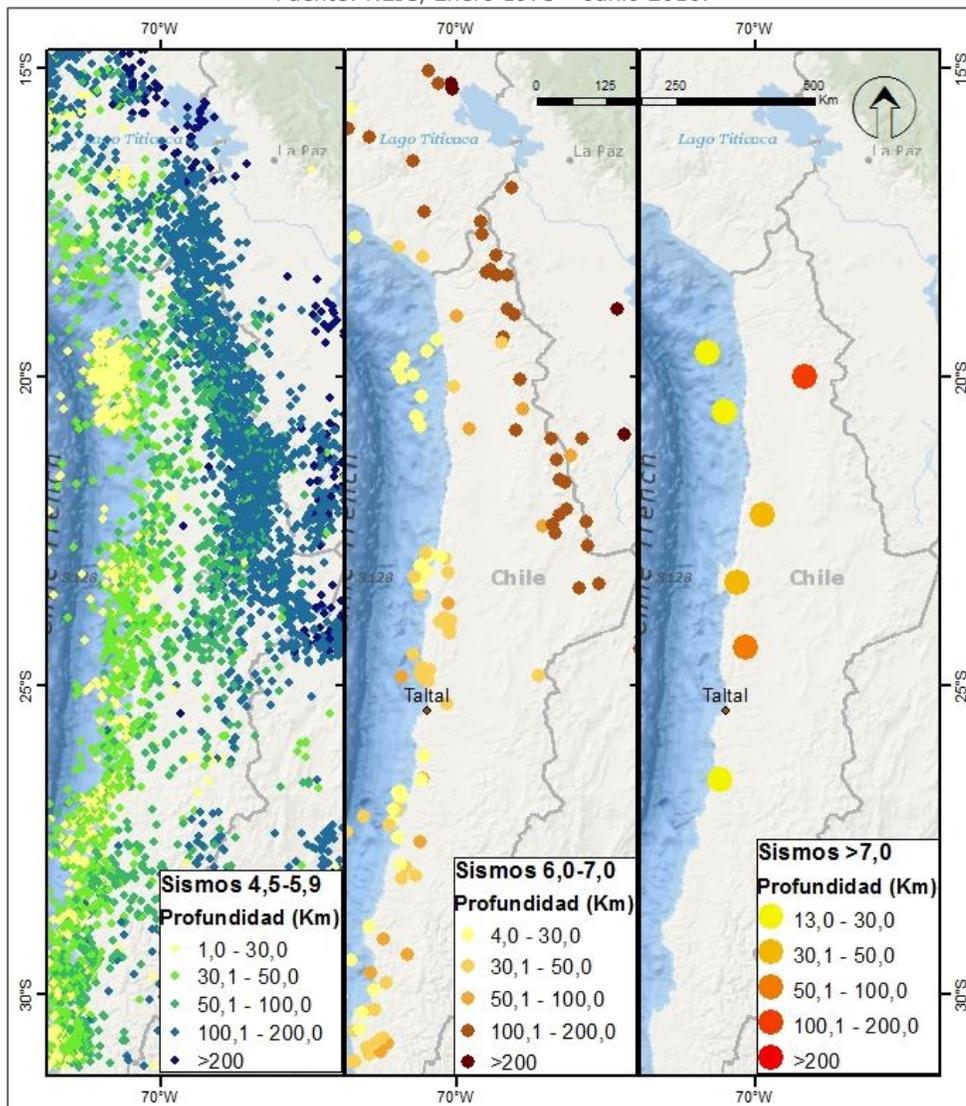
Fuente: Leyton *et al.*, (2010). Azul: Placa de Nazca, Verde: Placa Sudamericana, Puntos: Sismos sin distinguir profundidad o magnitud.



Como se observa en la Ilustración 2.1-3, sismos de pequeña y mediana magnitud ocurren de manera muy frecuente en la región, especialmente en la zona costera del área de estudio. A la izquierda de la misma ilustración, se muestran los mayores sismos registrados en la región, un total de 7, en los últimos 43 años. Estos sismos pueden generar daños graves en las construcciones, olas de tsunami de mayor amplitud, movimientos en las laderas y fracturas en el terreno, tal como fue registrado para el terremoto de Taltal en 1966 (Álvarez, et al., 1967).

Ilustración 2.1-3: Sismos registrados por la red sismológica mundial.

Fuente: NEIC, Enero 1973 - Junio 2016.



Algunos tipos de remociones en masa pueden darse en lugares predispuestos por el ángulo de la pendiente, la resistencia de los materiales, la vegetación presente o los antecedentes de eventos anteriores, entre otros factores

(Corominas & Moya, 2008). La ocurrencia de un sismo, cambia las condiciones de esfuerzo en una ladera por un período muy corto de tiempo, y dependiendo de la magnitud y localización del epicentro del sismo, puede desencadenar remociones en laderas previamente condicionadas. Por ese motivo se suele correlacionar las remociones en masa con la ocurrencia de sismos de una cierta magnitud, como desencadenantes, para calcular su frecuencia, generando evaluaciones de peligro sísmico a escala regional como el trabajo de Alfaro (2011).

Como este trabajo se enfoca en generar una evaluación de peligro para el área urbana de Taltal, a escala 1:5.000, se considerará que el peligro sismogénico es homogéneo. Sin embargo, es importante destacar que dentro del contexto de la escala local, los sismos cumplen un rol tanto de factor condicionante, como de mecanismo desencadenante. Es decir, para el caso de los procesos de remociones en masa e inundaciones, la ocurrencia constante de sismos de distintas magnitudes genera movimientos de material suelto en las laderas y desestabilización de las estructuras en los afloramientos de roca, aportando de forma constante material propenso a ser removido en caso de precipitaciones intensas. Para el caso de remociones en masa, además, se puede considerar que los sismos de mayor magnitud son mecanismos desencadenantes en condiciones secas.

2.1.2. VOLCANISMO LOCAL

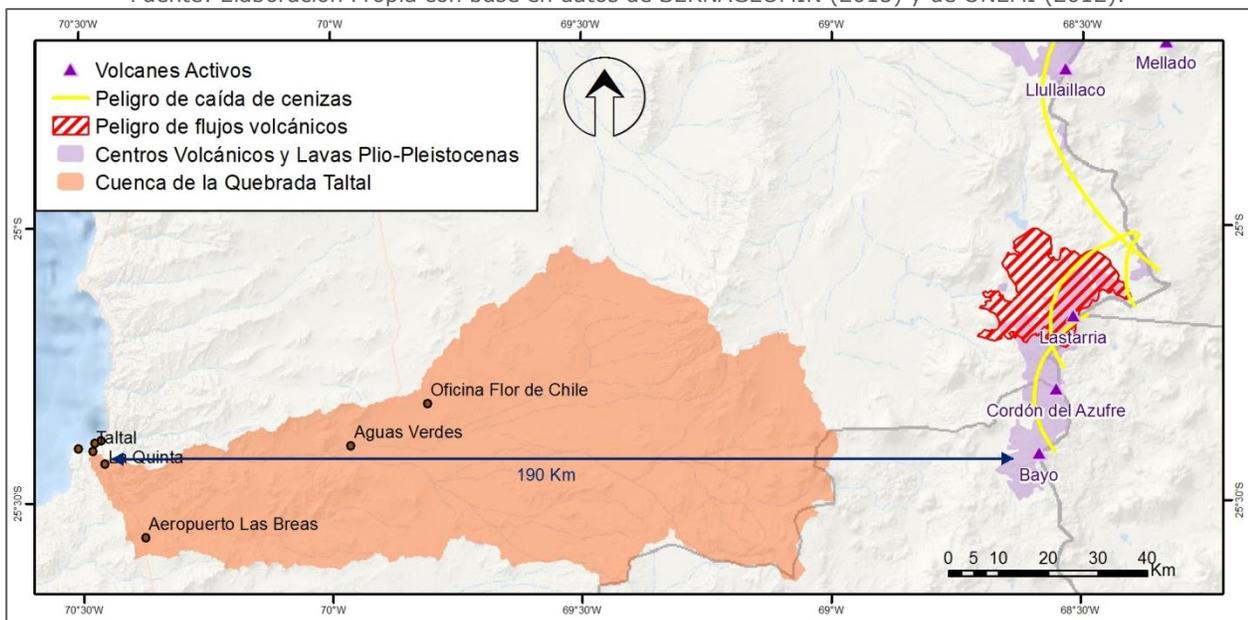
Los volcanes producen una variedad de peligros que pueden ser un riesgo para la población, incluso cuando un volcán no se encuentra en erupción. Los principales procesos ocurren en torno al edificio volcánico y afectan los alrededores del mismo, hasta unos 25 Km a la redonda. Solo las cenizas, pueden tener un mayor alcance, determinado por la altura de la columna eruptiva y la dirección predominante del viento durante la erupción (USGS, 2008).

Existen tres volcanes activos, próximos al área en estudio: Volcán Lastarria, Cordón del Azufre y Cerro Bayo. Estos volcanes se encuentran a unos 40 Km más el este del borde de la cuenca de la Quebrada Taltal y no se encuentran conectados a la red de drenaje de la cuenca. La Ilustración 2.1-4, muestra el área de estudio en relación a las áreas de riesgo volcánico determinadas para la región de Antofagasta (ONEMI, 2012), dejando la quebrada de Taltal fuera de las zonas de riesgo volcánico directo (tachada en rojo).

Por otro lado, en caso de ocurrencia de un proceso eruptivo con la formación de una columna y caída de cenizas, la dirección preferencial del viento en esta región es NNE cerca de la costa, con variación hacia el E a mayores alturas, como efecto de la circulación general de la atmósfera. La Ilustración 2.1-4 muestra las zonas delimitadas por ONEMI (2012), como las más susceptibles de ser afectadas por este motivo (líneas amarillas, hacia el E). Es altamente improbable que la caída de cenizas afecte de forma significativa al área urbana de Taltal. El mapa de peligro volcánico elaborado por el SERNAGEOMIN (Amigo & Bertín, 2013) para el volcán Lastarria muestra información similar, pero más específica para esa localidad, que queda fuera del área de estudio.

Ilustración 2.1-4: Peligro volcánico de la comuna de Taltal.

Fuente: Elaboración Propia con base en datos de SERNAGEOMIN (2015) y de ONEMI (2012).



Por lo expuesto anteriormente, se considera que el peligro volcánico presente solo se puede analizar a escala regional y se considera mínimo para el área de estudio local, por lo que no se revisará su influencia y magnitud dentro este trabajo.

2.2. Contexto Climático

La cuenca de la Quebrada de Taltal se encuentra dentro del Desierto de Atacama y en el flanco oriental de la Cordillera de los Andes, en latitudes subtropicales de extrema aridez. A pesar de estas condiciones de sequedad, ocurren precipitaciones de lluvias esporádicas, causantes de inundaciones y remociones en masa a escala regional. En esta sección se comentan los variados factores que confluyen en la formación de las condiciones climáticas normales para la región y en las condiciones climáticas anómalas que ocasionan precipitaciones aisladas. Ambas han sido ampliamente estudiadas por varios autores: Garreaud *et al.*, (2010) estudia la retroalimentación positiva entre el aumento de la aridez en el desierto y el alzamiento de la Cordillera Andina, Garreaud *et al.*, (2003) describe los mecanismos a distintas escalas de tiempo que generan precipitaciones en esta zona, Vargas *et al.*, (2000) y Vargas *et al.*, (2006) estudian el fenómeno climático de **El Niño Oscilación del Sur (ENOS)** y su relación con la formación de aluviones en Antofagasta y sus alrededores.

2.2.1. CLIMA REGIONAL

Esta descripción se basa principalmente en la introducción realizada por Garreaud *et al.*, (2010) en su trabajo sobre el Altiplano y ha sido adaptada para el área de estudio. Entre los 17-25°S, a lo largo de la costa oeste de Sudamérica predominan condiciones de aridez extrema, formando una franja alargada entre el Océano Pacífico y la Cordillera de los Andes, conocida como el Desierto de Atacama. Tiene una precipitación media anual bajo los 5mm, dentro de la Depresión Central, principalmente conformada por la **'camanchaca'**: neblina proveniente desde la costa, y por inusuales episodios lluviosos (1 vez cada 10 o más años) asociados al paso de un frente frío Vargas *et al.*, (2006). Mayores lluvias (100-200 mm/año) se desarrollan en el flanco este de la Cordillera Occidental, como un excedente de las tormentas convectivas que se desarrollan aún más al este en el Altiplano (Garreaud, et al., 2003).

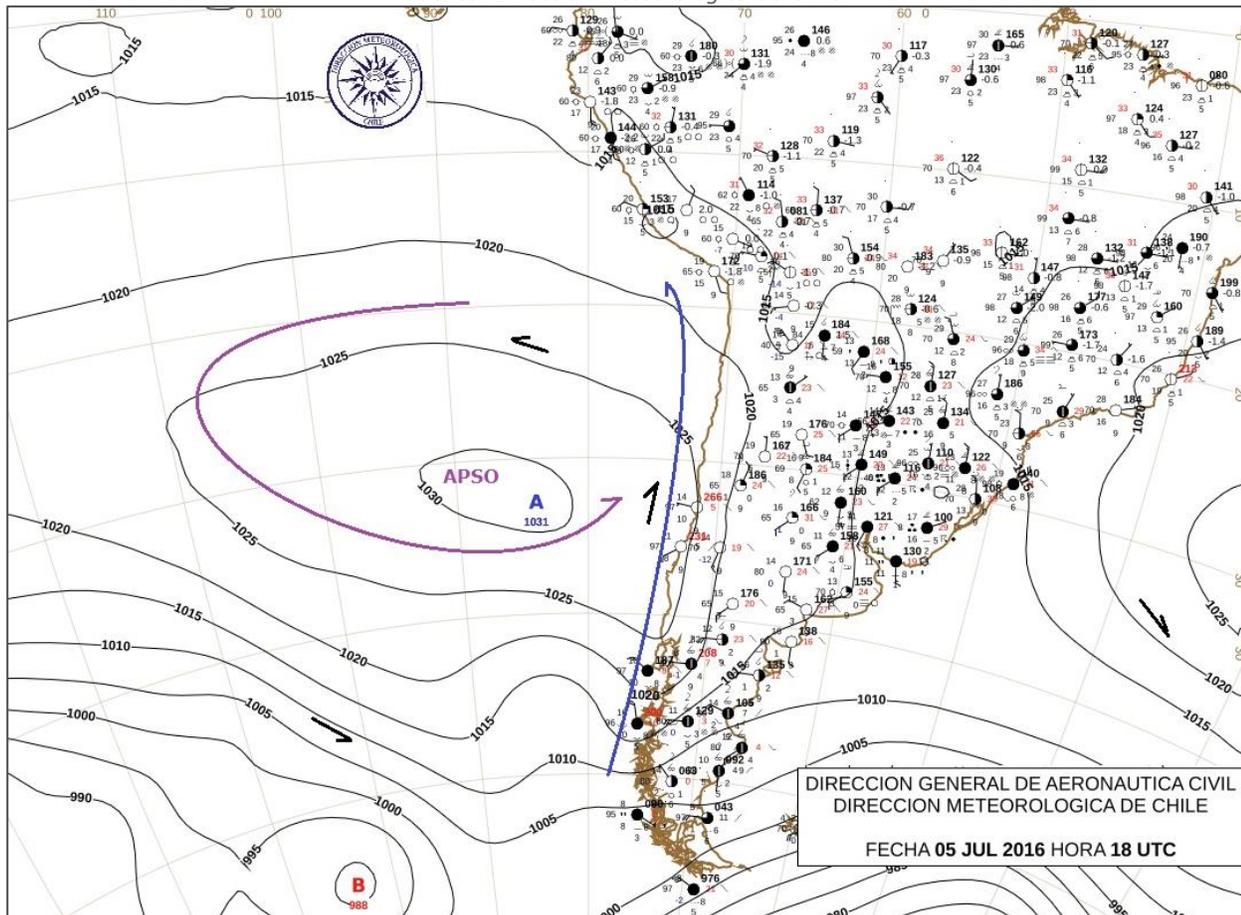
Una de las causas principales para la hiper aridez del Desierto de Atacama, es su ubicación en el límite este del Pacífico Subtropical. En esta región, se produce una subsidencia de la atmósfera a gran escala, generando condiciones estables secas y manteniendo un **anticiclón sobre el Pacífico Suroriental (APSO)** a nivel de superficie (Ilustración 2.2-1). Este anticiclón detiene y dispersa la llegada de otras perturbaciones desde latitudes medias y altas, dirigiendo los vientos ecuatoriales a lo largo de la costa, fomentando el transporte de aguas frías desde mayores latitudes, como la **corriente de Humboldt** o la corriente superficial Chile-Perú, y forzando la surgencia de

aguas profundas. Estas condiciones resultan en un marcado enfriamiento regional de la baja troposfera que es compensada por una subsidencia amplificada a lo largo de la costa de Atacama, que seca aún más esta zona.

Ilustración 2.2-1: Carta de Superficie con condiciones climáticas normales

APSO: Anticiclón del Pacífico Suroriental, Azul: Corriente de Humboldt, Negro: Dirección del viento.

Fuente: Dirección Meteorológica de Chile.



La presencia de la Cordillera de Los Andes también se considera un factor adicional en la aridez del Desierto de Atacama. El frente cordillerano bloquea el transporte de humedad desde el Amazonas, produciendo un efecto de rebote en el flanco este de la cordillera, impidiendo la penetración de las lluvias convectivas hacia el oeste. Aún más, los flujos termales ascendentes fuerzan la dispersión, a lo largo de la costa, de los flujos húmedos provenientes del Océano Pacífico hacia el desierto durante el día.

En resumen, esta zona se caracteriza por el desarrollo de la camanchaca, temperaturas medias diarias entre 13 y 20°C, para el invierno y el verano, y precipitaciones anuales promedio que no superan los 4 mm. La nubosidad baja de la camanchaca es generalmente retenida por la Cordillera de la

Costa, pero puede tener entradas periódicas a la Depresión Central por el levantamiento de la base de inversión térmica, que normalmente se mantiene a menor altura (Vargas, et al., 2000).

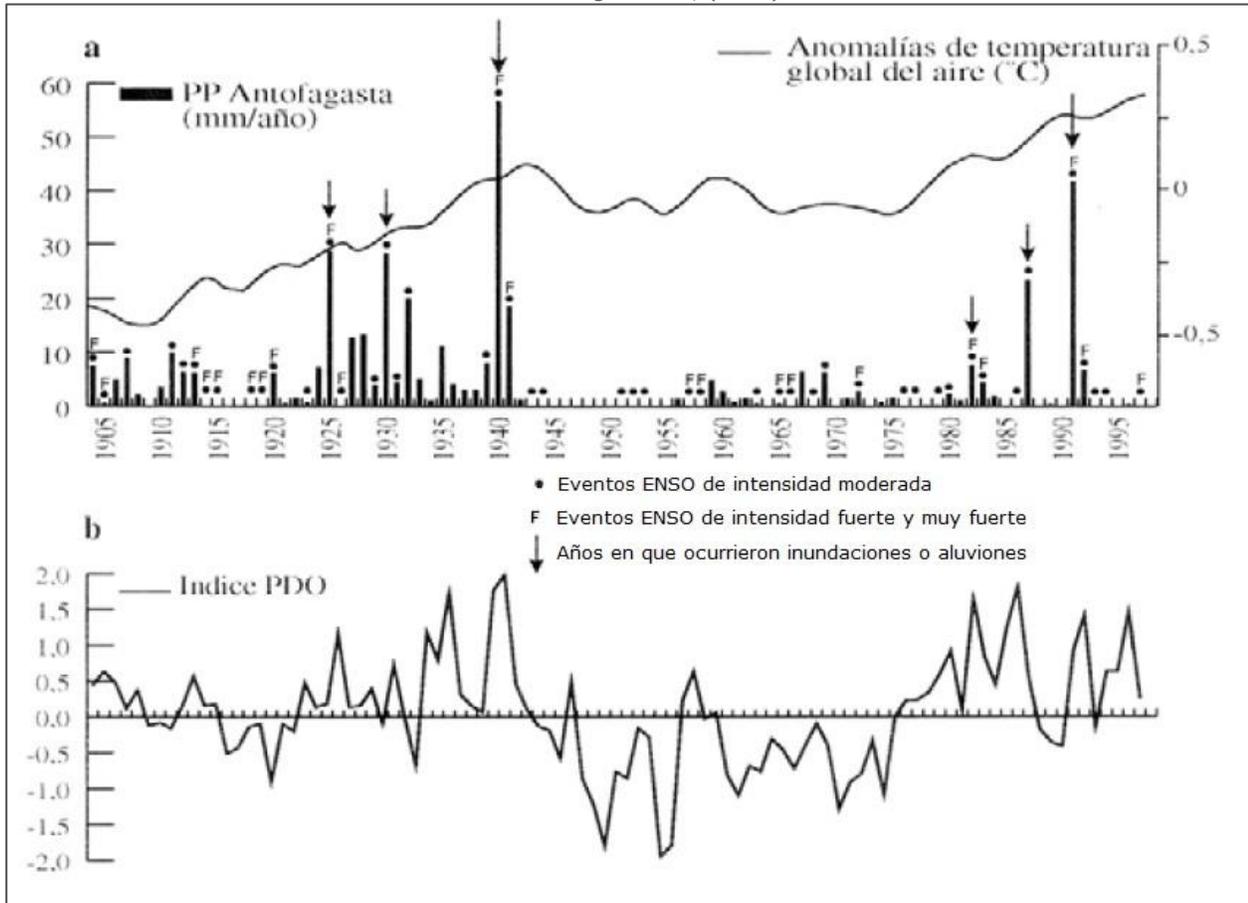
2.2.2. VARIACIONES INTERANUALES

En superposición a las variaciones cíclicas anuales, las condiciones atmosféricas exhiben fluctuaciones no regulares para varios rangos de tiempo, descritas a escala regional por Garreaud *et al.*, (2003) y de manera general para el clima sudamericano por Garreaud *et al.*, (2009). A escala submensual se observan variaciones periódicas casi semanales, asociadas a perturbaciones de latitud media ocasionadas por la inestabilidad de los flujos de la troposfera (Garreaud, et al., 2009). Fluctuaciones atmosféricas de mayor escala incluyen cambios intraestacionales (20-60 días), interanuales e interdecadales. Debido a cambios lentos impuestos por las condiciones de borde y que son transportadas a través de la atmósfera como flujos superficiales anómalos de calor, humedad y momentum. Estos cambios de escala regional o local son extendidos en el globo por la circulación atmosférica y eventualmente retroalimentan a la fuente original (Garreaud, et al., 2009). Las variaciones de frecuencia más baja se reúnen en unos pocos modos globales: ENOS, la Oscilación Decadal de Pacífico (ODP), la Alta Boliviana (AB), los Modos Anuales Árticos y Antárticos (AO y AAO), y la Oscilación de Madden-Julian (OMJ).

La Alta Boliviana (AB), es regulada por las ondas de Rosby emanadas por el Pacífico Sur y solo existe durante el verano del Hemisferio Sur a gran altura (200 hPa), generando precipitaciones en entre los 15-22°S sobre el Altiplano (Garreaud, et al., 2003). El modo anual antártico (AAO), o el Modo Anular del Hemisferio Sur, genera anomalías en las precipitaciones en el sur de Chile (40-60°S). La oscilación de Madden-Julian (OMJ), es la responsable de la variabilidad interestacional de las zonas tropicales y subtropicales (Garreaud, et al., 2009). La oscilación decadal de Pacífico (ODP) es comúnmente descrito de forma similar a ENOS, ya que tiene características espaciales, fases cálidas y frías similares a las de los eventos de El Niño y La Niña, respectivamente. Aunque, las causas del ODP y su conexión con ENOS no son bien comprendidas aún, se considera que El Niño es más intenso en la fase cálida del ODP y La Niña es más intensa en la fase fría (Garreaud, et al., 2009), como se observa en las Ilustración 2.2-2 y la Ilustración 2.2-3. Estos últimos 2 (ENOS y ODP), son los que tienen mayor influencia en el régimen lluvioso del área de estudio, por este motivo son explicados en mayor detalle a continuación.

Ilustración 2.2-2: Ocurrencia de ENOS y ODP en Antofagasta durante el siglo XX.

Fuente: Vargas *et al.*, (2000).



2.2.2.1. El Niño Oscilación del Sur (ENOS)

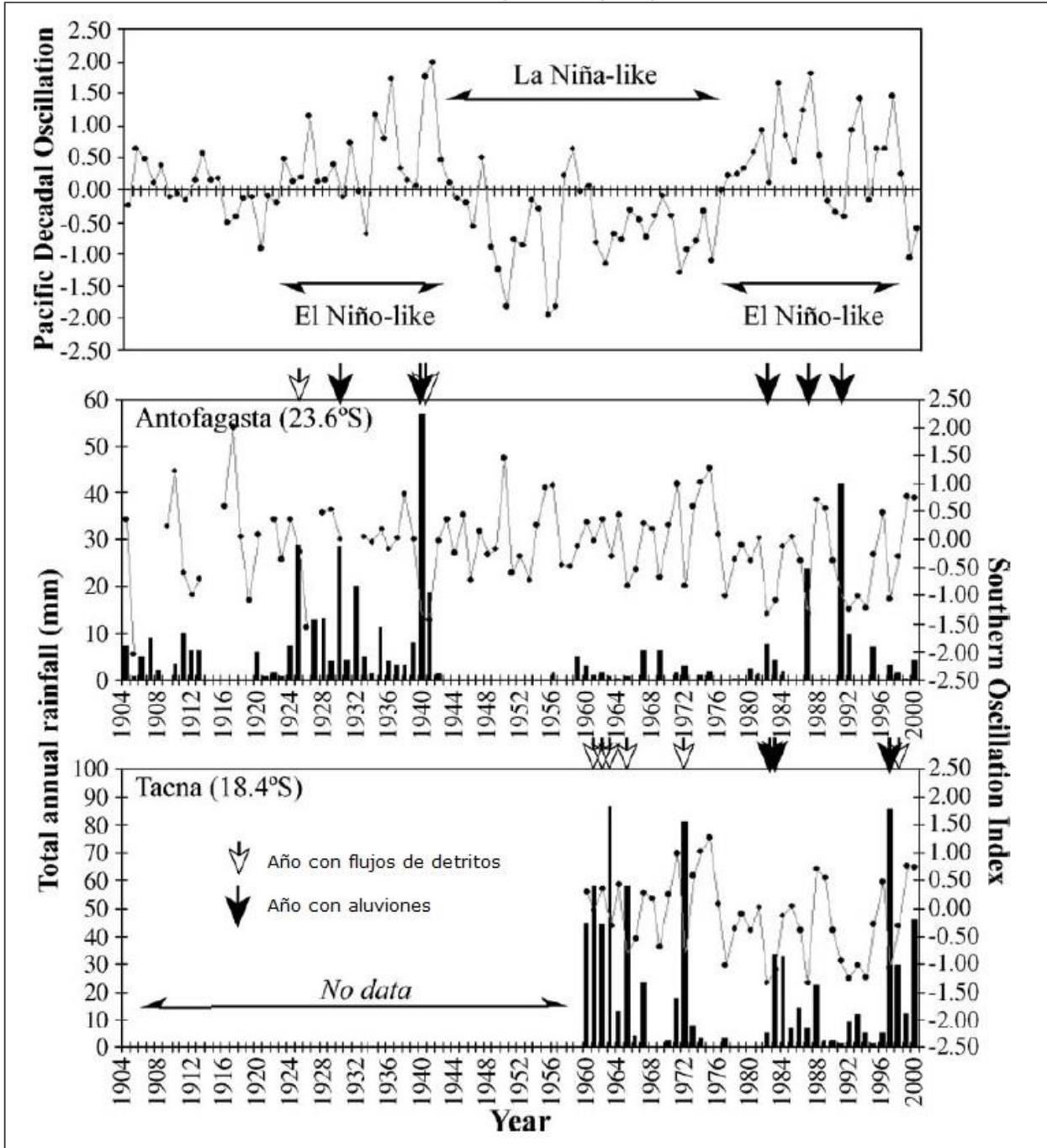
ENOS, según Vargas *et al.*, (2006) es un modo oscilatorio de variabilidad interanual del clima inherente al Océano Pacífico tropical, que involucra grandes anomalías clima-océano durante sus fases extremas cálidas (El Niño) y frías (La Niña), con vastas consecuencias socio-económicas en muchas regiones de La Tierra. Por estos motivos, los mecanismos físicos relacionados a la variabilidad climática de ENOS, su evolución pasada y su proyección futura reciben mucha atención y son materia de discusiones en desarrollo.

El Océano Pacífico tropical forma la fuente de las inestabilidades climáticas relacionadas a ENOS por lo que las costas de Ecuador y el norte del Perú reciben los impactos más severos cuando se desarrollan fases maduras de El Niño, con episodios de lluvias cuantiosas. Estos episodios se relacionan a una debilitación de la circulación de Walker en el Pacífico y a una fuerte elevación de la temperatura superficial del mar (TSM), que llevan a inundaciones,

aluviones y flujos de detritos. Cuando una fase de El Niño ocurre durante el invierno-primavera austral, las teleconexiones climáticas tropicales o extratropicales producen precipitaciones anómalas en Chile Central y subtropical, que en tiempos históricos han sido más dañinas durante el siglo XIX y durante siglo XX. Especialmente este último siglo, que ha sido más cálido, que los anteriores.

Ilustración 2.2-3: Comparaciones entre ENOS y ODP en Antofagasta (norte de Chile) y Tacna (sur de Perú).

Fuente: Vargas *et al.*, (2006)



Los flujos de detritos y aluviones históricamente documentados a lo largo de la costa sur de Perú han ocurrido en diferentes estaciones y fases del ciclo ENOS, como se muestra en la Ilustración 2.2-3. Sugiriendo que los eventos lluviosos fuertes, sin importar su intensidad, tienden a ocurrir durante El Niño en el verano o en el invierno-primavera australes, aunque en esta última, pueden ocurrir dentro de cualquier fase del ciclo ENOS, que es consistente con el máximo lluvioso de Septiembre para el sur de Perú. En el norte de Chile, flujos de detritos asociados a lluvias fuertes ocurridas en el invierno austral coinciden con el desarrollo de la fase cálida de ENOS: El Niño (Mayo 1982, Julio 1987 y Junio 1991).

La correlación entre estos eventos lluviosos y la formación de aluviones o flujos de detritos es tan fuerte, durante los siglos XIX y XX, que permite crear relaciones cronoestratigráficas y estimar implicancias paleoclimáticas de los depósitos Holocenos (Vargas, et al., 2000; Vargas, et al., 2006). Aunque Ortlieb *et al.*, (2002) indica que esta correlación solo tiene una mayor consistencia a partir de 1817, debido a la existencia de un mejor registro y posiblemente porque antes de ese año las teleconexiones tendrían patrones de comportamiento diferentes.

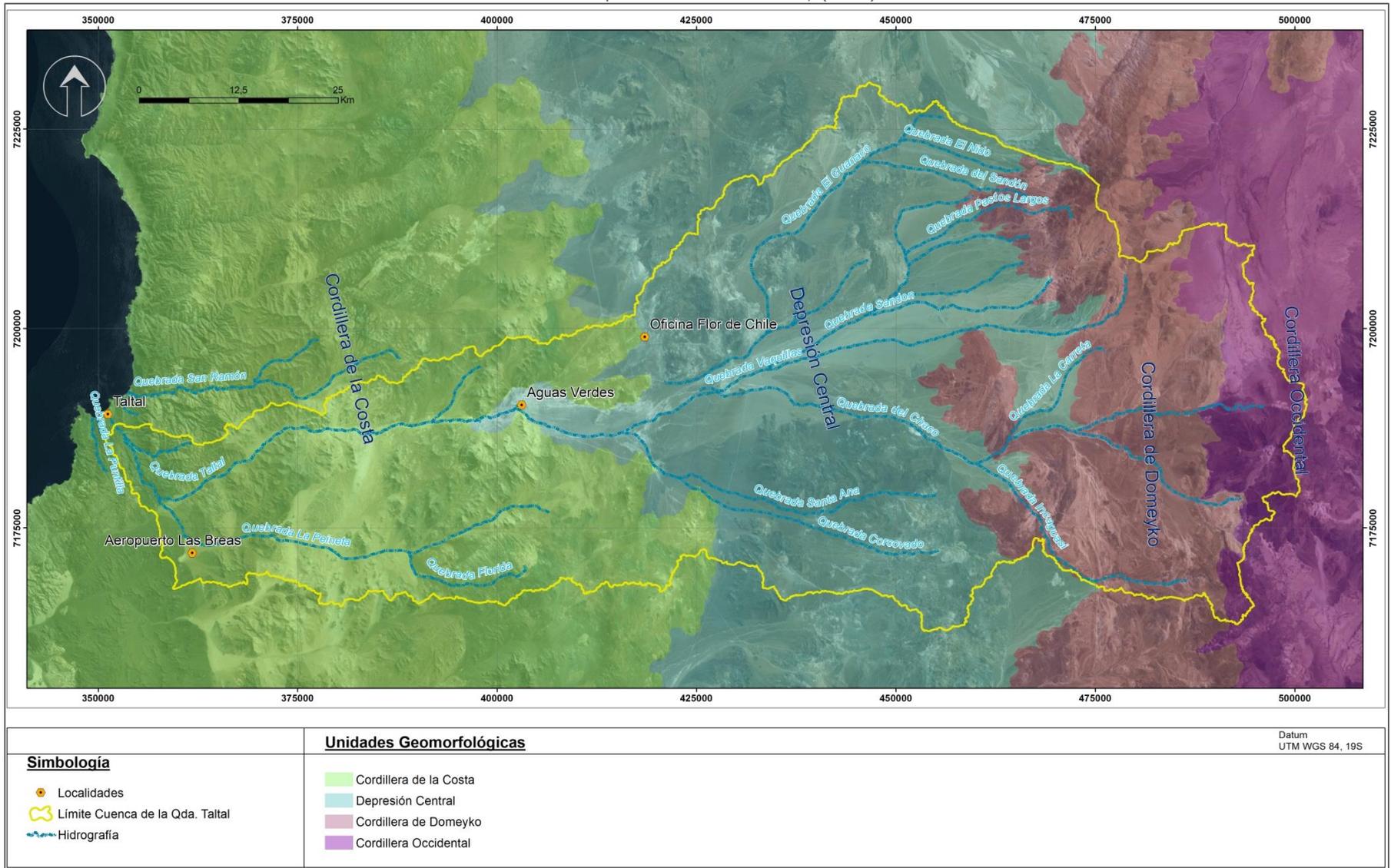
2.3. Geomorfología de la Cuenca

A nivel regional destaca la existencia de dos importantes cordones cordilleranos de orientación NS, separados por una depresión con la misma orientación (Amilibia, et al., 2008), como se observa en la Ilustración 2.3-1. Para realizar una descripción de estas unidades geomorfológicas que se ajuste al área de la cuenca de la quebrada Taltal, se tomaron medidas aproximadas de Google Earth (2016), encontrando lo siguiente:

- De oeste a este, el primer cordón, corresponde a la **Cordillera de la Costa [CC]**, que en la zona de estudio tiene entre 65 y 80 Km de ancho, se engrosa hacia el sur y se presenta con cumbres entre los 600 a 2000 m s.n.m., las mayores alturas se alcanzan hacia el este de esta cordillera y van decreciendo a medida que se avanza hacia el oeste.
- La **Depresión Central [DC]**, entre ambas cordilleras, se extiende como una llanura amplia, de unos 30 a 70 Km de ancho, que se angosta hacia el sur, con una pendiente suave ($<1^\circ$) e inclinada hacia el oeste y su base se encuentra a una altura de 1800 m s. n. m., en los alrededores de Aguas Verdes. Dentro de esta llanura sobresalen sierras con cerros de pendiente moderada.
- El segundo cordón corresponde a la Precordillera y la Cordillera Occidental. La Precordillera, en esta región, es conocida también como **Cordillera de Domeyko [CD]** (Amilibia, et al., 2008) y dentro del área de estudio se presenta con 20 a 40 Km de ancho y cumbres entre los 3000 y 4400 m s. n. m. La **Cordillera Occidental [CO]**, corresponde a la ubicación del arco magmático activo (Amilibia, et al., 2008) conformado principalmente por morfologías volcánicas, y sus cumbres alcanzan entre 4500 y 5000 m s. n. m. dentro de la cuenca, y pueden llegar hasta los 6600 m s. n. m. en la región, como el caso del Volcán Lullailaco. Este arco, corresponde a una franja norte sur de 100 a 140 Km de ancho, pero dentro del área de estudio solo se observan los primeros 5 a 15 Km del flanco occidental.
- La cuenca de la Quebrada de Taltal fluye de este a oeste. Su red de drenaje nace desde la Cordillera de Domeyko por el norte y desde la Cordillera Occidental por el sur, formando profundas quebradas (50-120 m) en la zona oriental de la cuenca, que confluyen en la localidad de Aguas Verdes y al norte del Aeropuerto Las Breas.

Ilustración 2.3-1: Principales rasgos morfológicos presentes en la cuenca de la Quebrada Taltal.

Fuente: Adaptación de Amilibia *et al.*, (2008).



2.4. Marco Geológico y Estructural de la Cuenca

El mapa geológico de la cuenca de la Quebrada Taltal que se observa en la Ilustración 2.4-1 se construyó como una simplificación de la Hoja Taltal y Chañaral elaborada por Naranjo y Puig (1984). Las definiciones de las unidades litológicas fueron tomadas del informe que acompaña la carta mencionada. También se han actualizado las edades de algunas unidades según la Carta Cronoestratigráfica Internacional (Cohen, et al., 2015), cuando corresponde. Para facilitar la lectura, a continuación se presenta un resumen de las litologías agrupadas por edades e indicando su ubicación en el área de estudio de escala regional. Para mayor detalle sobre estas unidades, sus relaciones de contacto, definiciones, dataciones, ambiente de formación y evolución tectónica, se recomienda consultar el Anexo G: Marco Geológico Regional (al final) o la misma carta mencionada.

A modo de resumen, se destaca la amplia presencia de las Gravas de Atacama y de los Depósitos Aluviales y Coluviales modernos, que al no encontrarse consolidados, se convierten en material disponible de ser arrastrado aguas abajo a través de las quebradas que confluyen en la quebrada Taltal. Por otro lado, la estabilidad de las laderas formadas por estas y otras unidades se encuentra poco estudiada y se desconoce su grado de respuesta ante terremotos o lluvias intensas debido a las condiciones de extrema aridez en la región, por lo que se considera que también aportan, en menor grado, materiales susceptibles de ser arrastrados por la red de drenaje hasta la ciudad.

2.4.1. UNIDADES ESTRATIFICADAS

UNIDADES PALEOZOICAS

En la Cordillera de la Costa se observan areniscas y lutitas estratificadas con metamorfismo de bajo grado y espesor desconocido, correspondientes a la Formación Las Tórtolas. En la Cordillera de Domeyko se encuentran metacuarcitas y filitas micáceas de espesor desconocido pertenecientes a los Estratos de Cerro del Medio y también, lavas riolíticas y andesíticas con brechas y tobas de 1000 a 1700 m de espesor, pertenecientes a la Formación La Tabla.

El Grupo Plutónico Cifuncho se presenta en la Cordillera de la Costa, como rocas plutónicas de grano grueso, leucocráticas, con composición sieno y monzogranítica, intruyendo a los estratos de la Formación Las Tórtolas. El Grupo Plutónico Punta del Viento, en la Cordillera de Domeyko, corresponde a granodioritas y sienogranitos que intruyen a la Formación La Tabla.

UNIDADES TRIÁSICAS

Corresponden a conglomerados de areniscas con intercalaciones de andesitas, con 700 a 1000 m de espesor, ubicados en la Cordillera de Domeyko, que pertenecen a la Formación Quebrada del Salitre.

UNIDADES JURÁSICAS

En la Cordillera de la Costa se encuentran lavas andesíticas basálticas con intercalaciones de brechas y rocas sedimentarias, con más de 5000 m de espesor, correspondientes a la Formación La Negra. En la Cordillera de Domeyko se observa la Formación Candeleros formada por tres miembros: lavas andesíticas en almohadillas, calizas y lavas andesíticas, sumando unos 3500 m de espesor y la Formación El Profeta formada por areniscas, conglomerados y calizas, con más de 1200 m de espesor.

El Grupo Plutónico Matancilla se emplaza en la Cordillera de la Costa, es compuesto por granodioritas y tonalitas con variaciones monzodioríticas y graníticas. Intruye a las formaciones Las Tórtolas y La Negra.

UNIDADES CRETÁICAS

La Formación Aeropuerto, se encuentra en la Cordillera de la Costa y se compone de rocas sedimentarias clásticas con intercalaciones de lavas andesíticas y calizas, con 1000 a 3000 m de espesor. La Formación Santa Ana, en la Cordillera de Domeyko, corresponde a una secuencia de lutitas y areniscas fosilíferas, con intercalaciones de andesitas, brechas y tobas, con un espesor mayor a los 1000 m.

El Grupo Plutónico Cerro del Pingo se encuentra en la Cordillera de la Costa. Consiste en dioritas, granodioritas y cuarzo monzonitas, e intruye a las formaciones Las Tórtolas y Aeropuerto y al Grupo Plutónico Cifuncho. Los Pórfidos de Pampa Mirador, se encuentran en la Depresión Central, son de composición riolítica, con masa fundamental félsica y cristales de cuarzo, plagioclasas, biotita y anfíbol, e intruyen al Grupo Plutónico Cifuncho y a la Formación Aeropuerto. Los Pórfidos Sandón e Incahuasi, son de composición andesítica a diorítica, con variaciones granodioríticas y gabroicas, e intruyen a las Unidades Jurásicas y Cretácicas de la Cordillera de Domeyko.

UNIDADES PALEÓGENAS

En la Depresión Central, se encuentra un conjunto de lavas y piroclastos, de origen volcánico, con composición andesítica a dacítica, con basaltos y riolitas subordinadas, con 700 a 1000 m de espesor, pertenecientes a la Formación Chile – Alemania.

UNIDADES MIOCENAS

Principalmente dentro de la Depresión Central se encuentran depósitos polimícticos de gravas no consolidadas intercaladas por flujos ignimbríticos con mayor desarrollo hacia el este, de 50 a 150 m de espesor, correspondientes a las Gravas de Atacama. En la Cordillera de Domeyko se encuentran flujos ignimbríticos subhorizontales, compuestos por aglomerados y tobas de variada composición de 55 m de espesor, correspondientes a las Ignimbritas Miocenas que se intercalan con las Gravas de Atacama hacia el oeste. También en la Cordillera de Domeyko se encuentran varios edificios volcánicos, principalmente andesíticos y dacíticos, con 600 a 1000 m de altura desde su base, correspondientes a los Grupos Volcánicos Miocenos.

UNIDADES MODERNAS

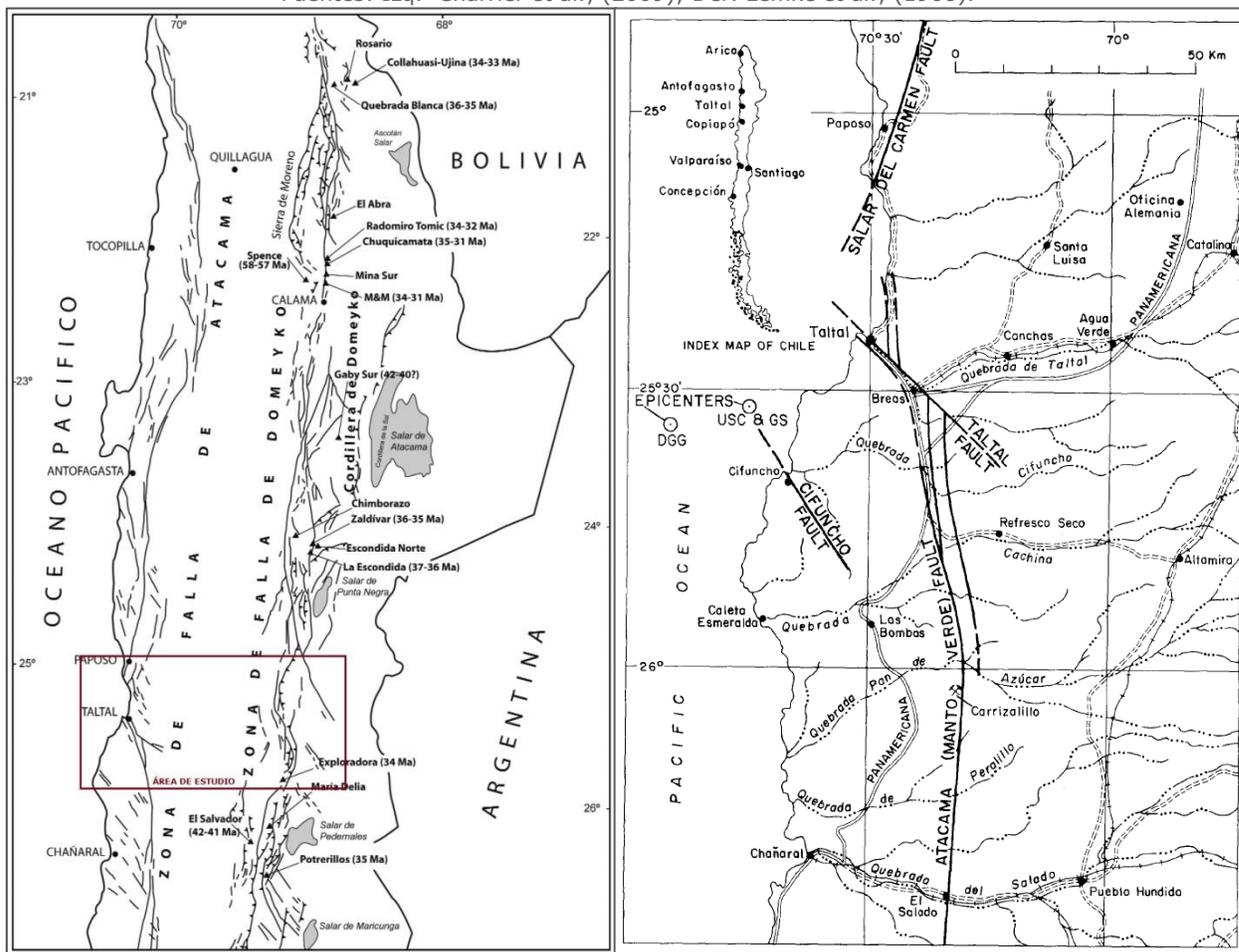
En la Depresión Central se reconocen calizas estatificadas y microesparíticas con niveles de limos y dolomitas con clastos andesíticos, de hasta 45 m de espesor, correspondientes a los Estratos de Pampa Margarita. También se reconocen nitratos, cementando el material aluvial, que pertenecen al Cinturón de Nitratos del norte Chile y definidos como Depósitos Salinos. Además, a lo largo de toda la zona de estudio se reconocen Depósitos Aluviales y Coluviales Modernos, que consisten en gravas, arenas y limos, no consolidados, que se depositan en los faldeos de las laderas y rellenando quebradas.

2.4.2. ESTRUCTURAS

En la zona de estudio existen dos familias principales de estructuras: el **Sistema de Fallas de Atacama [SFA]** y el **Sistema de Fallas de Domeyko [SFD]**, responsables de la formación del relieve actual de la zona (Charrier, et al., 2009), como se observa en la Ilustración 2.4-2 (Izquierda).

Ilustración 2.4-2: Mapas estructurales esquemáticos.

Fuentes: Izq. Charrier *et al.*, (2009); Der. Lemke *et al.*, (1968).



SISTEMA DE FALLAS DE DOMEYKO

La principal estructura de esta familia es una falla inversa al W de la cordillera de Domeyko, que eleva sobre las unidades mesozoicas a las unidades paleozoicas presentes en esta cordillera (ver Ilustración 2.4-1: Unidades geológicas en la cuenca de la Quebrada Taltal e Ilustración 2.4-2 Izq.). Es una falla sinuosa y su rumbo varía entre N30°E a N5°W, manteniendo con 25-30° al E, que se presenta en el tramo norte de la Cordillera de Domeyko, dentro del área de estudio, formando una estructura de 'horst' (Naranjo & Puig, 1984). Al sur de la Quebrada Chaco Sur, desaparece el 'horst' como unidad estructural y en este sector existe una falla inversa que pone en contacto las unidades triásicas y paleozoicas con las unidades jurásicas y cretácicas (Naranjo & Puig, 1984). La unidad más joven afectada por esta falla inversa corresponde a los niveles superiores de la Formación Santa Ana [Ksa] (Cretácico Superior), por lo que se infiere que el alzamiento de la Cordillera de Domeyko se produjo en el Paleógeno (Naranjo & Puig,

1984; Amilibia, et al., 2008), previamente a la formación de las Gravas de Atacama [Mga].

SISTEMA DE FALLAS DE ATACAMA

El SFA se encuentra en la Cordillera de la Costa, tiene una orientación general NS, y se extiende a lo largo del norte de Chile desde Iquique hasta La Serena. Se divide en dos tramos cóncavos hacia el oeste, que convergen entre Taltal y Paposo. También se subdivide en diversos segmentos con respecto a fallas subsidiarias. En la zona de estudio la SFA es representada por dos segmentos: **Quebrada El Hueso** y **El Salado**, separados por la **falla transversa Taltal** (Arabasz, 1968; Naranjo & Puig, 1984) (ver Ilustración 2.4-1: Unidades geológicas en la cuenca de la Quebrada Taltal).

El segmento del Hueso presenta rocas de falla en su borde oriental y constituye una prolongación hacia el norte del segmento El Salado, desplazado hacia el oeste por la falla de Taltal (Naranjo & Puig, 1984). Las fallas de este segmento presentan una disposición subvertical y cinemática de rumbo sinistral y edad de movimiento Cretácico Inferior (Escribano, et al., 2013).

En la Ilustración 2.4-2 (Derecha), el segmento El Salado, es representado como el Segmento Manto Verde y se observa también la **Falla Salar del Carmen**, otro segmento del Sistema de Fallas de Atacama que se proyecta por varios kilómetros hacia el norte, pero en este sector, se proyecta hacia el SSE mar adentro, cerca de Paposo (Lemke, et al., 1968), con cinemática de rumbo sinistral y edad de movimiento Jurásico Inferior—Cretácico Inferior, con reactivaciones en el Mioceno—Plioceno en el sector de Paposo (Escribano, et al., 2013), de manera similar al Segmento El Salado, que posee en este sector 2 trazas de fallas secundarias una al oeste y otra al este. La traza occidental corresponde a la **falla Aguada Chépica** (ver Ilustración 2.4-1), con rumbo N10°W y manto 85°E, en esta zona se arquea hacia el W en dirección a Taltal, poniendo en contacto a la Formación Aeropuerto [Ka] con la Formación La Negra [Jln]. La traza oriental es múltiple y se extiende hacia el sur por más de 55 km, con rumbo N15°W, poniendo en contacto a la Formación Aeropuerto con la Formación Las Tórtolas y los grupos plutónicos Cifuncho y Cerro del Pingo.

La Falla Taltal, es una falla oblicua, que corta y desplaza el SFA, se reconoce por unos 35 Km desde Taltal hacia el SE, tiene un rumbo N50°W con manto subvertical, poniendo en contacto a la Formación Aeropuerto [Ka] con la

Formación Las tórtolas [PZt] y el Grupo Plutónico Cerro del Pingo [Kgcp]. Esta es una falla de rumbo que desplaza sinistralmente, por 8 km, a la traza oriental del SFA (Naranjo & Puig, 1984) y la edad sugerida para este sistema de fallas es posterior al Cretácico Inferior (Escribano, et al., 2013). Además, se indica que hubo un alzamiento diferencial del bloque NE con respecto al bloque SW, debido a las marcadas diferencias entre las litologías, edades y grado de erosión entre ambos bloques (Escribano, et al., 2013).

Después del sismo de 1966 (magnitud 7,8 Ms), según Álvarez *et al.*, (1967) no se observaron movimientos de importancia en las fallas, ni desplazamientos de los planos de falla. Sin embargo, se observaron fracturas a lo largo de la falla Taltal y de los segmentos de la SFA hacia la zona del Aeropuerto Las Breas, principalmente afectando el relleno aluvial (Ilustración 2.4-3). En la falla Taltal se encontraron numerosas fracturas abiertas de 3 a 20 m de largo y de 1 a 4 cm de ancho en tres sistemas principales y movimientos en fracturas preexistentes, detalladas en la Tabla 2.4-1. La presencia de estas fracturas puede ser un indicador de planos de debilidad que puedan generar superficies de ruptura para la formación de remociones en masa, por esta razón las la cercanía a las zonas de falla se considera como un factor condicionante.

Ilustración 2.4-3: Fracturas en la zona del Aeropuerto Las Breas.

Fuente: Álvarez *et al.*, (1967)



Tabla 2.4-1: Fracturas registradas en la Falla Taltal después del terremoto de 1966.

Fuente: Álvarez *et al.*, (1967).

Estructura	Rumbo preferencial	Alineación	Efecto	Litología Afectada
Fractura abierta	N40°W	Paralela	Abertura	Relleno Aluvial
Fractura abierta	N65°W	Oblicua	Abertura	Relleno Aluvial
Fractura abierta	N30°W	Oblicua	Abertura	Relleno Aluvial
Fractura preexistente	N05°W	Oblicua	Desplazamiento	Roca

ESCARPE COSTERO

Aparece de forma discontinua bordeando la línea de costa en esta región, se interpreta como un elemento geomorfológico mayor, derivado de la erosión de un escarpe de falla normal con orientación NS. Este escarpe ha tenido un retroceso progresivo hacia el este, debido a la erosión marina costera (Naranjo & Puig, 1984). En una visita a terreno León (2014) observa que este acantilado aflora al norte y al sur de la bahía de Taltal, conformando un escarpe inactivo, ya que existen terrazas marinas que se interponen entre la ladera y la orilla del mar. El talud de este escarpe varía al alejarse de la costa, de inclinación subvertical a 50-60°, y su altura varía entre 550 m s. n. m. al norte de la bahía y 220 m s. n. m. al sur.

2.5. Marco Geológico y Geomorfológico del Área Urbana

Este marco geológico y geomorfológico contempla el área de estudio de estudio local, a escala 1:5.000 y el área de estudio intermedia, de escala 1:20.000, que se utilizó de manera auxiliar. Para la descripción de las unidades geológicas a escala intermedia se utilizan las Cartas de Bahía Isla Blanca y Taltal (Escribano, *et al.*, 2013) a escala 1:100.000, ya que presenta actualizaciones con respecto al trabajo de Naranjo y Puig (1984) y el mapa se puede observar en la Ilustración 2.5-1. Por otro lado, la descripción de las unidades geológicas y geomorfológicas a escala local se realiza a partir del reconocimiento de las unidades descritas por Escribano *et al.*, (2013) durante la visita a terreno, añadiendo las observaciones realizadas y la definición de nuevas unidades morfológicas. Este mapa geológico local se presenta en la Ilustración 2.5-2 y a continuación, se presentan las descripciones de las unidades definidas por Escribano *et al.*, (2013) y de las unidades observadas a escala local.

Ilustración 2.5-1: Mapa geológico de escala intermedia.

Fuente: Adaptación de Escribano *et al.*, (2013)

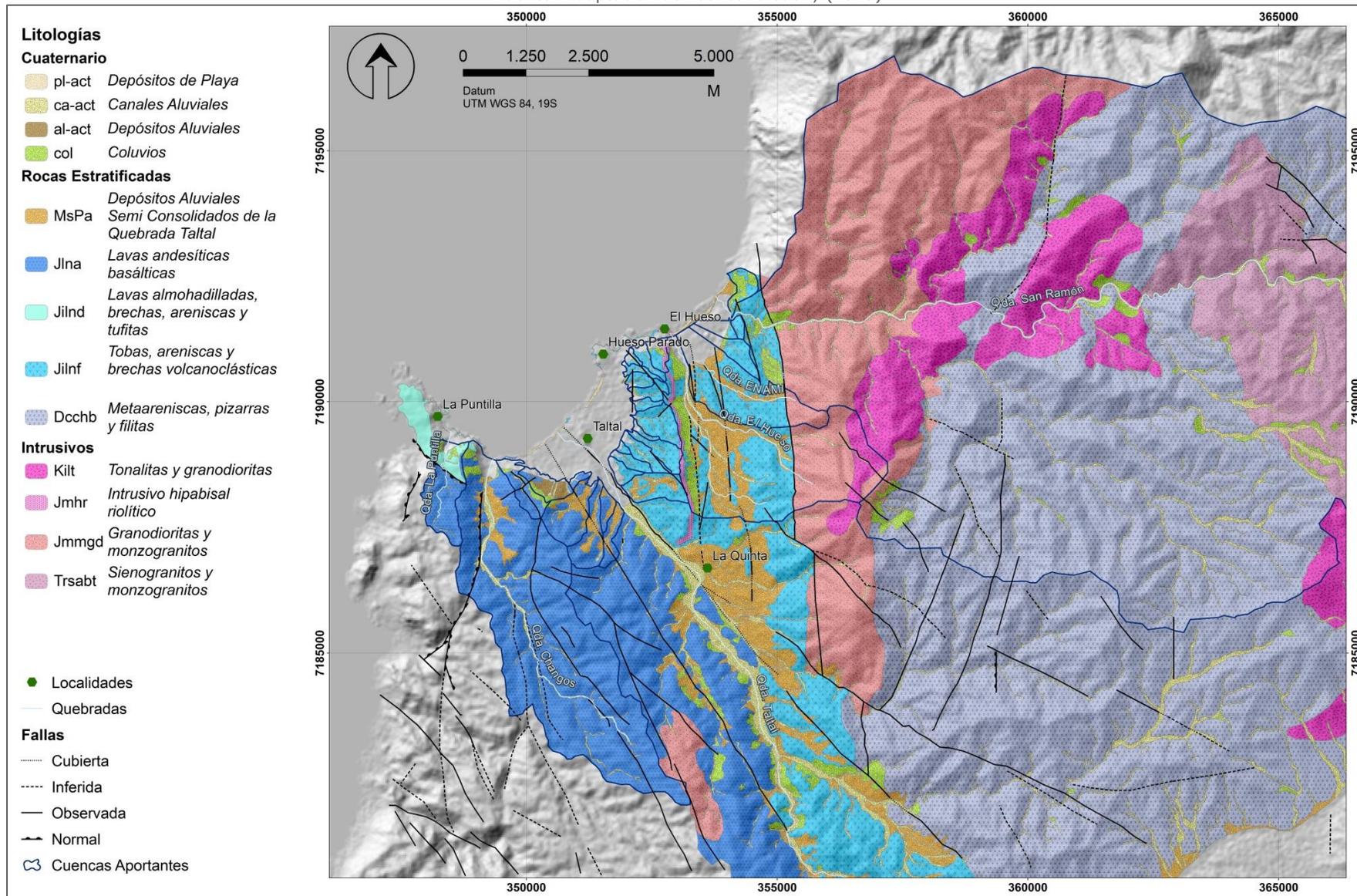
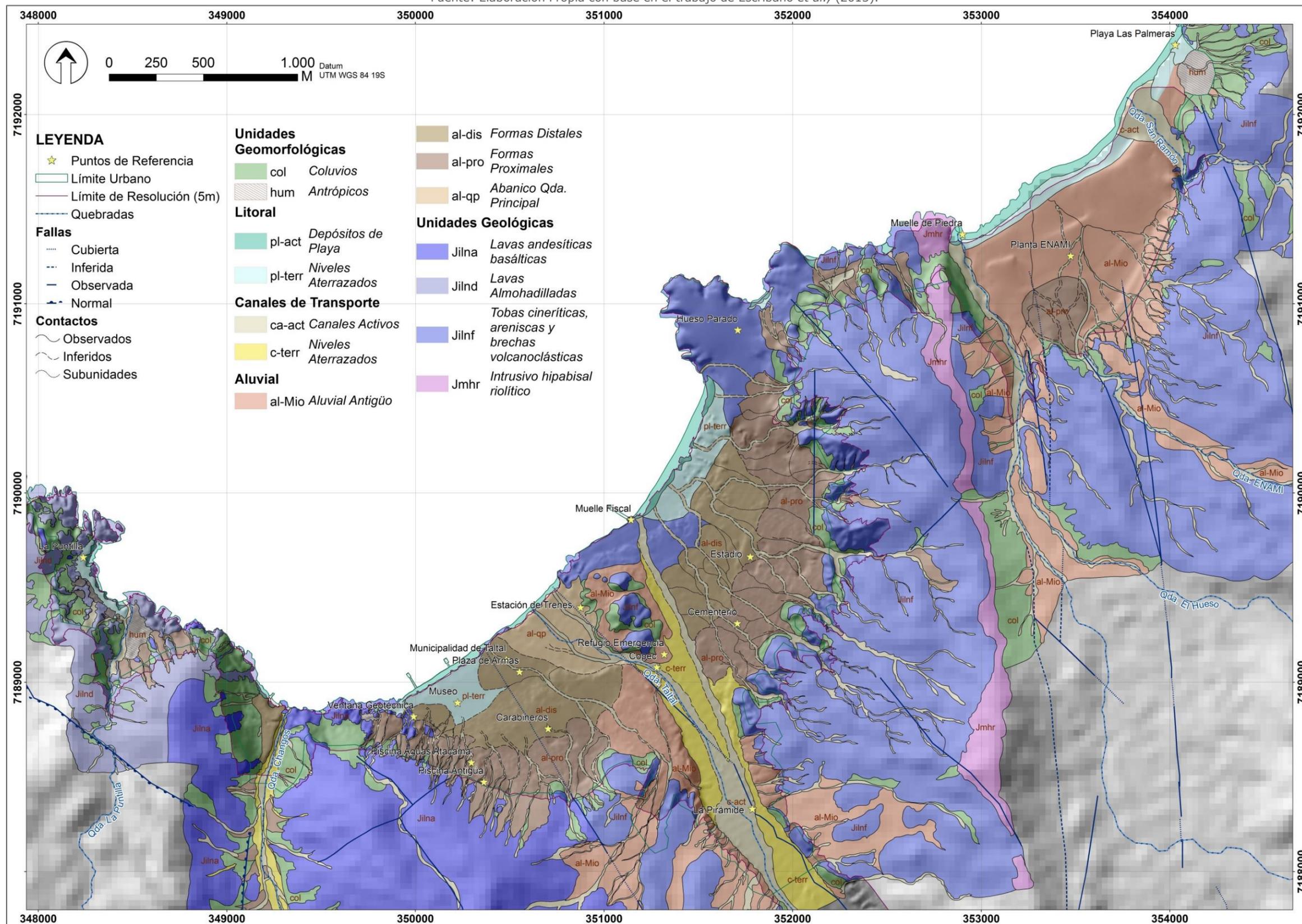


Ilustración 2.5-2: Mapa geológico de Taltal a escala local.

Fuente: Elaboración Propia con base en el trabajo de Escribano *et al.*, (2013).



2.5.1. UNIDADES PALEOZOICAS

Metaareniscas, pizarras y filitas [Dcch(b)]. Pertenecientes al Complejo epimetamórfico de Chañaral. Afloran en las zonas altas de las quebradas San Ramón y El Hueso, al este de la Ilustración 2.5-1. Corresponden principalmente a intercalaciones de estratos de pizarras, filitas, metaareniscas y cuarcitas con foliación paralela a su estratificación. Cubierta en discordancia por la Formación La Negra y es intruída por el complejo intrusivo Matancilla [Jmm(gd)], las granodioritas de Tipias [Kilt] y por intrusivos hipabisales Jurásicos [Jmh(r)] (definidos en los puntos siguientes).

2.5.2. UNIDADES JURÁSICAS

Dentro y en las cercanías del límite urbano de Taltal, se reconocen a las formaciones La Negra y Aeropuerto, descritas en el punto 2.4.1, de este capítulo. Pero, en el trabajo más reciente de Escribano *et al.*, (2013) el área de Formación Aeropuerto (Cretácica) ha sido relegada a una zona más cercana al aeropuerto de Las Breas y al este de la Cordillera de la Costa. Según los autores, este cambio se debe que dataciones U-Pb de esta unidad en la Quebrada Taltal a 3 Km de la ciudad, le asignan una edad mínima Jurásica Superior (Kimmerigdiano – Tithoniano). Por lo que las rocas definidas como la Formación Aeropuerto para el contexto regional, son redefinidas como una de las asociaciones de facies de la Formación La Negra para el contexto del área de estudio local. Entonces, según Escribano *et al.*, (2013) se reconocen tres asociaciones de facies de la Formación La Negra [Jiln] y dos cuerpos intrusivos Jurásicos [Jm] de edad jurásica.

1. Lavas andesíticas y andesíticas basálticas [Jiln(a)].

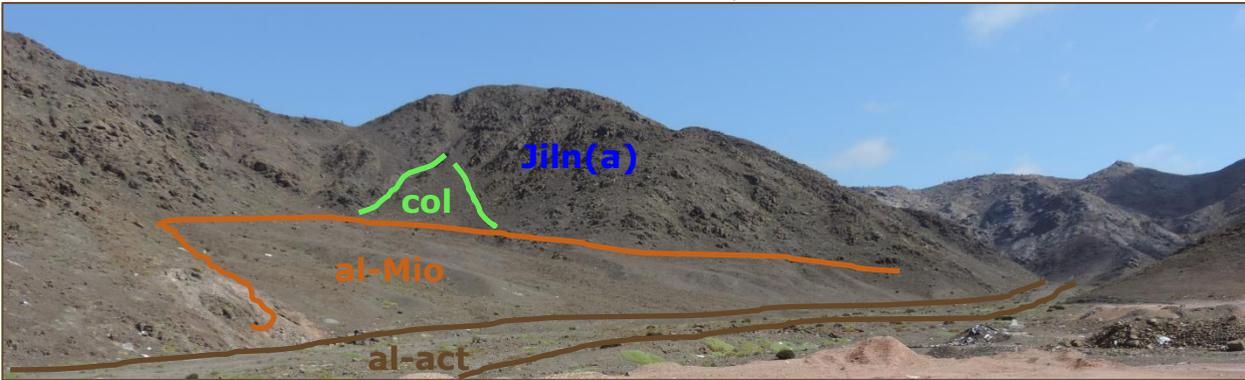
Las rocas del primer miembro de la Formación La Negra afloran al SE de la Quebrada Taltal y de la ciudad, rodeando el borde costero. En este sector su techo se encuentra en contacto con la asociación de facies [Jilnf] (descritas más adelante en este punto). Corresponden a flujos de lavas bien estratificados de 5 a 10 m de espesor de colores pardos, morados y verdosos con escasa intercalaciones de areniscas (Escribano, et al., 2013).

En la Ilustración 2.5-3 se observa una vista hacia el sur de la Quebrada Changos en la que se observa el primer miembro de la Formación La Negra [Jiln(a)] en contacto erosivo y parcialmente cubierta por los depósitos coluviales y los depósitos aluviales antiguos [al-Mio] (que se describen en el punto 2.5.4). Hacia el interior de la quebrada los afloramientos de esta

formación se encuentran más suavizados que en la costa, con laderas de unos 30° de pendiente.

Ilustración 2.5-3: Vista al S dentro de la Quebrada Changos.

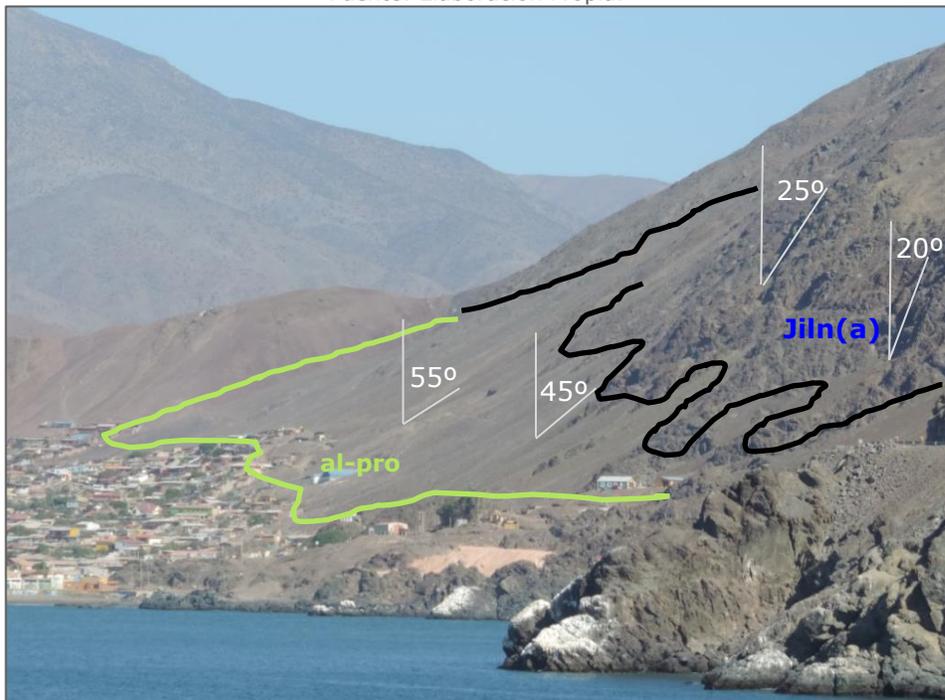
Fuente: Elaboración Propia.



En la Ilustración 2.5-4, se observa una vista hacia el E de la ladera que bordea el área urbana de Taltal por el SW. En este lugar el primer miembro de la Formación La Negra aflora como un macizo rocoso de unos 200 m de altura. En las zonas más altas las paredes rocosas afloran con una pendiente de 65-70° y los faldeos, formados por depósitos aluviales proximales [al-pro] (descritos en el punto 2.5.5), que se posan con una pendiente de 45-55°.

Ilustración 2.5-4: Vista al E de la ladera SW de Taltal.

Fuente: Elaboración Propia.

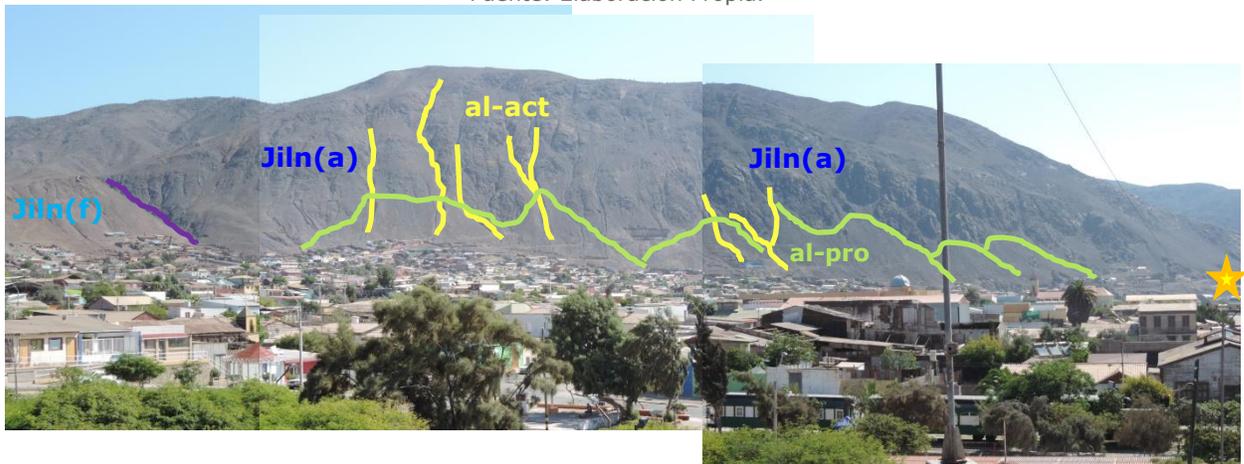


Esta ladera se encuentra en contacto erosivo con numerosos canales de transporte y acumulación [al-act] (descritos en el punto 2.5.5) formando nuevos abanicos aluviales o conos de deyección que inciden a las formas aluviales más antiguas, tal como se observa en la Ilustración 2.5-5. En la misma ilustración se destaca en morado, el contacto del miembro A con el miembro F de la Formación La Negra, a través de la falla Taltal.

En el Anexo C: Terreno, se observa un acercamiento del afloramiento rocoso en el punto señalado con una estrella (★) a la derecha de la Ilustración 2.5-5. En este lugar se realizó una ventana geotécnica, en la que se estimó un RMR de 73, calificando el macizo rocoso como bueno.

Ilustración 2.5-5: Vista al S de la ladera al SW de Taltal.

Fuente: Elaboración Propia.



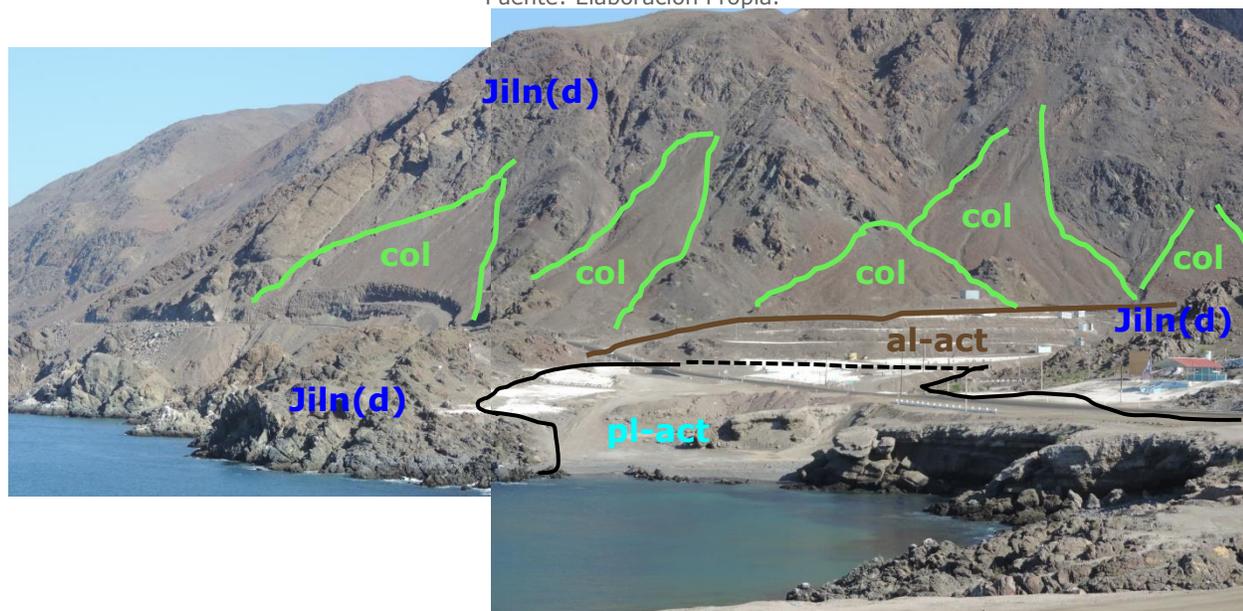
2. Lavas almohadilladas, brechas hialoclásticas y de manera subordinada areniscas y tufitas [Jiln(d)].

Afloran al SW de la ciudad de Taltal en quebradas que llegan hasta el mar. Corresponden a lavas de almohadillas y brechas hialoclásticas, las que en sectores presentan intercalaciones de finos estratos de areniscas y lutitas (Escribano, et al., 2013).

En la Ilustración 2.5-6 se observa la vista hacia el SE desde la Puntilla hacia la quebrada del mismo nombre. Donde se observan los estratos de lavas almohadilladas y brechas hialoclásticas del cuarto miembro de la Formación La Negra [Jiln(d)]. En este lugar, La Negra aflora en laderas abruptas de 40-45° formando el escarpe costero. Se encuentra en contacto erosivo y parcialmente cubierta por depósitos de playa [pl-act], y por canales aluviales [ca-act] y depósitos coluviales [col] (que se describen en el punto 2.5.5).

Ilustración 2.5-6: Vista al SE de la desembocadura de la Quebrada Puntilla.

Fuente: Elaboración Propia.



3. Lavas andesíticas y andesítico basálticas, tobas cineríticas, areniscas y brechas volcanoclásticas [Jiln(f)].

Anteriormente definidas como la Formación Aeropuerto, afloran al NW de la Falla Taltal, de la quebrada homónima y de la ciudad. Esta unidad parece estar dispuesta sobre y posiblemente engranando a la asociación de facies [Jilna]. Corresponden a lavas macizas, brechosas en sus bordes con intercalaciones de tobas líticas, areniscas finas a gruesas y brechas volcanoclásticas, que se exponen con colores pardos y morados (Escribano, et al., 2013).

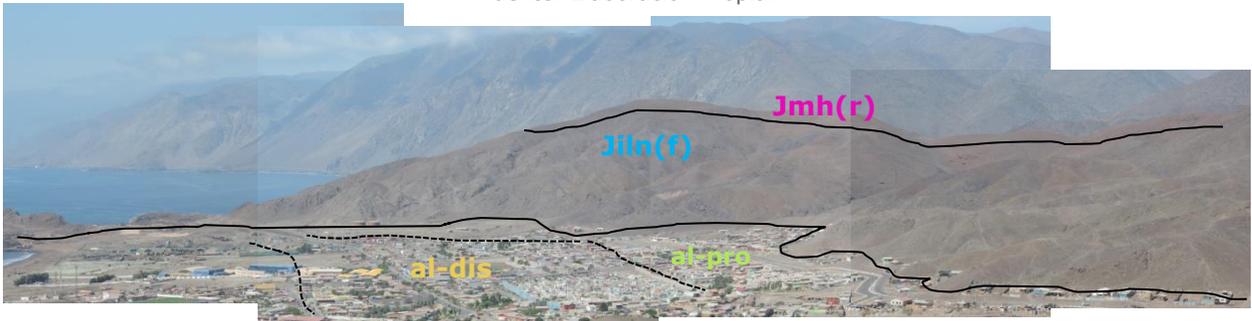
En la ladera NE de Taltal y en sector de El Hueso aflora el sexto miembro de la Formación La Negra [Jiln(f)], formando una sierra y el valle de la quebrada El Hueso, ambos con dirección NS. La sierra se alza entre la quebrada Taltal y Hueso Parado, separando la quebrada Taltal del valle de la quebrada El Hueso, hacia el NE. Por la cima de esta sierra aflora un intrusivo hipabisal riolítico [Jmh(r)], tal como se observa en la Ilustración 2.5-7.

En este sector las rocas volcánicas se encuentran intensamente meteorizadas, principalmente convertidas en suelo y aunque se observan afloramientos en los que es posible distinguir la roca y sus estructuras, esta se desgrana fácilmente al tacto. Consecuentemente, la red de drenaje en

este sector se encuentra mucho más desarrollada que en la ladera SW. El análisis de las FOTOS AÉREAS (punto 4.3) permite distinguir diferencias en la morfología debido a la erosión y depositación de sedimentos al interior de algunas quebradas, dejando en evidencia la actividad de los últimos 50 años en esta ladera, que también se observa en los depósitos aluviales [al-pro, al-dis] (que se describen en el punto 2.5.5).

Ilustración 2.5-7: Vista al NE de la ladera NE de Taltal.

Fuente: Elaboración Propia.



En el sector de la quebrada El Hueso, estos depósitos se encuentran parcialmente cubiertos por los depósitos aluviales Miocenos [al-Mio] y se encuentran profundamente surcados y suavizados por la red de drenaje. A excepción de la ladera NE de esta quebrada, que se alza unos 700m, paralela al segmento El Hueso del SFA presente en este sector y que separa este valle de la quebrada San Ramón.

En la desembocadura de la quebrada San Ramón, según Escibano *et al.*, (2013) se encuentran principalmente tobas de color gris y morado, que se disponen en estratos macizos de 3 a 5 m de espesor, compuestos principalmente por fragmentos líticos porfídicos, pómez y ceniza. Aspecto que lo diferencia del sector de la quebrada El Hueso, en que se observan lavas de colores pardos o morados. Estos macizos de toba se presentan con laderas abruptas y de alto ángulo (70°), que canalizan el flujo de la quebrada en un canal estrecho (4 m), como se aprecia en la Ilustración 2.5-8.

Ilustración 2.5-8: Vista al S de la desembocadura de la Qda. San Ramón.

Fuente: Elaboración Propia.



4. Facies de granodioritas y monzogranitos de piroxeno, biotita y hornblenda [Jmm(gd)].

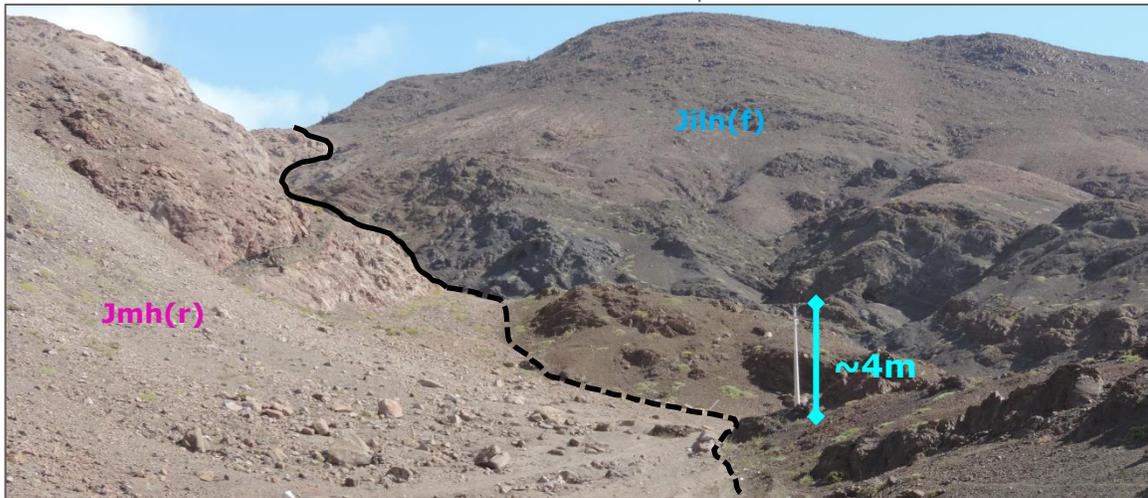
Pertencientes al Complejo Intrusivo Matancilla, anteriormente definida como grupo plutónico por Naranjo y Puig (1984). Se distribuye como una franja NS bordeando la costa al norte de la quebrada San Ramón hasta Paposo. Intruye a las rocas paleozoicas [Dcch(b)] ya mencionadas y a las rocas de la Formación La Negra. Es intruido a su vez por la Granodiorita Tipias [Kilt] y se encuentra parcialmente cubierto por depósitos cenozoicos.

5. Intrusivo hipabisal riolítico [Jmh(r)].

Emplazado al NW de la ciudad, en el sector de la Quebrada El Hueso. Corresponde a un intrusivo de emplazamiento somero y morfología elongada de dirección NS que se extiende hasta la Quebrada Taltal. Se encuentra intruyendo a lavas de las facies [Jilnf]. Corresponde a una roca porfídica de composición riolítica de color ocre pálido a anaranjado con cristales de cuarzo, feldespato y plagioclasa de 0,5-1 mm. En la Ilustración 2.5-9 se observa el contacto de esta unidad con el sexto miembro de la Formación La Negra en el sector de El Hueso.

Ilustración 2.5-9: Vista al SE del contacto entre el intrusivo y la Formación La Negra.

Fuente: Elaboración Propia.



2.5.3. UNIDADES CRETÁICAS

Tonalitas y granodioritas de anfíbol, biotita y piroxeno [Kilt]. Forman la Granodiorita de Tipias que afloran en la zona costera de la quebrada San Ramón. Intruye al intrusivo paleozoico [Dcch(b)] ya definido y al complejo Matancilla [Jmm(gd)].

2.5.4. DEPÓSITOS MIOCENOS

En la Quebrada Taltal y en la Quebrada El Hueso afloran abanicos aluviales individuales y coalescentes, en extensas planicies de baja pendiente cortadas por la red de drenaje actual. Estos depósitos son definidos por Escribano *et al.*, (2013) como **Depósitos Aluviales de la Quebrada Taltal [MsPa]**, de edad Miocena Superior – Pleistocena. Su espesor varía entre 15 a 5 m, a lo largo de la quebrada hacia la costa y se depositan en discordancia erosiva sobre las rocas de la Formación La Negra. Yacen paraconcordantes sobre las Gravas de Atacama, fuera del área de estudio local, rellenando parcialmente las quebradas formadas por la erosión de dichas gravas. En esta unidad se distinguen depósitos de gravas, arenas y limos con intercalaciones de cenizas y diversa proporción de sales. En general con mala estratificación y granulometría variable. Son frecuentes las gravas clastosoportadas, de clastos imbricados, paleocanales, paleo barras, gradaciones normales, inversas y laterales, y la ocurrencia de estratificación cruzada en artesa.

Para este trabajo han sido definidas como **Depósitos Aluviales Antiguos [al-Mio]**, observados en las quebradas Changos, Taltal y El Hueso. En las dos primeras y en la ladera E de la quebrada El Hueso forman abanicos aluviales con dirección de flujo transversal a las quebradas y se encuentran erosionados por la red de drenaje actual formando un escarpe de 3 a 5 m con respecto al nivel actual, como se puede observar en la Ilustración 2.5-3 y en la Ilustración 2.5-10. Se reconocen como depósitos de gravas con clastos angulosos de 2-50 cm, arenas finas a gruesas, y limo. No se observa compactación o cementación. En algunos sectores se aprecian estratificaciones. En el sector de la quebrada Changos, se reconocen niveles muy bien seleccionados de arcillas que son extraídos para uso artesanal.

Ilustración 2.5-10: Vista al SW de la Quebrada Taltal.

Fuente: Elaboración Propia.



En la quebrada El Hueso estos depósitos cubren parcialmente en contacto erosivo a las lavas de la Formación La Negra, como se observa en la Ilustración 2.5-11. En este lugar, los depósitos tienen clastos angulosos de menor tamaño (2-10 cm), hay una mayor proporción de finos: arenas gruesas y limos, también se reconoce la presencia de cenizas, clastos de origen volcánico y un mayor grado de cementación.

Ilustración 2.5-11: Vista al N de la quebrada El Hueso.

Fuente: Elaboración Propia.



2.5.5. DEPÓSITOS CUATERNARIOS

Entre los depósitos cuaternarios se distinguen unidades de terrazas marinas, depósitos aluviales y coluviales, depósitos coluviales del escarpe costero, depósitos litorales recientes y depósitos humanos debido a la actividad minera. Unidades que se presentan y especifican a continuación.

1. Depósitos aluviales y coluviales del Pleistoceno-Holoceno [PIHac].

Depósitos que rellenan las quebradas de Taltal. Corresponden a rellenos no consolidados, polimícticos y de selección variable, constituidos por gravas, arenas y limos. Se disponen en las laderas y hacia la base de las actuales quebradas, tanto discordantes o como 'mantos' sobre los Depósitos Aluviales del Mioceno Superior-Plioceno (MsPa) y son producidos por cursos de escorrentía recientes. Esta unidad incluye también, indiferenciadamente, los depósitos producidos por procesos gravitacionales (coluvios), los que se encuentran acotados a los faldeos abruptos de las quebradas y cerros y son generalmente monomícticos, de clastos angulosos y mal seleccionados (Escribano, et al., 2013).

Para poder realizar un mejor análisis del área de estudio local, para esta unidad se han reconocido tres miembros o subunidades:

- **Canales de transporte y acumulación [ca-act].** Consisten principalmente en las redes de drenaje, generalmente activas, pero pueden estar abandonados o formando niveles aterrizados. Comúnmente se aprecia estratificación planar o en artesa, buena selección de los

clastos y gradación normal e inversa. En la **Quebrada Principal** se aprecian niveles aterrazados [c-terr] de hasta 15 m de alto, que en zonas distales tienen clastos redondeados, bien seleccionados (2-10 cm), buena esfericidad, imbricados, con estratificación paralela, como se observa en la Ilustración 2.5-12. En cambio, en zonas próximas al flujo principal se observan finos estratos de limos y arenas finas a gruesas con mayor o menor contenido clástico, estratificación paralela y en artesa, e intercalaciones de niveles de ceniza, ver Ilustración 2.5-13.

- **Depósitos aluviales proximales [al-pro].** Corresponden a la zona apical de los abanicos aluviales, se distribuyen en los faldeos de las laderas a lo largo de toda la zona de estudio y son alimentados o cortados por los canales de transporte activos o inactivos que pueden formar pequeños flujos locales de gravas angulosas con clastos de 2-15 cm, formando *levées* (Ilustración 2.5-14, Abajo) y se encuentran comúnmente intercalados por ellos (Ilustración 2.5-14, Izq.). Se distinguen por tener un alto ángulo de reposo 30-45°, mayor que el de las formas distales y por las evidencias de la interacción con el agua (Ilustración 2.5-14, Der.) para la formación de un flujo, como pequeños canales.
- **Depósitos aluviales distales [al-dis].** Corresponden a zona de mayor alcance de los abanicos aluviales, se distribuyen principalmente desde los pies de las laderas que rodean a la ciudad hasta varias cuerdas en dirección hacia el mar. Los abanicos pueden ser individuales o coalescentes, engranan hacia el NW con depósitos marinos de playa (Ilustración 2.5-7) y hacia el centro de la ciudad con los depósitos aterrazados de la quebrada principal. También se encuentran parcialmente erosionados por acción del mar formando niveles de terrazas marinas. Los depósitos están conformados por varios niveles estratificados de gravas, arenas y limos, como se observa en la Ilustración 2.5-15. Los niveles de gravas contienen clastos parcialmente redondeados, imbricados en la dirección del flujo (hacia el NE), con baja esfericidad, con gran variedad de tamaños (1-10 cm), en los niveles más altos aumenta considerablemente la proporción de matriz de limos, perdiéndose la imbricación. Las arenas y limos se encuentran bien seleccionados, pero probablemente forman parte del relleno de la calle antes de que fuera pavimentada.

Ilustración 2.5-12: Vista al SE nivel aterrazado de la quebrada principal.

Fuente: Elaboración Propia.

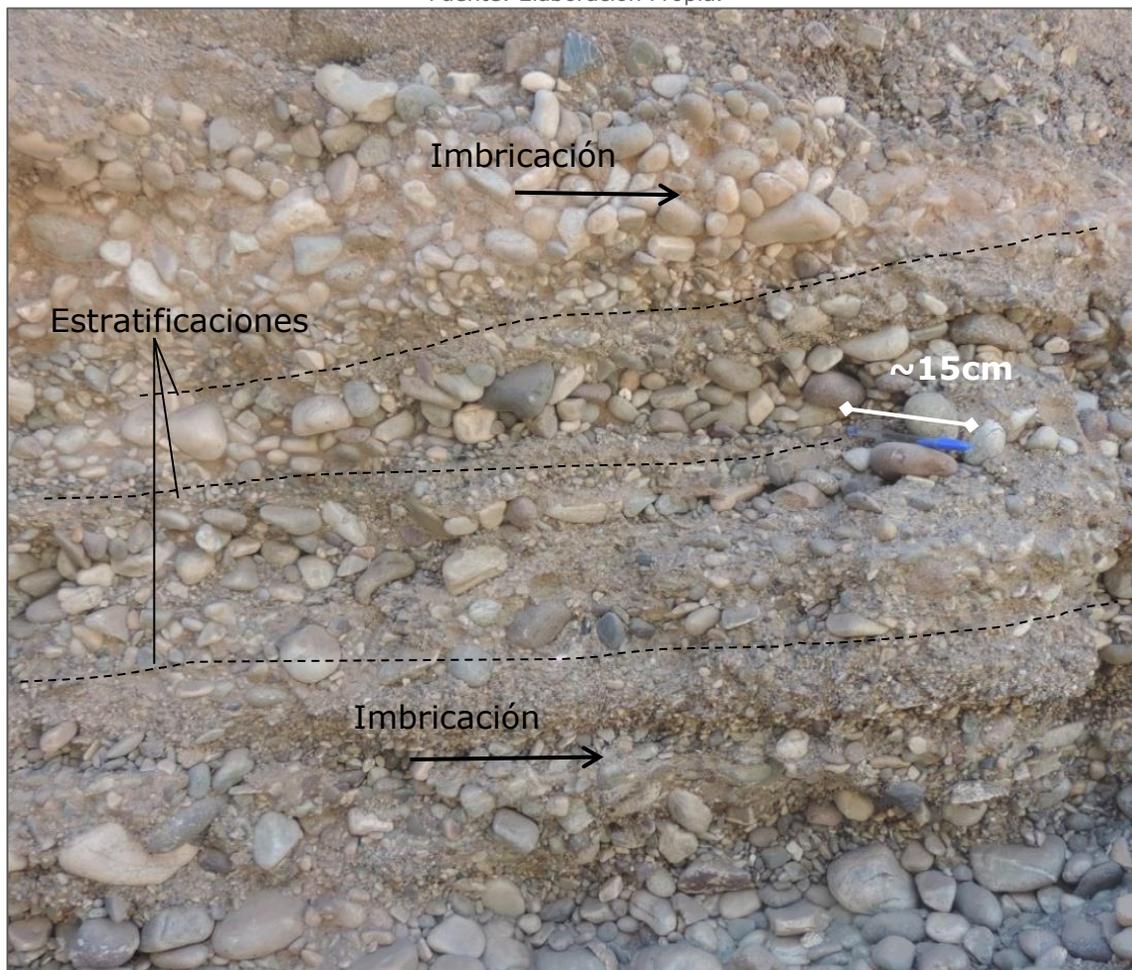


Ilustración 2.5-13: Vista al NE nivel aterrazado de la quebrada principal.

Fuente: Elaboración Propia.

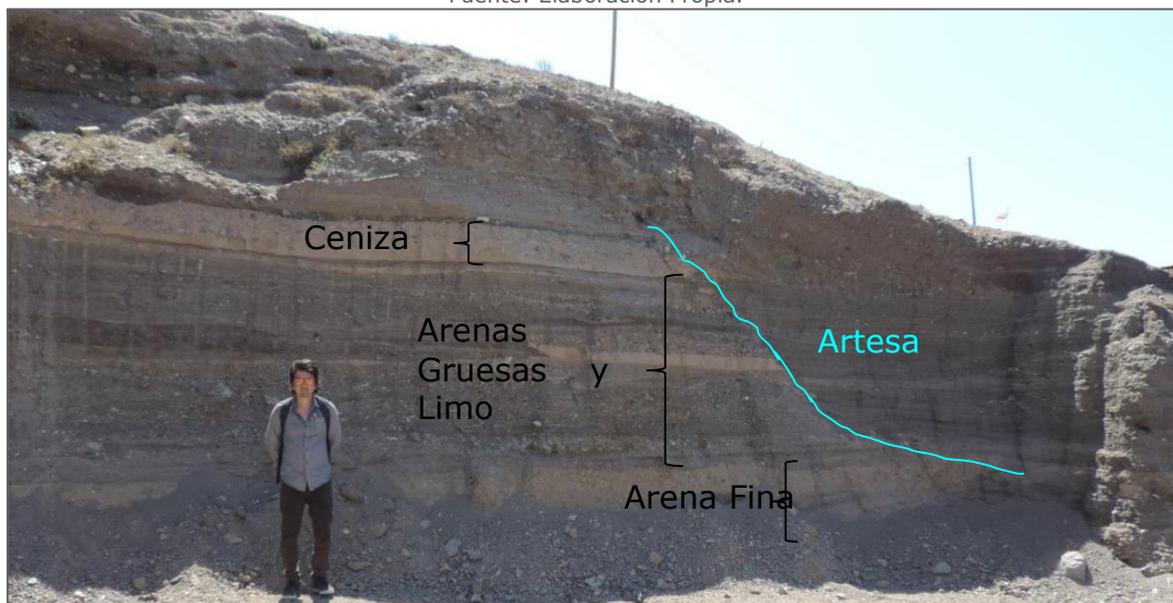


Ilustración 2.5-14: Depósitos proximales en la ladera SW de Taltal.

Fuente: Elaboración Propia.

Izq. Vista al S; Der. Vista al N; Abajo: Vista al SW.

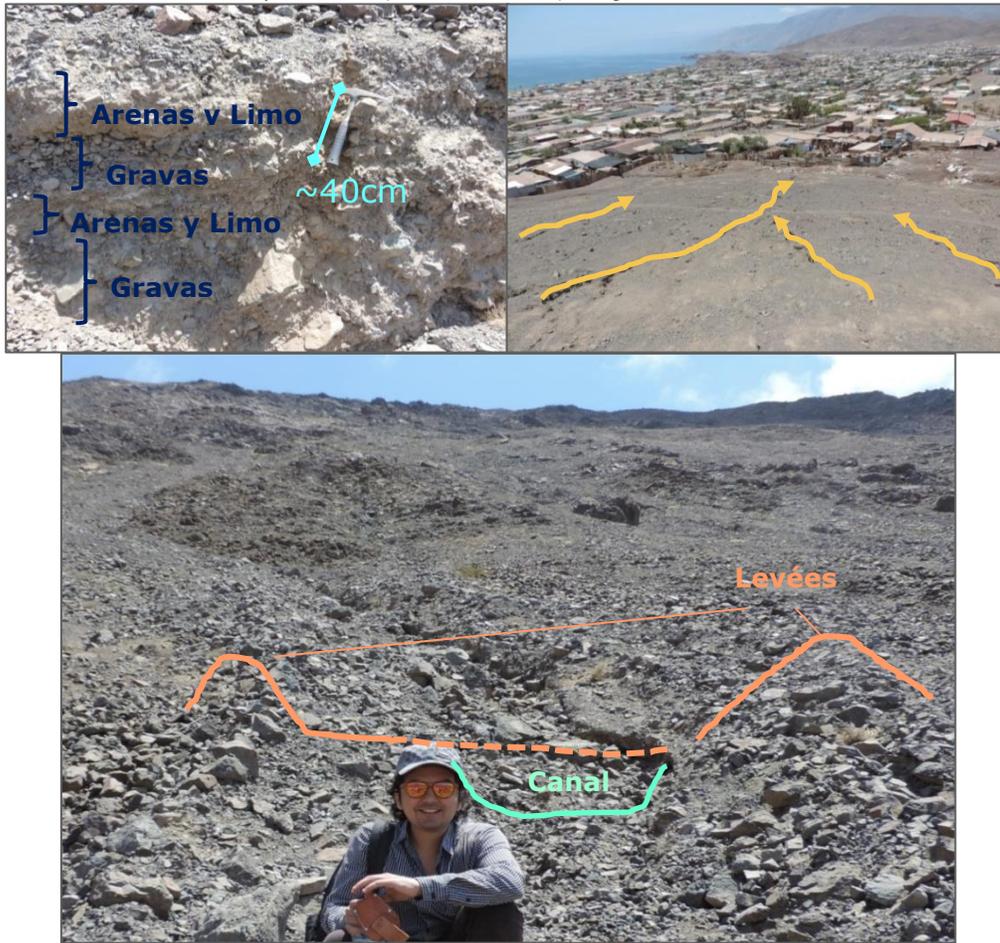


Ilustración 2.5-15: Vista hacia el NW de pique en calle Riquelme.

Fuente: Elaboración Propia.



2. Depósitos marinos del Pleistoceno-Holoceno [PIHm].

Corresponden a pequeñas terrazas con intercalaciones de arenas, limos, coquinas y conglomerados, que se encuentran en borde costero de la zona de estudio de forma discontinua. Los depósitos se ubican, aproximadamente, entre los 5 a 40 m de altura respecto al nivel del mar y, en general, su potencia no sobrepasa los 10 m de espesor. Se encuentran interdigitados con los depósitos aluviales y coluviales [PIHac] y los depósitos coluviales costeros [PIHcc] (Escribano, et al., 2013). Dentro del área de estudio local no se reconocieron depósitos marinos asociados a esta unidad, pero sí la morfología erosiva de las terrazas marinas, sobre los depósitos aluviales.

3. Depósitos coluviales costeros del Pleistoceno-Holoceno [PIHcc].

Depósitos de origen gravitacional que se ubican en las laderas de alta pendiente de relieves rocosos importantes, y forman escombros de falda y conos de deyección. Se sitúan principalmente en las laderas del Escarpe Costero, a lo largo de toda la costa desde Paposo hasta quebrada Los Amarillos. Están constituidos por gravas de bloques angulosos a subangulosos, de diversos tamaños (centimétricos a decimétricos), con escasa matriz de arena y limo (Escribano, et al., 2013).

Dentro del área de estudio local, se reconocen en varios sectores y fueron localizados con mayor detalle como **depósitos coluviales [col]**, correspondientes a depósitos de gravas generados por acción gravitacional generalmente con forma de cono o abanico, se encuentran en los faldeos de las laderas y con un ángulo de reposo cercano a los 45°. Son formados por caídas de roca, detritos o tierra.

4. Depósitos litorales de playa del Holoceno [HI].

Depósitos sedimentarios clásticos, no consolidados, constituidos por gravas, arenas y limos de carácter lítico y bioclástico, acumulados en el borde costero y zona intermareal como típicos depósitos de playa. Se ubican en los alrededores de la ciudad de Taltal, de forma discontinua, entre las quebradas. Se compone de bloques angulosos de diversos tamaños interdigitados con los depósitos aluviales y coluviales [PIHac] y depósitos marinos [PIHm].

En el área de estudio local fueron reconocidos como **depósitos de playa [pl-act]**, que se distribuyen a lo largo de la costa en bahías y remansos, compuestos por arenas finas a gruesas, angulosas, de color morado o gris oscuro principalmente de origen volcánico.

5. Depósitos antrópicos producto de la actividad minera del Holoceno [Han(b)].

Corresponden a acopios de estériles de la ex oficina salitrera Santa Luisa y relaves, botaderos de estériles y pilas de lixiviación de la planta José Antonio Moreno de ENAMI, al este de caleta Hueso Parado (Escribano, et al., 2013). En el área de estudio se reconocen como **depósitos antrópicos [hum]**, algunas edificaciones fuera del área urbana principal y áreas de acopio o de extracción de áridos, que no pudieron ser clasificados como parte de una de las unidades anteriores.

6. Morfologías Marinas

En el área de estudio local se reconocieron niveles de **terrazas de erosión marina [pl-terr]**. Corresponden a superficies planas, levemente inclinadas formadas por la erosión del sustrato presente por acción de las olas. En este lugar no forman depósitos marinos, pero si se observa la interacción entre los depósitos aluviales y el retroceso del nivel del mar, por lo que se distinguen por lo menos 4 niveles de terrazas: T0 a T3, donde T3 representa el nivel actual y T0 el más antiguo reconocido, tal como lo muestran la Ilustración 2.5-17 y la Ilustración 2.5-16.

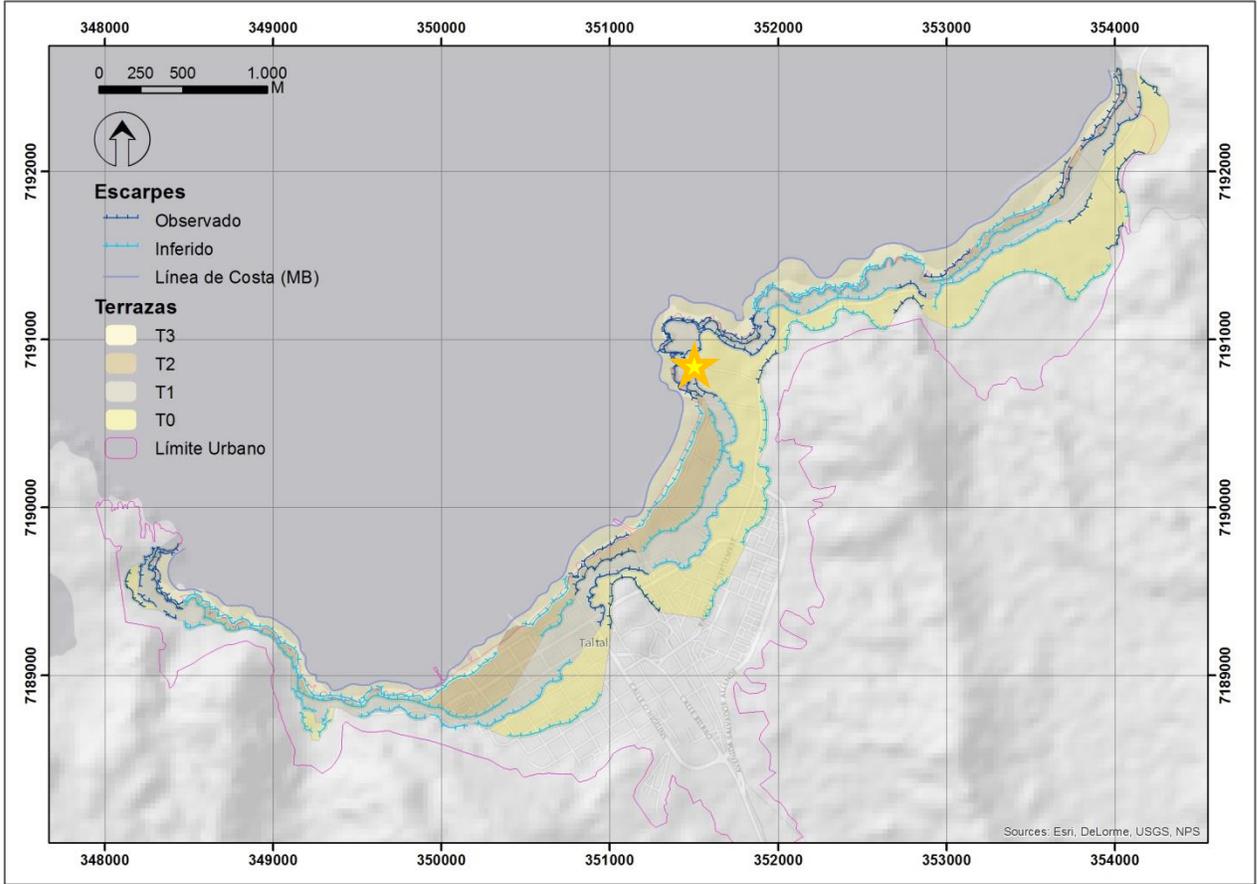
Ilustración 2.5-16: Vista al NE niveles de terrazas marinas.

Fuente: Elaboración Propia.



Ilustración 2.5-17: Esquema de los niveles de terrazas marinas.

Fuente: Elaboración Propia. Estrella indica construcción a la izquierda de la Ilustración 2.5-16.

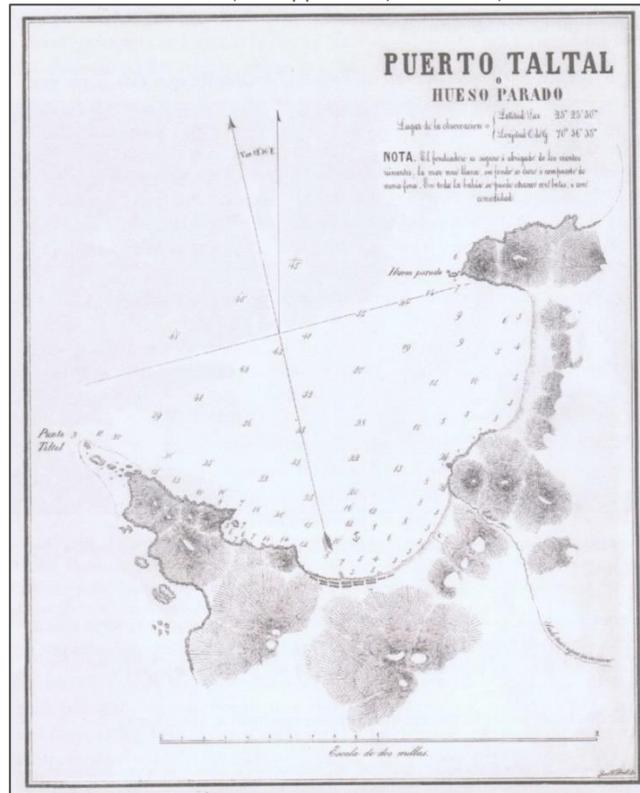


2.6. Historia de Taltal

Taltal existía como una caleta y campamento de provisiones mineras en 1853 cuando fue visitada por Rodulfo Philippi en su recorrido por el desierto de Atacama (ver Ilustración 2.6-1). En la recopilación de Rivera Marfán (2014) se cuenta que, Taltal fue declarada puerto habilitado en 1858 con un decreto supremo, a petición del explorador, minero y empresario José Antonio Moreno. Impulsando el desarrollo de esta ciudad en la segunda mitad del siglo XIX. El primer muelle fue construido en 1862.

Ilustración 2.6-1: Carta del Puerto de Taltal en 1854.

Fuente: Viaje al desierto de Atacama, Philippi 1860, Ed. 2008; Ilustración de Guillermo Döll.

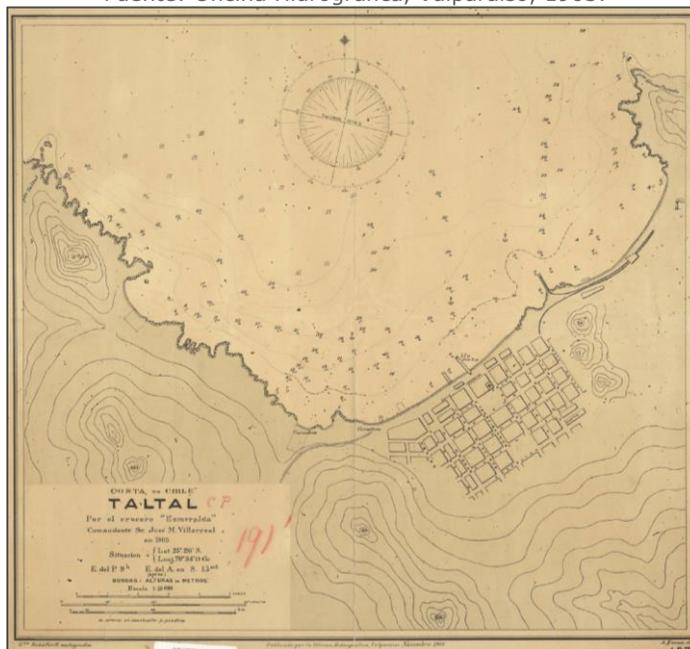


Su estatus fue cambiado a puerto menor en 1872, y en 1877, el presidente Pinto decretó establecer a Taltal como una población, mandando a construir 11 manzanas y una plaza pública, previendo que en esta zona pudiera desarrollarse una industria salitrera (ver Ilustración 2.6-2). En 1880 se constituye "The Taltal Railway Company Limited", comenzando la construcción del ferrocarril en 1881, cuando la ciudad ya contaba con 4.500 habitantes, era declarada puerto mayor y se establecía la municipalidad.

Taltal formaba parte de la provincia de Atacama, creada en 1843. En 1884, esta provincia fue dividida en tres departamentos: Taltal, Chañaral y Copiapó. En 1888, fue creada la provincia de Antofagasta, a la que el departamento de Taltal pasó a formar parte, junto con los de Tocopilla y Antofagasta. Hasta que en 1975, un nuevo decreto, crea la II Región de Antofagasta y Taltal pasa a formar parte de la nueva provincia de Antofagasta.

Ilustración 2.6-2: Carta del Puerto de Taltal en 1903.

Fuente: Oficina Hidrográfica, Valparaíso, 1905.



En 1892 Taltal tiene una población de 9.237 personas, que aumenta a una cifra cercana a los 30.000 habitantes en 1926, cuando la ciudad contaba con siete muelles de carga y se veían 40 a 50 veleros anclados para el transporte del salitre. Además, había crecido hasta tener 130 manzanas, divididas por el cerro Central (ver Ilustración 2.6-3). En 1912 se inaugura el alumbrado eléctrico público de la ciudad y en 1913 se aumentaba la planta de funcionarios de la Aduana. En 1921 se inaugura el teatro "Alhambra", reflejando muchas de las riquezas que dejaba la explotación del salitre.

Al comenzar la crisis del salitre el 1942, muchas oficinas salitreras cierran sus actividades. Las últimas oficinas en cerrar son Flor de Chile, en 1960 y Alemania, en 1966, que luego fueron declaradas monumentos nacionales, junto con las instalaciones del ferrocarril en la ciudad. En 1966 la ENAMI inaugura la planta beneficiadora de metales, al norte del puerto, que procesa minerales oxidados por lixiviación primaria y secundaria. En 1983 fue

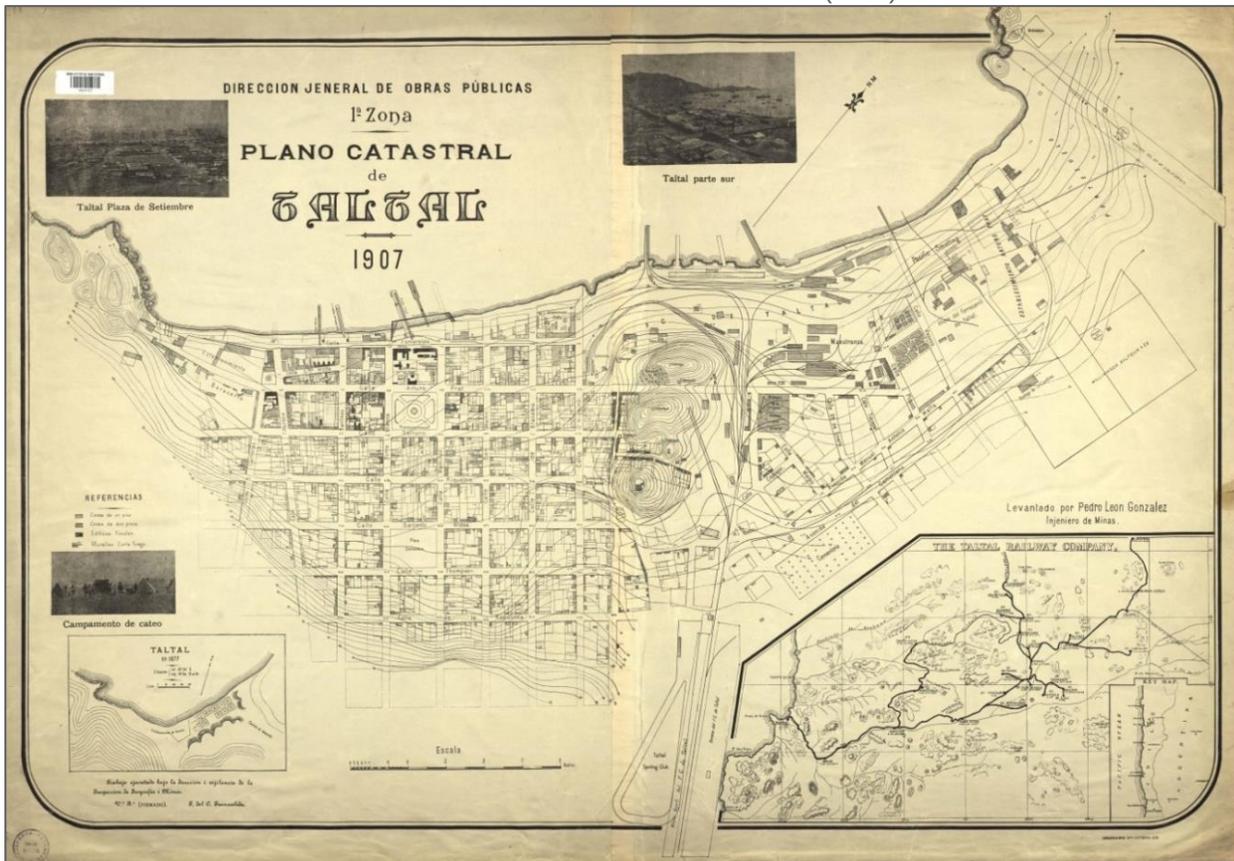
fundado el Museo de Taltal, 1985 la Biblioteca Pública y en 1986 la Casa de la Cultura. En 1999 Gas Atacama instala un sistema de gasoductos que transportan gas desde Argentina hasta Mejillones y desde Mejillones hasta Taltal, pasando por Paposo.

La primera fábrica de conservas de pescado se construyó en 1946, cuando comenzaba la crisis del salitre. En el año 2000, se contaban cuatro industrias pesqueras y en 2001, se contaban 415 pescadores, que sustentan la economía de la ciudad. En 2002 se realizaron mejoras a las caletas y el censo cuenta 9.564 habitantes.

A partir de esta información, es posible establecer que los registros más confiables del quehacer cotidiano de la ciudad, comienzan a partir de 1877 con el decreto del presidente Pinto. Estos relatos toman mayor fiabilidad en 1881, cuando comienza la construcción del ferrocarril, se funda el primer periódico local (Gimeno, 2005) y se establece la municipalidad como ente administrativo. Un registro de los principales eventos con daños ocurridos en la ciudad de Taltal se puede encontrar en el Anexo F: Eventos Históricos.

Ilustración 2.6-3: Plano Catastral de Taltal de 1907.

Fuente: Dirección General de Obras Públicas (1907).



3. DESARROLLO Y ANÁLISIS DEL CATASTRO

3.1. Criterios para la Elaboración del Catastro

Para elaborar el catastro, los eventos fueron separados en dos tablas diferentes, según el factor desencadenante involucrado: eventos desencadenados por terremotos y eventos desencadenados por causas meteorológicas. En la primera tabla se incluyeron los terremotos y tsunamis que afectaron a la ciudad de Taltal, incluyendo algunos tsunamis que fueron generados fuera de las costas de Chile. En la segunda tabla se incluyeron los eventos que por causas meteorológicas (lluvias, viento, nieve, marejadas, temporales, etc.) causaron daños en la ciudad o dentro del área de la cuenca en distinto grado.

Según las recomendaciones de Corominas y Moya (2008), revisadas en el punto 1.5.2 sobre los antecedentes de estudios similares, se buscó información de fuentes principalmente directas, como diarios locales o de circulación nacional con la descripción más cercana a la fecha del evento, También, se consultaron listados y descripciones de organismos nacionales e internacionales dedicados al estudio de estos eventos (CSN, NOAA, SHOA, USGS, NEIC, DGA, entre otros). Además, se consultaron publicaciones científicas y sus fuentes (de ser posible), y se consultaron libros de historia relacionados. La Tabla 3.1-1 y la Tabla 3.1-2 muestran un resumen del listado de la bibliografía revisada para cada una de las tablas del catastro. Las noticias recopiladas se pueden revisar la carpeta anexa: Noticias.

Con base en estos parámetros la tabla sobre terremotos sintetiza la siguiente información, en caso de estar disponible: año, fecha, hora, coordenadas geográficas, profundidad, tipo de evento (tsunami o terremoto), ciudad más cercana al epicentro, magnitud (Ms y/o Mw), magnitud del tsunami, descripción general, descripción local, observaciones y fuentes. Del mismo modo, la tabla sobre eventos meteorológicos recopiló información disponible sobre: año, fechas en que se desarrolla el evento, condición(es) meteorológica(s) presente(s), consecuencias (inundación, flujo de agua o barro, remociones, etc.), descripción general, descripción local, observaciones y fuentes. Además, en ambas tablas se asignó un número de identificación o ID. También la bibliografía consultada se encuentra identificada con una abreviación presentada en la Tabla 3.1-1 y la Tabla 3.1-2. Los catastros completos de eventos meteorológicos y terremotos se encuentran adjuntos en el Anexo A: Catastro.

Tabla 3.1-1: Bibliografía consultada en catastro de sismos y tsunamis.

Fuente: Elaboración Propia.

Libros y Publicaciones			
Abreviación	Autor	Año	Título
AL	Álvarez	1967	Efectos geológicos del sismo de Taltal del 28 de Diciembre de 1966
B	Bustos	1930	Estudio sismológico de Chile con los temblores y terremotos producidos en los últimos cuatro siglos.
BO	Bobillier	1926	Boletín del Servicio Sismológico, Año de 1922
CA	Caja de Auxilios	1937	Ley No. 5933 Reconstrucción ciudad de Taltal
CO	Comte <i>et al.</i>	2002	Seismicity and stress distribution in the Copiapó, northern Chile subduction zone using combined on- and off-shore seismic observations
CYP	Comte y Pardo	1991	Reappraisal of great historical earthquakes in the Northern Chile and Southern Peru seismic gaps
G	Greve	1964	Historia de la sismología en Chile
L	Lemke <i>et al.</i>	1968	Geologic and related effects of the Taltal earthquake, Chile, of December 28, 1965
LK	Lockridge	1985	Tsunamis in Peru-Chile
LO	Lomnitz	2004	Major earthquakes of Chile: A historical survey, 1535-1960
ONE2002	ONEMI	2002	Informe consolidado, Sismo 18 de Abril 2002, Copiapó
ONE2007	Oficina Nacional de Emergencias	2007	Sismo destructivo de Tocopilla, 14 Noviembre 2007
RM	Rivera-Marfán	2014	Historia de los Puertos y Caletas de Chile
T	Taulis	1938	Terremotos y grandes temblores habidos en Chile
UYL	Urrutia y Lanza	1993	Catástrofes en Chile 1541-1992

Periódicos Nacionales y Locales

Abreviación	Circulación	Nombre
MS	1900-Actual	El Mercurio
MA	1906-1929	El Mercurio de Antofagasta
MN	1905-1911	El Mercurio del Norte, Taltal
MV	1827-2012	El Mercurio de Valparaíso
LD	1893-1909	El Liberal Democrático, Taltal
LN	1917-2010	La Nación
EP	1934-1946	El Pueblo, Taltal
LR	1909-1945	La Razón, Taltal
VP	1917-1933, 1947-1968	La Voz del Pueblo, Taltal

Bases de Datos y Sitios Web

Abreviación	Creación	Nombre	URL
CSN	1908	Centro Sismológico Nacional	http://www.sismologia.cl/
DI	1973	DesInventar.org	http://www.desinventar.org/es/
NEIC	1972	National Earthquake Information Center	https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/
SHOA	2008	Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada	http://www.shoa.cl/servicios/tsunami/data/tsunamis_historico.pdf

Tabla 3.1-2: Bibliografía consultada en catastro de eventos meteorológicos.

Fuente: Elaboración Propia.

Libros y Publicaciones			
Abreviación	Autor	Año	Título
A	Almeyda	1984	Pluviometría de las zonas del desierto y de las estepas cálidas de Chile
C	CODELCO	2015	Informe Evento Meteorológico 24-25-26 Marzo 2015
O	Ortlieb	1994	Las Mayores precipitaciones Históricas en Chile central y la Cronología de eventos ENOS en los siglos XVI-XIX
ONE	Oficina Nacional de Emergencias	Varios ²	Varios Informes ¹
OYV	Ortlieb y Vargas	2015	Hacia una historia de eventos lluviosos extremos en el sur del Desierto de Atacama, Norte Chico, a partir de fuentes documentales
RM	Rivera-Marfán	2014	Historia de los Puertos y Caletas de Chile
SNGM 2015	Servicio Nacional de Geología y Minería	2015	Varios Informes ¹
SNGM 2016	Servicio Nacional de Geología y Minería	2016	Registro de principales desastres desde 1890
UYL	Urrutia y Lanza	1993	Catástrofes en Chile 1541-1992
V	Vargas	2000	Aluviones históricos en Antofagasta y su relación con eventos El Niño/Oscilación del Sur
Z	Zayas	1973	El salitre, comercio, industrias en las provincias de Tacna, Tarapacá y Antofagasta y los departamentos de Tocopilla y Taltal de los años 1891 a 1920

Periódicos Nacionales y Locales		
Abreviación	Circulación	Nombre
LD	1893-1909	El Liberal Democrático
MS	1900-Actual	El Mercurio
MA	1906-1929	El Mercurio de Antofagasta
MV	1827-2012	El Mercurio de Valparaíso
LN	1917-2010	La Nación
EP	1934-1946	El Pueblo, Taltal
LR	1909-1945	La Razón, Taltal
VP	1917-1933, 1947-1968	La Voz del Pueblo, Taltal

Bases de Datos y Sitios Web			
Abreviación	Creación	Nombre	URL
BM	2007	Bureau of Meteorology	http://www.bom.gov.au/climate/enso/
DI	1973	DesInventar	http://www.desinventar.org/es/
DGA	1972	Dirección General de Aguas ²	http://snia.dga.cl/BNAConsultas/reportes
EMOL	1999	El Mercurio Online	http://www.emol.com/sitemap/

¹ Ver Detalles en Anexo A—1 al Anexo A—7.

Se encontró un total de 62 eventos de remociones en masa provocados por causas meteorológicas y de 75 eventos provocados por sismos. Entre los eventos meteorológicos se reconocen precipitaciones de lluvias, marejadas, vientos fuertes, tormentas eléctricas y nieve en la Cordillera Principal y la Depresión Central. Las precipitaciones, en general ocasionaron flujos de barro e inundaciones de variada magnitud y alcance, las marejadas y los vientos dieron lugar a caídas de rocas o detritos que causaron cortes de caminos. Entre los eventos sísmicos se reconocieron 56 terremotos de diversas magnitudes, de los cuales 17 dieron lugar a ondas de tsunami registradas en Taltal, además de 2 tsunamis generados en costas lejanas.

Se observó también, que existen diferencias importantes en la información encontrada dependiendo del año en que ocurre el evento. Los eventos más antiguos (1960 hacia atrás) se encontraron en relatos de periódicos locales y capitalinos, registros climáticos históricos y cuentan con descripciones detalladas de los daños causados, las propiedades, las personas y las calles afectadas. Los eventos entre 1960 hasta fines de la década del '90, en general se encontraron en bases de datos e informes de entidades oficiales. Los relatos de periódicos en general citan o explican dichos informes, donde la información se presenta en tablas indicando número de regiones dañadas, número de casas dañadas, número de damnificados, montos destinados a las reparaciones, entre otros datos. Los datos no cuentan con un relato de los daños o citas a figuras explicativas, fotos u otras formas de dar ubicación a los daños y a su gravedad de forma local. Los eventos reconocidos desde el año 2000, en general cuentan con informes oficiales, registro periodístico y publicaciones en internet, con fotos y relatos de los eventos, aunque en algunos casos carecen de citas apropiadas y las imágenes son reutilizadas para nuevos eventos. Se elaboró un método para evaluar la calidad de la información obtenida para cada evento, que se explica en el Anexo D: Estimación de Certeza.

3.2. Clasificación por Intensidades

Esta clasificación se elaboró para poder comparar los distintos eventos ocurridos, ya que independientemente de la magnitud del evento, cada proceso puede tener un mayor o menor grado de impacto, severidad o consecuencias a las personas y a la ciudad. Entonces, como cada evento puede ocurrir debido a distintos procesos y no hay suficiente información para hacer un análisis de cada uno de ellos por separado, se ha elaborado esta escala de intensidad, con base en los efectos, ya que permite unificar la información del catastro y de los procesos.

Esta clasificación se construyó a partir de las descripciones consultadas para los catastros de Chañaral (Anexo Práctica Chañaral) y Taltal (Anexo A: Catastro) para distintos eventos, pues no se reconoció en la literatura consultada una clasificación similar, específica, que catalogue los daños de inundaciones y remociones en masa según su intensidad. Tal como lo hacen las escalas de Mercalli y Sieberg para sismos y tsunamis, respectivamente. Entonces, para cada proceso se definió una categorización de cinco niveles que delimitan la fuerza, daños e importancia de cada evento para la zona afectada. En la Tabla 3.2-1, se presentan las clasificaciones de intensidades definidas para inundaciones y flujos, y en la Tabla 3.2-2 se presentan ejemplos para cada caso.

Tabla 3.2-1: Intensidades para clasificar inundaciones y flujos.

Fuente: Elaboración Propia.

Intensidad	Descripción de intensidad
0 SD Sin Daños	Cauces de agua corren por los lugares habituales aumentando su caudal. Quebradas secas generan cauces de agua que corren de forma controlada por canalizaciones o los bordes de las calles. Piscinas de contención acumulan agua sin llenarse. Se generan anegamientos cerca de los terraplenes de caminos, ferrovías y viviendas.
1 B Bajo	Cauces de agua aumentan su caudal hasta desbordarse. Corre agua por quebradas secas, inundando calles y casas. Daños leves en construcciones ligeras. Anegamientos pueden sobrepasar caminos y ferrovías generando acumulaciones de barro.
2 M Medio	Cauces de agua y quebradas secas transportan barro y materiales de menor tamaño. Se generan acumulaciones de barro en calles y construcciones ligeras, daños leves en construcciones sólidas. Se socavan levemente cimientos y terraplenes de caminos y ferrovías, generando cortes de caminos.
3 F Fuerte	Cauces de agua y quebradas transportan barro, piedras y materiales de mayor tamaño. Construcciones ligeras son removidas y arrastradas por los cauces, al igual que automóviles pequeños, personas o durmientes de la ferrovía. Las construcciones sólidas son socavadas y tienen daños importantes.
4 MF Muy Fuerte	Cauces de agua y quebradas transportan grandes rocas o materiales de gran tamaño. Árboles, estructuras sólidas u objetos de gran tamaño son removidos de sus cimientos y arrastrados por el cauce. Personas desaparecidas. Ferrovías son deformadas o cortadas.

Tabla 3.2-2: Ejemplos de clasificación según la intensidad.

Fuente: Recopilación de varias fuentes, clasificación propia.

	
<p>Tele 13, Antofagasta. Agosto 2015 Evento Sin Daños</p>	<p>El Universo. Trujillo, Perú. Marzo 2017 Área de Intensidad Baja</p>
	
<p>Tele 13, Chañaral. Marzo 2015 Área de Intensidad Media</p>	<p>SoyAntofagasta, Taltal. Marzo 2015 Área de Intensidad Fuerte</p>
 <p>BuenosDíasCuaracavi. Copiapó, Marzo 2015 Evento de Intensidad Muy Fuerte</p>	

Para efectos prácticos, los mayores daños que puede ocasionar una remoción en masa de otro tipo son muy similares y casi indistinguibles de los efectos de los flujos e inundaciones, a diferencia de que pueden ocurrir bajo condiciones secas. Por este motivo, la categoría Muy Fuerte se define igual que en la clasificación de intensidades para inundaciones. En cambio, para

eventos de menor intensidad es posible hacer una distinción entre inundaciones y remociones. En la Tabla 3.2-3 se presenta la clasificación de intensidades para otras remociones en masa.

Tabla 3.2-3: Definición de intensidad para remociones en masa.

Fuente: Elaboración Propia

Intensidad		Descripción de intensidad
0	SD Sin Daños	Se puede observar avance de rocas o sedimentos de unos pocos centímetros por las laderas. Gravilla o arena puede caer en caminos o casas cercanas a los cerros de alta pendiente. No se observan daños a estructuras ni a personas.
1	B Bajo	Se observa un avance de rocas o sedimentos en laderas, alcanzando los metros de distancia, pero sin intervenir caminos ni construcciones de asentamientos humanos. Sólo se registran daños leves en construcciones ligeras.
2	M Medio	Se registran avances de la ladera de los cerros, en algunos casos tapando parcialmente caminos o entrando a los patios de las casas cercanas a las laderas de alta pendiente. Puede registrarse avance o caída de bloques medianos.
3	F Fuerte	Cauces y quebradas transportan barro, piedras y materiales de mayor tamaño. Laderas avanzan tapando caminos o socavándolos, pueden caer rocas de gran tamaño, dañando estructuras y edificaciones. Se registran cortes de caminos y caída de postes, es riesgoso permanecer cerca de laderas de alta pendiente. Construcciones ligeras son removidas y arrastradas por los cauces, al igual que automóviles pequeños, personas o durmientes de la ferrovía. Las construcciones sólidas son socavadas y tienen daños importantes.
4	MF Muy Fuerte	Cauces y quebradas transportan grandes rocas o materiales de gran tamaño. Árboles, estructuras sólidas u objetos de gran tamaño son removidos de sus cimientos y arrastrados. Personas desaparecidas. Ferrovías son deformadas o cortadas.

De los 62 eventos meteorológicos reconocidos, 56 contaban con información suficiente para ser clasificados según su intensidad. Se reconocieron 3 eventos con intensidad muy fuerte, otros 3 con intensidad fuerte, 14 con intensidad media, 17 con intensidad baja y 19 sin daños. Para asignar la intensidad de eventos inciertos (revisar definición en el Anexo D: Estimación de Certeza), se realizaron comparaciones de la información disponible con las descripciones de los eventos confirmados, como los registros de precipitaciones, duración del evento o puntos afectados. En todos los casos se asignó una intensidad conservadora, anotando el mayor valor que la evidencia permite. El grado de intensidad solo se aumentó si la información indicaba un grado mayor. Estas clasificación se puede visualizar mejor en el gráfico de Intensidad vs. Tiempo del Ilustración 3.2-1, para eventos meteorológicos.

Para los eventos meteorológicos se observó una relación entre la intensidad y los procesos desencadenados. Para los eventos de menor intensidad (Sin Daños, Baja), los relatos mencionan reiteradamente los cortes de camino por rocas y tierra, por lo que se relacionan al proceso de caídas de roca, detritos y tierra. Para los eventos de intensidad media (Baja, Media) se mencionan

veredas, calles y casas de la zona alta con agua, barro y piedras, por lo que se asocian a procesos de inundaciones y flujos generados a escala local. Por último, los eventos más importantes (Fuerte y Muy Fuerte) se relacionan a procesos de inundaciones y flujos que bajan principalmente por las quebradas Taltal y San Ramón, que fueron generados en zonas altas de la cuenca, a escala regional, y que pueden también desarrollarse localmente. No se observaron evidencias de procesos de ladera, tales como: volcamientos, deslizamientos, esparcimientos o procesos complejos.

Para el caso de los terremotos y tsunamis, se elaboró una equivalencia entre las 5 intensidades presentadas aquí con las escalas de intensidad de Mercalli y Sieberg, que se presenta en la Tabla 3.2-4 y se puede consultar su elaboración con más detalle en el Anexo E: Clasificación de Intensidades. De los 75 eventos asociados a terremotos, solo se clasificó 1 con intensidad muy fuerte, 6 con intensidad fuerte, 17 con intensidad media, 12 con intensidad baja y 23 fueron clasificados sin daños. Esta clasificación se puede visualizar mejor en el gráfico de Intensidad vs. Tiempo Ilustración 3.2-2, para terremotos y tsunamis.

Tabla 3.2-4: Definición de intensidades para tsunamis y terremotos con respecto a la escala de Sieberg y de Mercalli.

Fuente: Elaboración Propia.

Intensidad para este estudio			Intensidad según Escala modificada de Sieberg	Intensidad según escala de Mercalli
0	SD	Sin Daños	I-II	I-IV
1	B	Bajo	III	V-VI
2	M	Medio	III ²	VII
3	F	Fuerte	IV	VIII
4	MF	Muy fuerte	V-VI	IX-XII

² Los daños medio y bajo se definen con base en el grado III de la escala de Sieberg, que incluye el arrastre de embarcaciones ligeras y daños leves a estructuras de material ligero. Para este estudio se ha dividido este grado, ya que se considera el arrastre de embarcaciones con fuertes marejadas, el cierre de puertos y el cierre de playas de forma preventiva como un **daño bajo**. Los daños a las construcciones de temporada (como atracaderos para barcos de pedales o kayaks) o a las estructuras de material ligero situadas cerca de la playa (como quioscos, jardines, caletas o calles) son considerados como un nivel de deterioro mayor, por lo que se distingue como **daño medio**.

Ilustración 3.2-1: Representación temporal de los eventos meteorológicos y sus intensidades.

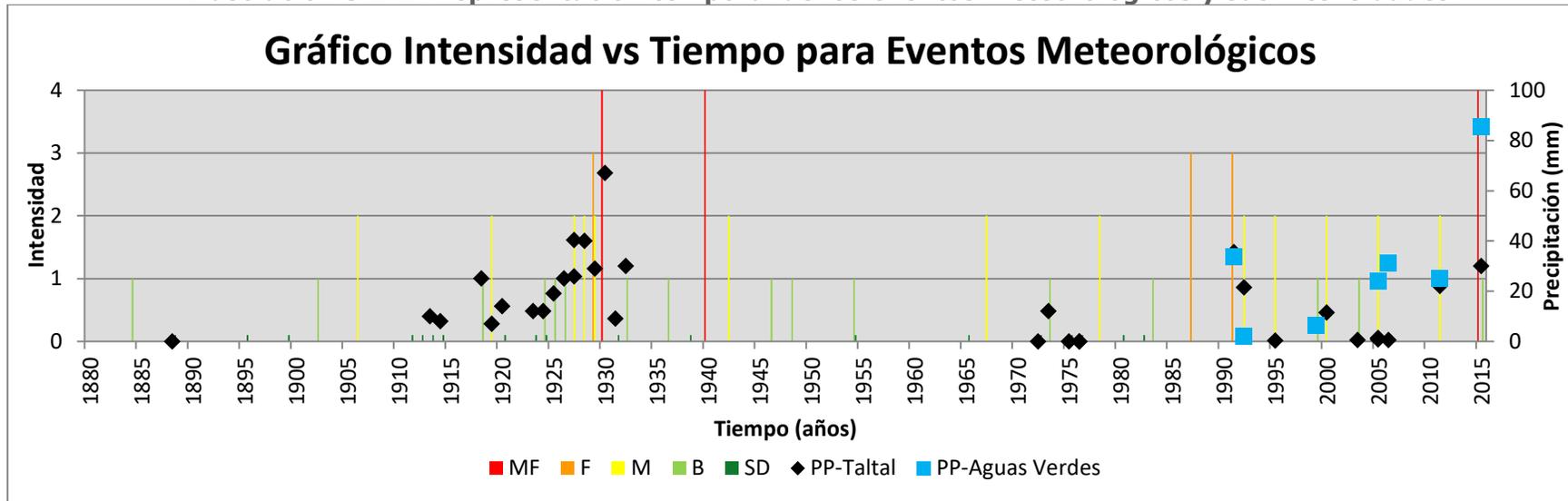
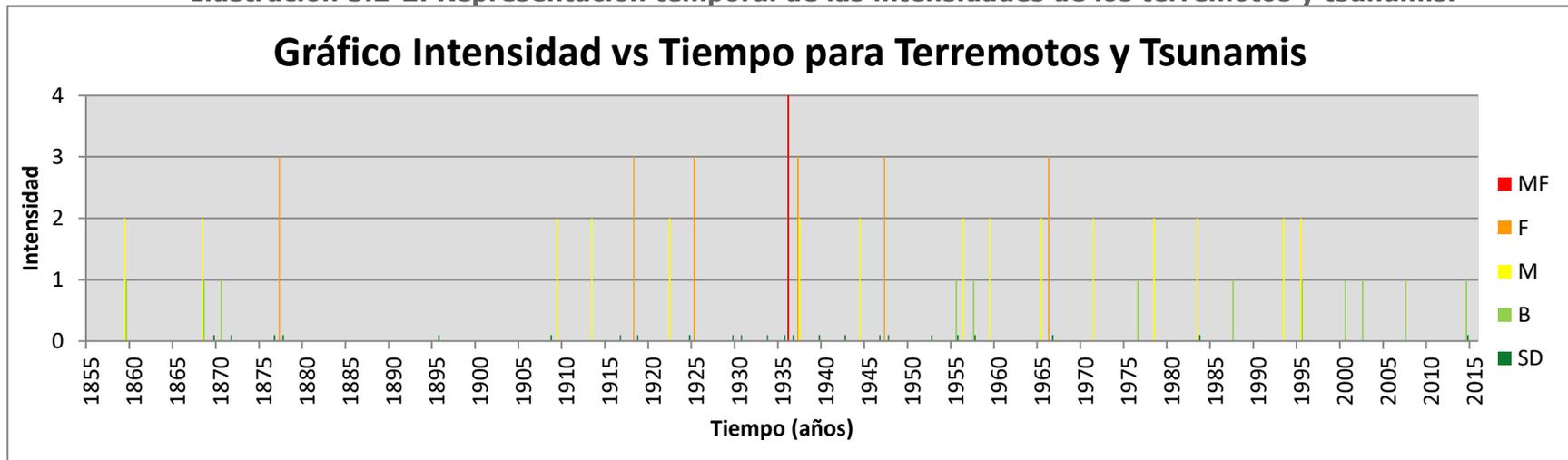


Ilustración 3.2-2: Representación temporal de las intensidades de los terremotos y tsunamis.



3.3. Inventario y Zonificación de los Eventos

Para los eventos que contaban con una descripción detallada de los lugares afectados se generó un mapa inventario y una zonificación de áreas afectadas según lo que permitió la información. Los mapas de inventario, contienen puntos demarcados con un color o símbolo que refleje la gravedad y la información que se quiere expresar, Además de una zonificación de escala intermedia de los lugares afectados dentro de la ciudad, para el caso de los eventos meteorológicos. Esta zonificación se aplicó para descripciones que mencionaban calles o cuadras por las que pasó un flujo de agua, un flujo de barro o en que hubo inundaciones, con la ayuda de los mapas históricos de la ciudad y las curvas de nivel actuales. A escala regional, también se indicaron puntos con remociones o caídas de rocas, cortando caminos. En la Ilustración 3.3-1 se observa un ejemplo para el terremoto de 1936 y en la Ilustración 3.3-2 se muestra un ejemplo para el aluvión de 1927.

La colección completa de imágenes del inventario, se puede encontrar en la carpeta anexa: Inventario. La colección completa de imágenes de la zonificación de eventos, correspondiente a 56 de los 62 eventos descritos en el catastro, se puede encontrar en la carpeta anexa: Zonificación de Intensidades. Dentro de la carpeta anexa: Inventario, se pueden encontrar dos tipos de imágenes para cada evento: una de escala intermedia y/u otra de escala regional, según corresponda. Además, están acompañados de un archivo KMZ con toda la información.

La zonificación de los eventos se realizó para los procesos con desencadenante meteorológico, en que se dividió el área de estudio local en distintos sectores de interés según su pendiente, cuencas aportantes, zonas inundables o alcances. Con base en el estudio del catastro se asignó un valor a cada una de estas divisiones de 0 a 4, donde el máximo designado para cada evento es el de su intensidad (0-Sin Daños, 1-Bajo, 2-Medio, 3-Fuerte, 4-Muy Fuerte), indicando las áreas de más daños con ese valor y áreas que podrían haberse activado sin consecuencias, con valores más bajos, como el ejemplo de la Ilustración 3.3-3. En algunos casos, los eventos no cuentan con descripciones elaboradas, por lo que se asignaron zonificaciones similares a los casos con los que tuvieran mayor similitud, por cantidad de agua caída, sectores del área de estudio en los que se mencionan precipitaciones, lugares, calles, número de familias o número de viviendas afectadas. Para elaborar esta zonificación se utilizó la escala intermedia (1:20.000).

Ilustración 3.3-1: Mapa Inventario del Terremoto de 1936.

Fuente: Elaboración Propia.



Ilustración 3.3-2: Mapa Inventario del aluvión de 1927.

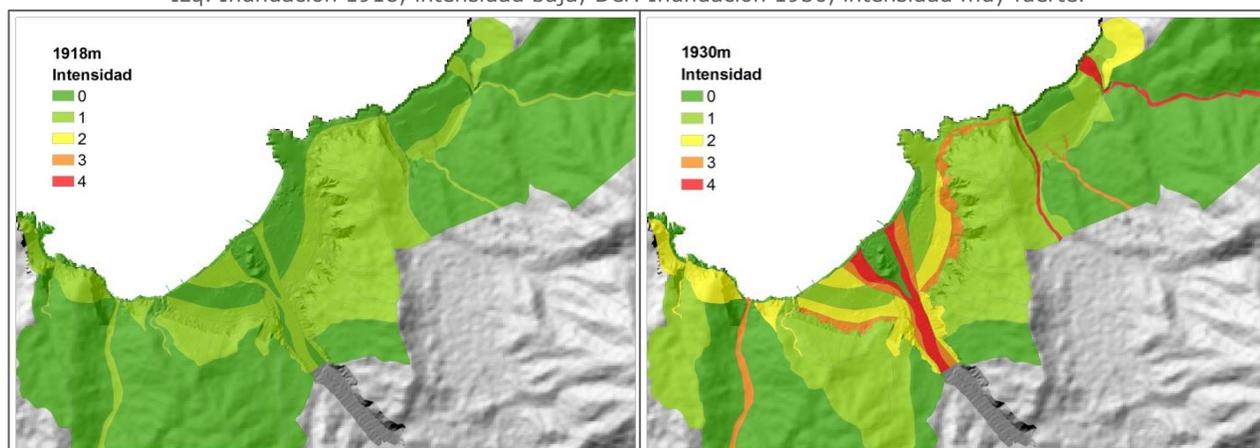
Fuente: Elaboración Propia.



Ilustración 3.3-3: Ejemplos zonificación de eventos.

Fuente: Elaboración Propia.

Izq. Inundación 1918, intensidad baja; Der. Inundación 1930, intensidad muy fuerte.



El catastro de terremotos y tsunamis muestra muy poca información utilizable para poder hacer una zonificación de los eventos para esta escala de estudio. En total, se encontraron 56 eventos sísmicos con alguna descripción, de los cuales 8 hacen referencia a remociones. En la Tabla 3.3-1, se muestran algunos ejemplos de las descripciones encontradas. Las frases destacadas en celeste, son las que hacen mención a efectos de remociones provocadas por sismos. Se puede observar que estas descripciones hablan de lugares fuera del área de estudio, son vagas o no mencionan los efectos causados. Por lo que no se puede elaborar una clasificación detallada de los lugares donde se han generado remociones o que han sido alcanzadas por ellos.

Tabla 3.3-1: Ejemplos de descripciones vagas de caídas de roca en terremotos.

Fuente: Elaboración Propia.

8-6-1909; 1:00; 7,6Ms	En Taltal el sismo fue fuerte, ocasionando alarma y quebrando platos, en las oficinas hubo derrumbes en los relaves.	M	C
15-5-1925; 7:18; 7,1Ms	Sismo se sintió con fuerza en Taltal, causando alarma. Movimientos forman grietas en calles y jardines, como caída de rocas de los cerros circundantes hacia las casas. Varios muros agrietados en peligro de derrumbarse.	F	C
13-7-1936; 7:15; 7,3Ms	Afectó a Taltal y a las oficinas de Santa Luisa y Flor de Chile. En Flor de Chile hubo derrumbes y en Santa Luisa fue destruido el campamento y las casas recién construidas. En Taltal hubo destrozos en el 80% de las casas, se rompieron los estanques y las cañerías de agua potable, se cayó gran parte de la postación y tendido del telégrafo. Hubo serios destrozos en el liceo de hombres, la gobernación, el correo, el cementerio, algunas iglesias y las plazas. Ley N°5933 concede fondos para la reparación de edificios públicos y auxiliar a los damnificados de Taltal. También hubo una muerte y una decena de heridos. Cortes en caminos por caídas de piedras.	MF	C
11-7-1993; 9:36; 6,6Mw	Sismo con mayor efecto en Taltal generó cortes de luz y teléfono por 15 minutos, desprendimiento de cornisas, sin daños importantes en la ciudad. Desprendimientos de tierra en el Km 30 camino a Paposo (Paso Malo) y en el camino de acceso a la Ruta 5.	M	C

3.4. Estimación del Período de Retorno

Con los datos recolectados en el catastro de eventos meteorológicos fue posible realizar una estimación del período de retorno para las precipitaciones máximas diarias, con base en los datos de la DGA. Esta estimación se realiza a partir del cálculo de la probabilidad de excedencia (Chow, et al., 1994), tal como se observa en el Anexo B—1 y el Anexo B—2, que reflejan las precipitaciones mensuales y las precipitaciones máximas diarias de Taltal y Aguas Verdes, respectivamente.

El cálculo de la probabilidad de excedencia (P_{ex}) se realiza a partir de la estimación de la distribución acumulada:

$$F(x_i) = \frac{i}{n+1}$$

Dónde x_i son los datos de precipitación máximas en 24 horas ordenados de la mayor precipitación registrada a la menor, con $i \in \{1, n\}$ en que n representa el número de años observados o el número de datos.

El período de retorno (T_i) en años, para una determinada cantidad de precipitación, corresponde a la inversa de la probabilidad de excedencia y también puede ser definido como la frecuencia (λ) de ese evento:

$$P_{ex}(x_i) = \frac{1}{T_i(x_i)} = \lambda$$

Así (P_{ex}) corresponde a la probabilidad anual de que un valor de precipitación determinado, sea excedido. Para calcular la probabilidad de que ese valor sea excedido durante un período t (en años), es necesario calcular la probabilidad de que ese valor no sea excedido ($P_{ex}(x < x_i)$). Al establecer una relación probabilística o de frecuencia acumulada, el resultado depende fuertemente de la magnitud de los eventos, por lo que (Corominas & Moya, 2008) recomiendan establecer una relación entre frecuencia y magnitud para llevar a cabo este acercamiento cuantitativo.

Los períodos de retorno estimados para las precipitaciones máximas diarias entre 1987 y 2015 se presentan resumidos en el Tabla 3.4-1 para las estaciones de Taltal y Aguas Verdes, la tabla completa puede ser revisada en el Anexo B: Períodos de Retorno. Además, la Ilustración 3.4-1 muestra la distribución de esos eventos, que fueron registrados y clasificados en el catastro. A modo de ejemplo, se destacaron algunos de los eventos clasificados para mostrar que los de intensidad fuerte y muy fuerte (2015, 1991, 1987) se encuentran en la parte alta de la curva, los de intensidad media y baja (1999, 2000) se distribuyen ampliamente, por debajo de los 10

años de retorno y un evento sin daños (2006), se encuentra en la parte baja de la curva. Mostrando de manera indirecta una relación entre frecuencia y magnitud, por medio de la estimación de las intensidades, ya que este gráfico no refleja directamente la magnitud de los eventos.

Tabla 3.4-1: Resumen Períodos de Retorno para el registro de precipitaciones.

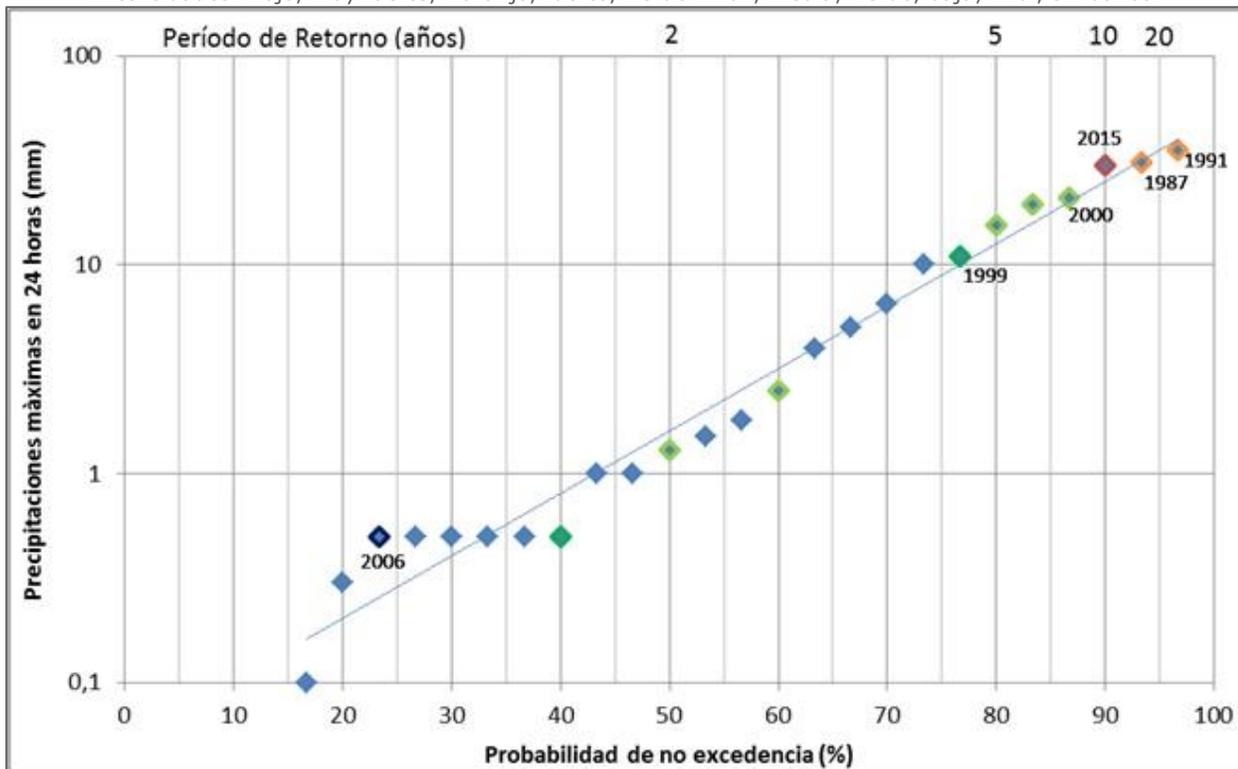
Fuente: Elaboración Propia.

Precipitación diaria (mm)		Probabilidad de excedencia	Período de Retorno (años)
Estación Taltal	Estación Aguas Verdes		
35,5	52,0	0,03	>30
31	33,6	0,07	>15
30	31,0	0,10	>10
21	19,5	0,13	>8
19,5	19,5	0,17	>6

Ilustración 3.4-1: Distribución de probabilidad de precipitaciones en Taltal.

Fuente: Elaboración Propia.

Intensidades: Rojo, muy fuerte; Naranja, fuerte; Verde limón, media; Verde, baja; Azul, sin daños.



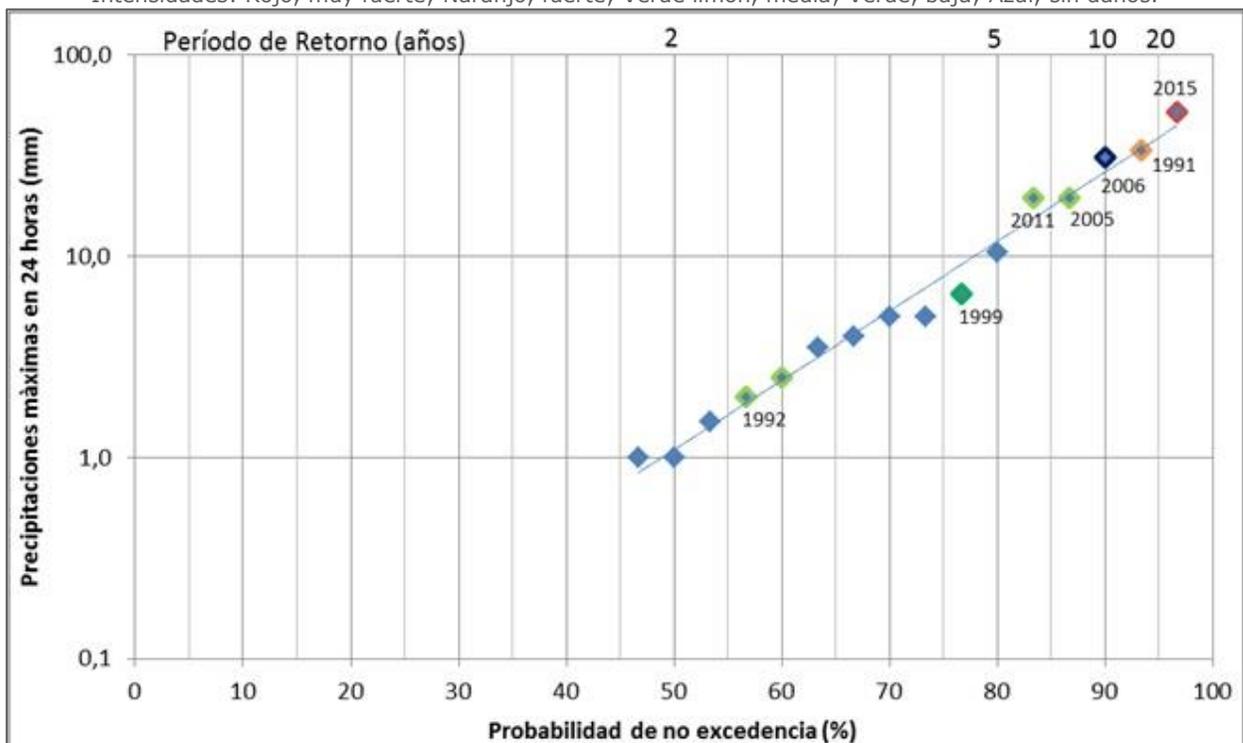
También se observan algunos eventos que no fueron mencionados en el catastro ya que no existe una descripción salvo el dato de la DGA, mostrando que el registro de los eventos de baja intensidad es incompleto. Por otro lado, se observa que entre los eventos de intensidad fuerte y muy fuerte no

existe una relación directa con las precipitaciones máximas en Taltal, esto se debe a que el evento del 2015 (muy fuerte) fue generado por precipitaciones en zonas más altas de la cuenca, como se ve reflejado en la Ilustración 3.4-2, que muestra la misma relación de probabilidad para la estación de Aguas Verdes. Por esta razón no es posible estimar los períodos de retorno de cada uno de los niveles definidos usando los registros de precipitaciones por lo que se calcularon los períodos de retorno de cada intensidad de manera análoga al cálculo que se hace para las precipitaciones máximas diarias, como se explica en el punto siguiente.

Ilustración 3.4-2: Distribución de probabilidad de precipitaciones en Aguas Verdes.

Fuente: Elaboración Propia.

Intensidades: Rojo, muy fuerte; Naranja, fuerte; Verde limón, media; Verde, baja; Azul, sin daños.



3.4.1. PERÍODOS DE RETORNO POR INTENSIDAD

Luego de establecer la relación entre frecuencia y magnitud, que es uno de los puntos clave que recomiendan Corominas y Moya (2008) para hacer la evaluación de peligro utilizando la intensidad, se calcularon los períodos de retorno realizando un procedimiento similar al cálculo de la probabilidad de excedencia de las precipitaciones diarias, pero reemplazando los valores de precipitaciones por el valor asignado a cada intensidad (0, para Sin Daños a 4, para Muy Fuerte). Ya que, de este modo, se pueden utilizar los datos recolectados en el catastro para hacer la estimación de los períodos de retorno, que se presentan en la Tabla 3.4-2

Tabla 3.4-2: Resumen Períodos de Retorno para intensidades estimadas.

Fuente: Elaboración Propia.

Intensidad		Período de Retorno
0	SD Sin Daños	>3 años
1	B Baja	>4 años
2	M Media	>7 años
3	F Fuerte	>22 años
4	MF Muy Fuerte	>44 años

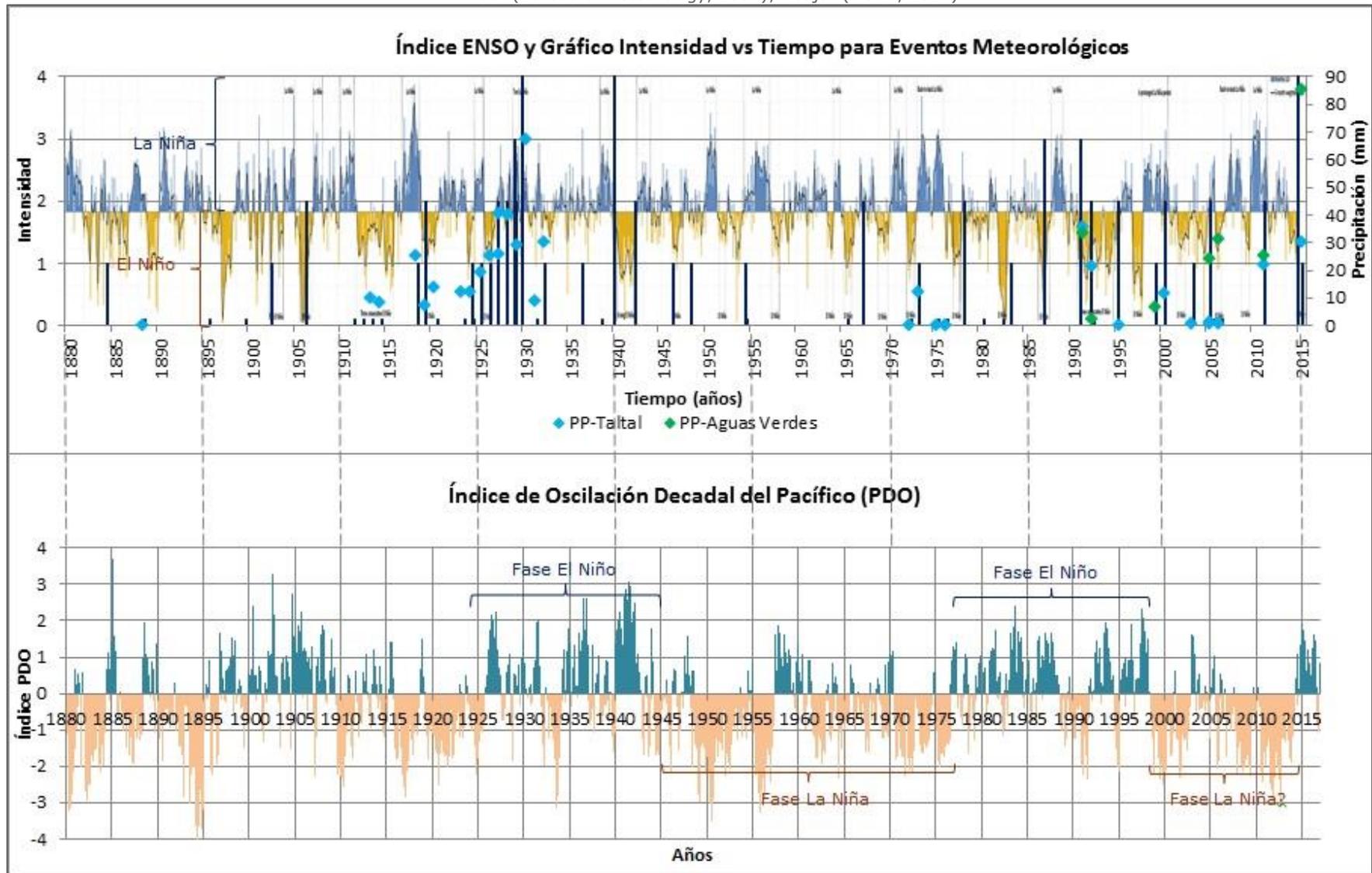
Por otra parte, a partir del análisis de las intensidades se pudo observar que los eventos meteorológicos desencadenantes de procesos de remociones en masa e inundaciones se encuentran bien correlacionados con los procesos climáticos ENOS y ODP, descritos en los antecedentes climáticos del punto 2.2.2. En la Ilustración 3.4-3, se presentan arriba las intensidades de los eventos superpuestas a un gráfico del índice ENSO, y abajo los datos del índice ODP, dónde se puede apreciar esta correlación. De manera específica se contabilizó que un 76% (47 de 62) de los eventos registrados ocurrieron durante los ciclos negativos de ENOS o en fechas de transición desde o hacia la fase positiva y un 100% de los eventos Fuertes y Muy Fuertes (6 eventos en total) ocurrieron durante la fase negativa, según los datos disponibles en Bureau of Meteorology (2007). Abajo, en la misma ilustración, se grafica el índice ODP, que en su fase positiva, se comporta de manera similar a la fase negativa de ENOS y que también muestra una buena correspondencia con la ocurrencia de los eventos, especialmente los de mayor intensidad (Vargas, et al., 2000; Vargas, et al., 2006).

A pesar de estos antecedentes, se decidió optar por hacer una aproximación de frecuencia para hacer el análisis del período de retorno, porque aun sabiendo que la correlación de los eventos climáticos en el Norte de Chile con los procesos ENOS y ODP es reconocida (Ortlieb, et al., 2002; Vargas, et al., 2000; Vargas, et al., 2006), poco se sabe sobre las causas de este fenómeno o sobre los efectos que el cambio climático podría tener en su comportamiento. De todas formas, estas correlaciones tienen utilidad para señalar que es posible que se generen condiciones climáticas desencadenantes de remociones e inundaciones de todas las intensidades y de manera cíclica.

En el caso de los terremotos, al igual que la zonificación de intensidades, no se realizó este procedimiento para el catastro de terremotos y tsunamis, ya que no es posible establecer una relación entre la frecuencia y la magnitud de los eventos a escala local, como se hizo para los eventos meteorológicos en el punto anterior.

Ilustración 3.4-3: Comparación de Intensidades con índices ENOS y ODP.

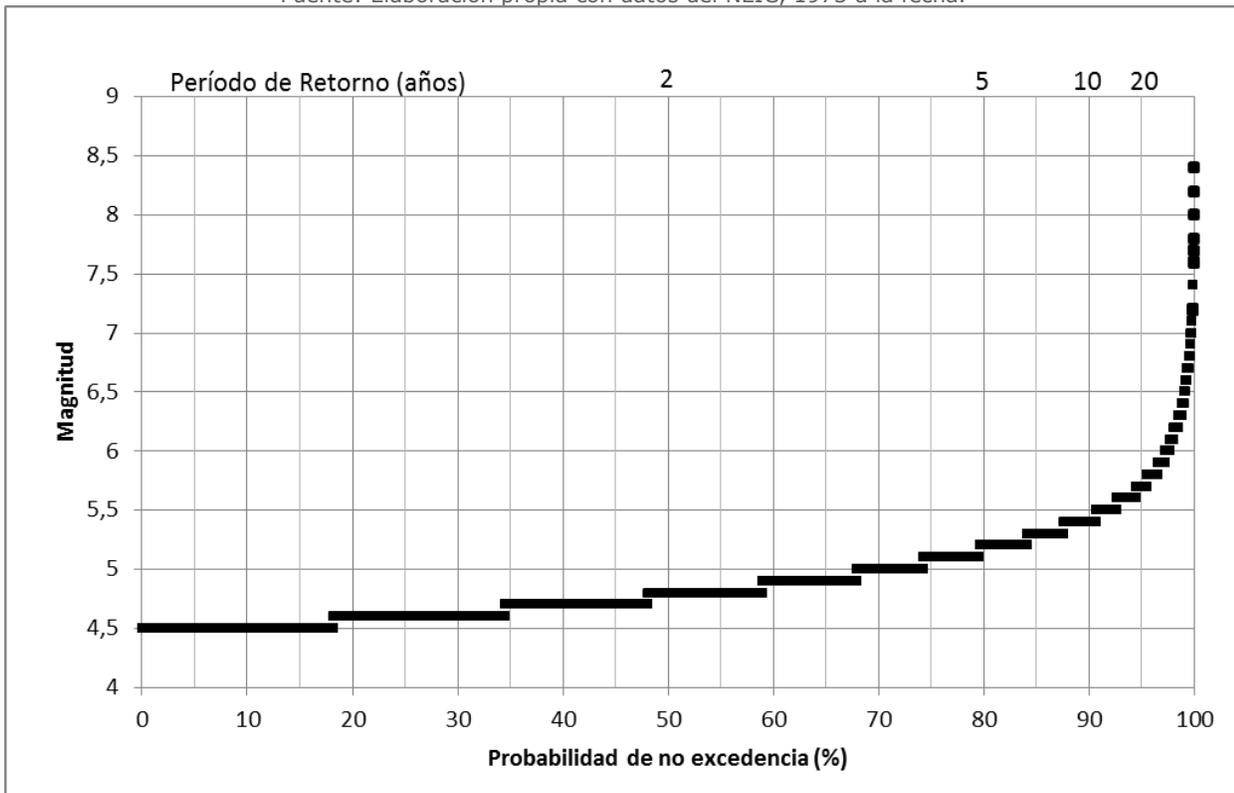
Fuentes: Adaptación de Vargas *et al.*, (2000) y (2006)
Arriba: (Bureau of Meteorology, 2007); Abajo: (NOAA, 2017)



De todas formas, se puede hacer una aproximación del período de retorno mediante la ley de Gutenberg-Richter y leyes de atenuación, que establecen una relación frecuencia-magnitud (Leyton, et al., 2010) de carácter regional, pero que se encuentran fuera del alcance de este estudio. Igualmente, se usaron los datos del NEIC para elaborar un gráfico similar al de las precipitaciones (Ilustración 3.4-4), con los sismos mayores a magnitud 4 registrados desde 1973. Este gráfico muestra que los períodos de retorno de los sismos de magnitud 7 o superior tienen un período de retorno de 340 años o más, llegando sobre los 7.500 años para los sismos de magnitud 8,4. Pero esta información no toma en cuenta la ubicación de la zona de ruptura, ni la ubicación del epicentro, ni la intensidad relativa del sismo en Taltal, ni las aceleraciones máximas esperadas, por lo que no se puede establecer una relación entre la frecuencia, la magnitud y la intensidad como en el caso de los eventos meteorológicos.

Ilustración 3.4-4: Distribución de probabilidad para sismos mayores a magnitud 4.

Fuente: Elaboración propia con datos del NEIC, 1973 a la fecha.



4. EVALUACIÓN DE SUSCEPTIBILIDAD Y DE PELIGRO

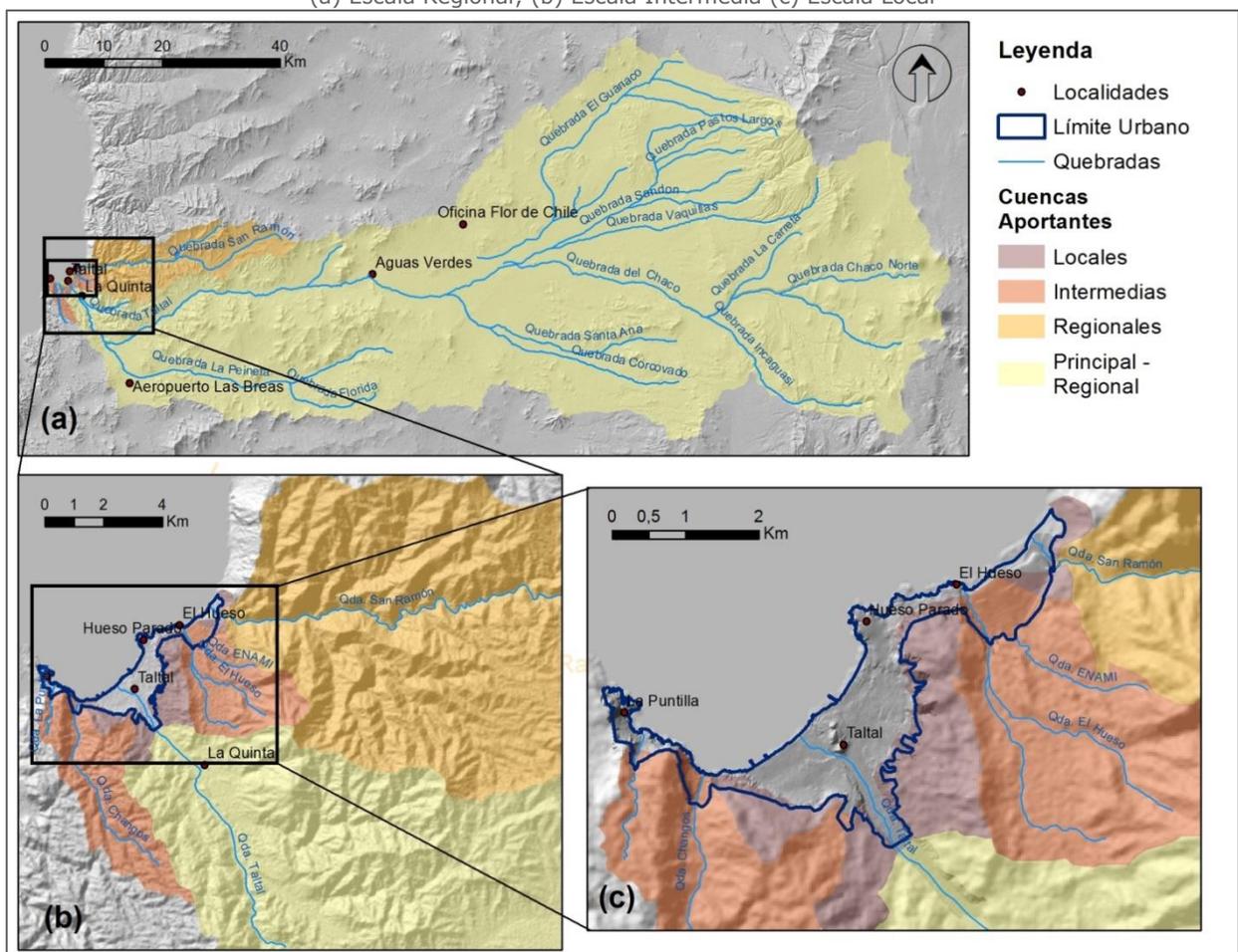
4.1. Escalas de Trabajo

Para realizar las evaluaciones de susceptibilidad y de peligro, se ha dividido el área de estudio en tres escalas de análisis y trabajo: escala regional, escala intermedia y escala local. La Tabla 4.1-1 muestra la razón de acercamiento que se usa para cada escala y las quebradas que se estudian dentro de cada una de ellas. Esta relación también se puede visualizar en la Ilustración 4.1-1, dónde se muestran los límites de cada una de las cuencas y con encuadre negro la posición y extensión relativa de cada una de las áreas de estudio dentro de la anterior.

Ilustración 4.1-1: Visualización de las escalas de trabajo.

Fuente: Elaboración Propia.

(a) Escala Regional; (b) Escala Intermedia (c) Escala Local



La elaboración de los mapas para cada evaluación se realizó a escala local dentro del límite del área urbana, al igual que el mapa geológico. Las áreas fuera del límite del área urbana, que rodean la ciudad, fueron analizadas a escala intermedia. Por último, el área de la desembocadura de las quebradas Taltal y San Ramón fue analizada a escala regional.

Tabla 4.1-1: Escalas de trabajo.

Fuente: Elaboración Propia.

Nombre	Razón	Tamaño	Quebradas aportantes
Escala regional (a)	1:250.000	Escala pequeña	Taltal y San Ramón
Escala Intermedia (b)	1:20.000	Escala mediana	Changos y El Hueso
Escala local (c)	1:5.000	Escala grande	Puntilla, ENAMI y laderas adyacentes al límite urbano

4.2. Procesos reconocidos

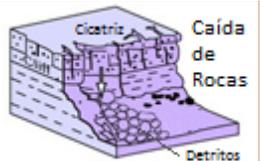
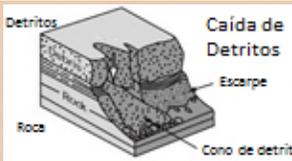
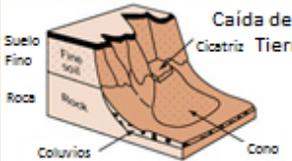
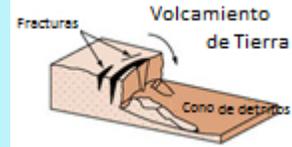
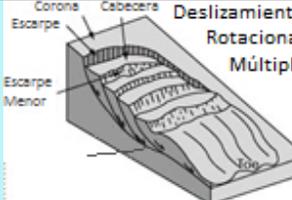
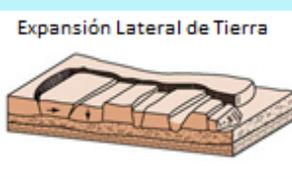
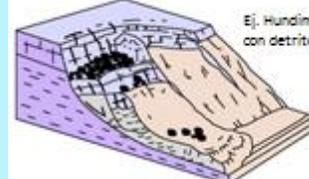
Para realizar las evaluaciones de susceptibilidad y de peligro, por las características de los datos recolectados y la aplicabilidad de metodologías en el sector, se decidió realizar tres diferenciaciones de los posibles procesos de remociones en masa e inundaciones que se desarrollan en el área de estudio. A partir de la clasificación de las remociones en masa presentada en la Tabla 4.2-1, las categorías son:

- **Caídas de roca, detritos y tierra.** (Café)
- **Procesos de ladera:** volcamientos, deslizamientos, expansiones laterales o procesos complejos de las laderas que pueden involucrar rocas, detritos, tierra o una mezcla de ellos. (Azul)
- **Inundaciones y flujos:** flujo de detritos, tierra, agua o una mezcla de los anteriores. (Verde)

Con base en las observaciones de los mapas base y del trabajo de terreno, se reconocen evidencias de procesos de caídas, de inundaciones y flujos, pero no se encuentran evidencias que indiquen la ocurrencia de procesos de ladera. Por lo que se descarta la evaluación de susceptibilidad para estos procesos geológicos. También se reconoció que los procesos de inundaciones y flujos se desarrollan de manera diferente, dependiendo del área de la cuenca en que ocurren las precipitaciones, por lo que se decidió dividir su estudio en dos partes:

Tabla 4.2-1: Clasificación de Remociones en Masa de Cruden & Varnes, 1996.

Fuente: Pesevski et al., (2015). Filas: Tipos de Movimiento. Columnas: Material. Café: Caídas; Azul: Procesos de Ladera; Verde: Flujos e Inundaciones.

		Roca	Detritos	Tierra
Caidas				
	Volcamientos			
Deslizamientos	Rotacionales			
	Traslacionales			
Expansión Lateral				
Flujos				
Remociones Complejas				

1. **Flujos e inundaciones de escala local:** son desencadenados por precipitaciones en la Cordillera de la Costa, se activan quebradas locales que confluyen en el área urbana y laderas que rodean la ciudad, pueden estar acompañadas de fuerte oleaje y viento.
2. **Flujos e inundaciones de escala regional:** son desencadenados por precipitaciones en la Depresión Central y/o en la Cordillera de Domeyko, se activan las quebradas Taltal y San Ramón, también pueden estar acompañadas de lluvia en la Cordillera de la Costa.

Estos procesos se estudiarán a escala local y regional respectivamente, elaborando mapas de los efectos a escala local (1:5.000).

4.3. Mapas Base

Como primer paso de la evaluación de susceptibilidad se construyó un mapa de la geología y geomorfología del área urbana de Taltal. Para este fin se utilizaron los siguientes insumos:

1. Fotos satelitales de ArcGIS y Google Earth (2016)
2. Fotos aéreas del SAF N°3924, N°3925 y N°3926, proyecto Geotec (1997), escala 1:80.000.
3. Fotos aéreas del IGM N°24412 y N°24413, vuelo Hycon (1956), escala 1:80.000.
4. Cartas geológicas de Naranjo y Puig (1984) y Escribano *et al.*, (2013).
5. Curvas de Nivel (y DEM formado a partir de estas curvas) de 2 y 2,5 m proporcionadas por la Municipalidad de Taltal.
6. DEM GT30, disponible en sitio web de la USGS, con resolución de 30x30m.
7. Inventario de zonas afectadas por eventos anteriores, elaborado según la metodología del punto 0.

Las fotos aéreas fueron revisadas con ayuda de un estereoscopio. Los mapas resultantes y las fotos fueron digitalizados y georeferenciados para su posterior uso, al igual que las cartas geológicas y se presentan en el punto 4.3.1. Con esta información se elaboró un mapa geológico auxiliar a escala intermedia (Ilustración 2.5-1, página 35), distinguiendo de forma gruesa la red de drenaje que descarga hacia la zona urbana de Taltal y procesos aluviales o coluviales dentro de esa red, cercanos a la ciudad.

La integración de la información se ve reflejada en un mapa geológico y geomorfológico a escala local (Ilustración 2.5-2, página 36), en el que se distinguen principalmente:

- Redes de drenaje
- Cuencas aledañas al área de estudio
- Cuerpos de roca consolidados
- Depósitos no consolidados debido a procesos aluviales, coluviales y/o marinos.
- Zonas urbanizadas o depósitos antrópicos por actividades mineras.
- Estructuras principales, contactos, relaciones de contacto y escarpes.
- Divisiones del área de estudio en principales unidades morfológicas: quebradas, laderas, llanuras o playas.
- Unidades geomorfológicas presentes en cada división.

La definición de unidades, observaciones de terreno y relaciones de contacto, asociadas al mapa geológico local fueron presentados en el marco geológico local del punto 2.5.

4.3.1. FOTOS AÉREAS

Se utilizó material fotográfico de la zona a escala 1:70.000 (HYCON, 1956; SAF, 1997). Para ambas series de fotos se realizó un mapeo estereoscópico identificando los principales rasgos morfológicos presentes tal como se muestran en la Ilustración 4.3-2 y en la Ilustración 4.3-1, respectivamente. En ambas series fue posible identificar la red de drenaje, depósitos no consolidados y escarpes. Con mayor detalle en la foto del SAF (1997) ya que tienen mejor resolución. Las fotos HYCON (1956) fueron especialmente útiles para mapear los depósitos no consolidados de las zonas actualmente urbanizadas y evaluar su alcance real. Además fue posible observar algunas diferencias en el terreno, como distintos niveles de relleno en algunas quebradas. También fue posible observar, las unidades geológicas de escala intermedia que generan mayor número de depósitos debido a remociones en masa, especialmente el cuarto miembro de la Formación La Negra [JIn(d)] correspondiente a brechas y tobas volcanoclásticas.

Ilustración 4.3-1: Foto SAF (1997) y mapeo con estereoscopio.

Fuente: Elaboración Propia. (Imagen no representa escala real)

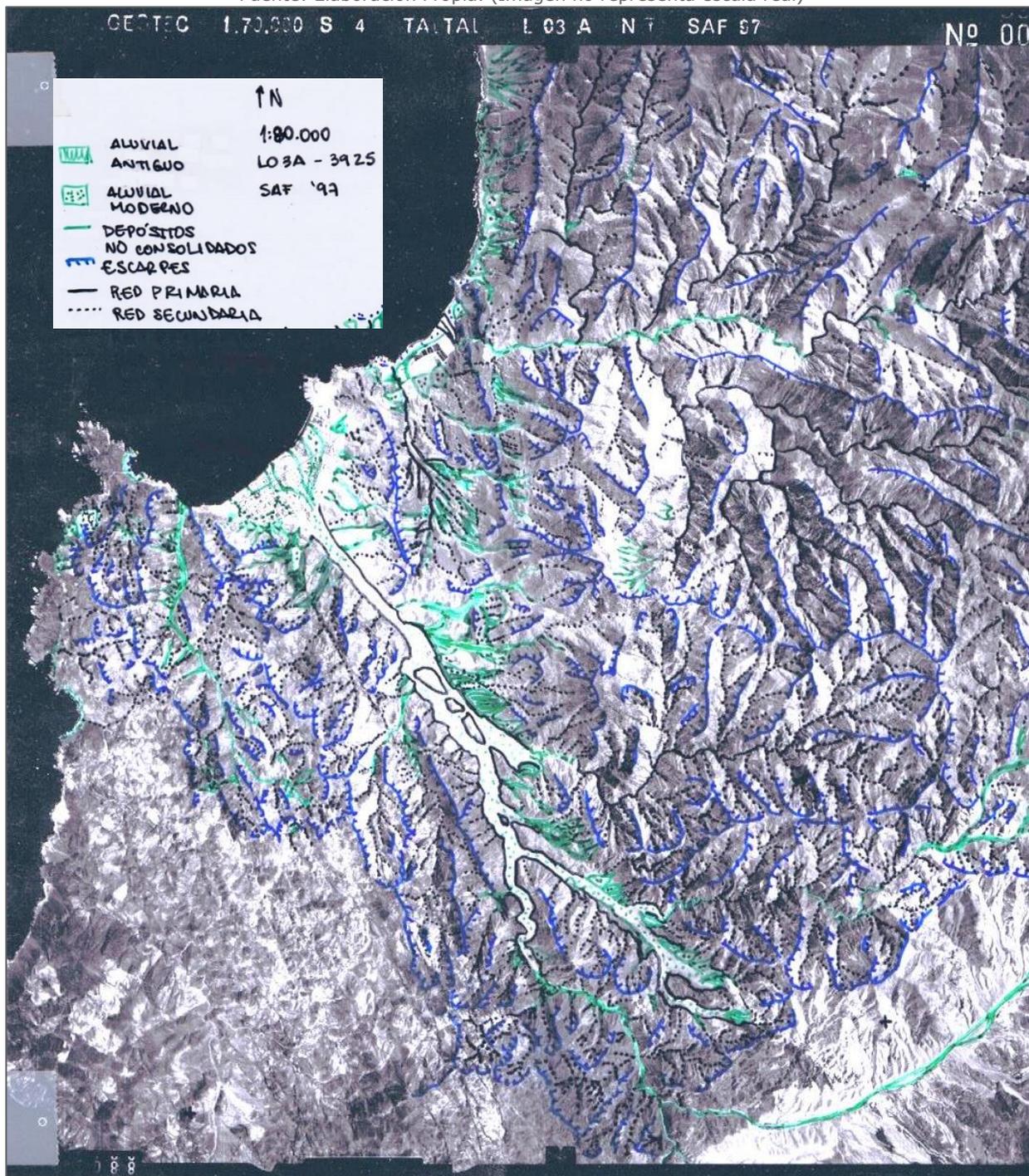
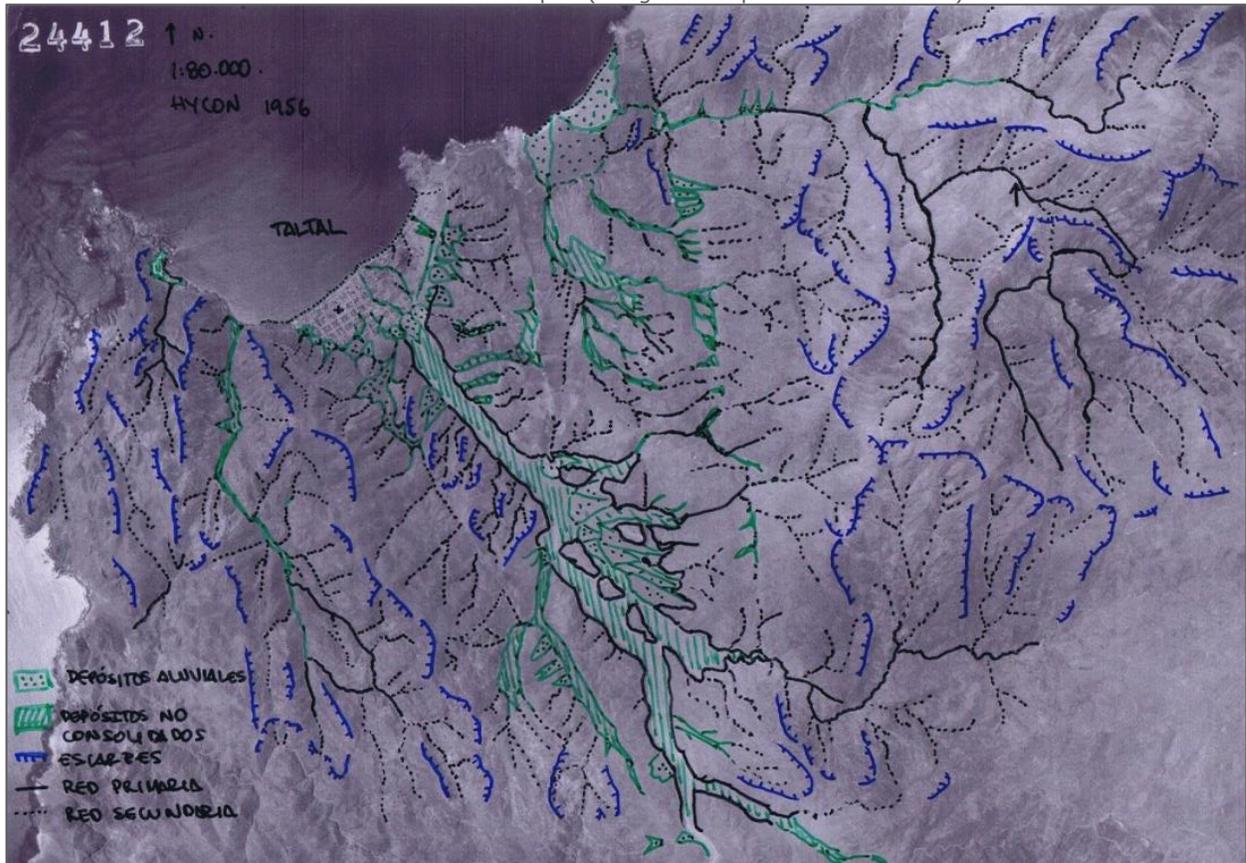


Ilustración 4.3-2: Foto HYCON (1956) y mapeo con estereoscopio.

Fuente: Elaboración Propia. (Imagen no representa escala real)



4.3.2. CAMPAÑA DE TERRENO

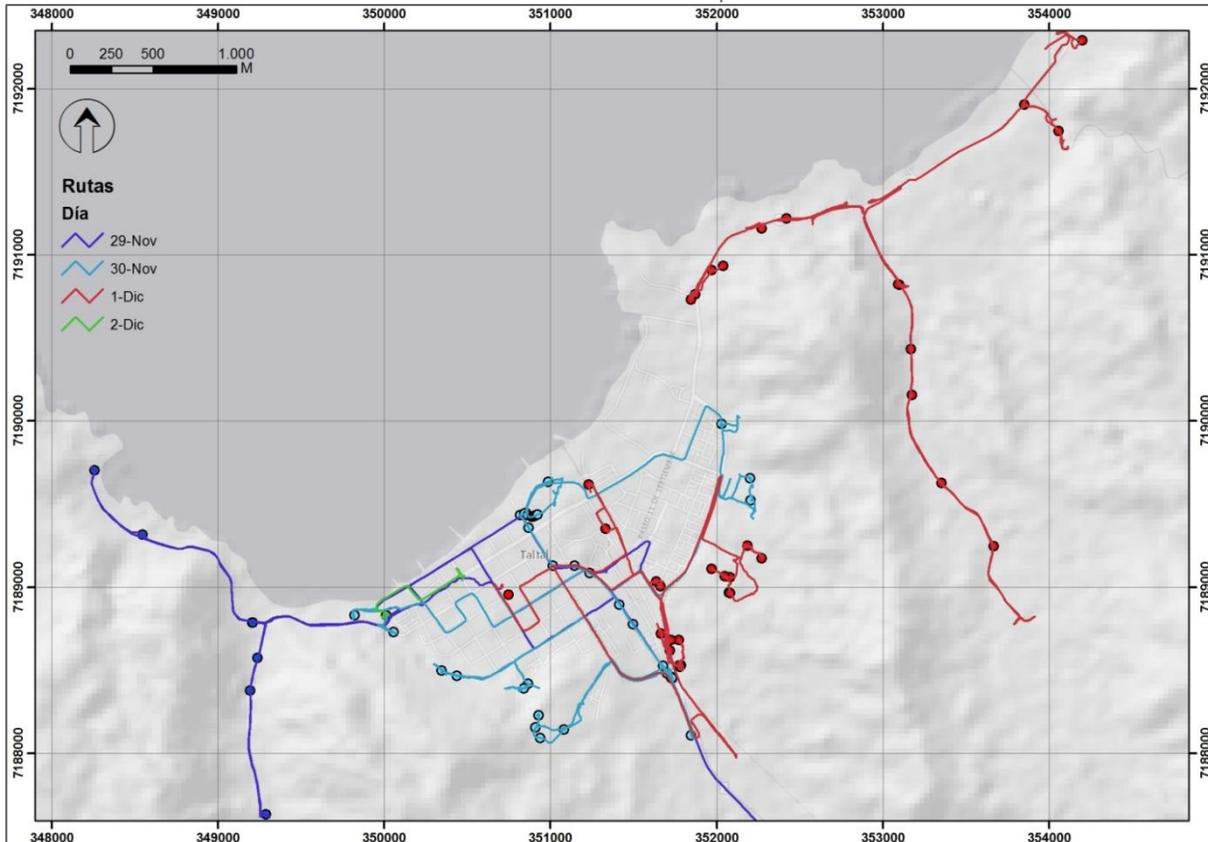
Consistió en una visita a la ciudad de Taltal de cuatro días incluyendo el tiempo de transporte. Durante la duración del trabajo en terreno se realizaron entrevistas a encargados municipales: Sra. Daisy Cortés, Encargada de Emergencia de la Municipalidad de Taltal y Sr. Rodolfo Contreras, antropólogo encargado del Museo "Augusto Capdeville Rojas" quienes corroboraron datos recolectados y compartieron más información.

Además se realizó un recorrido del área de estudio, durante el cual se registraron datos para la corrección del mapa geológico y para la futura elaboración del mapa de susceptibilidad. En los puntos visitados se registraron las coordenadas geográficas, se realizó un registro fotográfico, se examinó los afloramientos de roca, su estado de meteorización, la presencia de la formación de suelo o de depósitos no consolidados, las relaciones de contacto, su ubicación con respecto a las zonas urbanizadas y otras morfologías o estructuras presentes que puedan ser indicativas de actividad reciente. El trabajo en terreno permitió solucionar dudas y realizar la

descripción *in situ* de las unidades presentes, en la Ilustración 4.3-3 se muestra el recorrido realizado y los puntos de control.

Ilustración 4.3-3: Recorrido y puntos de control visitados en terreno.

Fuente: Elaboración Propia.



4.4. Evaluación de Susceptibilidad

4.4.1. METODOLOGÍA

Para realizar las evaluaciones de los procesos reconocidos, se eligió el método propuesto por Chau *et al.*, (2004) que utiliza la superposición de capas de datos SIG, ya que se acomoda bien a los insumos disponibles sobre el área de estudio, detallados en el punto 4.3. A partir de los DEM, se elaboraron capas para la pendiente, elevación, aspecto y acumulación de flujos. Con la información de la geología se elaboró una capa de distancia a las zonas de falla y la geología también se consideró como una capa. Cada una de estas capas fue dividida en clases, a las que se le asignó un valor de 0 a 100 según su influencia en la formación de los procesos ya mencionados, donde 100 corresponde a la mayor influencia y 0 indica que la clase no influye en este proceso. Este valor es llamado **índice de peligro (H)**. Las capas son sumadas luego, con distintos **pesos (W)**.

Para la integración de estas capas de información se realizó un ajuste y adaptación de los índices y pesos a los datos recolectados (Anexo H: Ajuste Metodológico). Ya que en el trabajo de Chau *et al.*, (2004), los autores proponen un análisis de peligro usando 7 capas de información GIS: elevación, pendiente, precipitaciones, zonas potenciales de alcance de las remociones, inventario de remociones, áreas cubiertas de suelo y geología. En el proceso de ajuste se revisó la pertinencia del uso de estas capas y se revisaron los valores de los índices de cada clase, que los autores tomaron de un inventario gubernamental de remociones en masa para la isla de Hong Kong. La Tabla 4.4-1 muestra los índices y pesos utilizados por los autores. La construcción de la capa sobre eventos pasados, será revisada en el punto 4.6, cuando se explique la evaluación de peligro, ya que será elaborada con ayuda de los datos del catastro.

Tabla 4.4-1: Pesos e índices de peligro utilizados por Chau *et al.*, (2004).

Pesos e índices de peligro para varias categorías, capas y clases.						
No. Clase (<i>i</i>)	Categoría	Capa (<i>j</i>)	Peso (W_i)	Clase (C_i)	Índice de Peligro (H_{ij})	
1	Terreno	Elevación (<i>h</i>)	0,5	0-200m	0,9838	
2				200-400m	1,0000	
3				400-600m	0,9114	
4	Geología	Litología	2,0	Ángulo de Pendiente (θ)	<15°	0,0000
5				15-18°	0,0142	
6				18-22°	0,0336	
7				22-27°	0,1382	
8				27-30°	0,2782	
9				30-34°	0,5115	
10				34-39°	1,0000	
11				39-45°	0,7164	
12				>45°	0,3300	
13				Suelo	Suelo	1,0
14	Toba Traquítica	0,5379				
15	Granito de grano fino	0,3753				
16	Granito de grano medio	0,3924				
17	Brecha tobácea	0,5288				
18	Toba cristalina con ceniza gruesa	0,6043				
19	Cuarzo	0,2162				
20	Granodiorita	0,2759				
21	Sí	1,0000				
22	No	0,0000				
23	Remociones	Eventos Pasados	2,0	<i>N</i> (No. /100m ²)	<i>N</i> /4	
24		Alcance Potencial	1,0	Sí	1,0000	
25	Ambiente	Precipitaciones	1,0	No	0,0000	
26				<i>r</i> (mm/mes)	<i>r</i> /1027	

La fórmula propuesta por Chau *et al.*, (2004) considera capas definidas para pixeles de 10x10m y son integradas para formar un mapa de peligro mediante la fórmula:

$$Peligro(x) = F(x) \frac{\sum_{j=1}^7 [W_j H_{ij}(x)]}{\sum_{j=1}^7 W_j}$$

Dónde F(x) es una función filtro definida por:

$$F(x) = \begin{cases} 0 & \text{si } \theta < 15^\circ \text{ y } H_{j25} = 0 \\ 1 & \text{para los otros casos} \end{cases}$$

En que $H_{j25}=0$ representa las áreas fuera del alcance de las zonas potenciales de remociones en masa y θ es el ángulo de la pendiente.

Este análisis se consideró apropiado para este estudio por varios motivos, en primer lugar, con la información DEM disponible es posible generar las capas de elevación y pendiente. Además, se ha elaborado una capa de geología (Ilustración 2.5-2, página 36) distinguiendo la presencia de depósitos no consolidados y la formación de suelo en la unidades de roca. También se construyó un inventario de eventos pasados (Anexo A—1 al Anexo A—7) y se conocen los lugares potencialmente alcanzables gracias al análisis de las fotos aéreas (punto 4.3.1). Se ha decidido dejar fuera, únicamente, a la capa de precipitaciones mensuales, ya que por las características de la zona de estudio, no es posible incorporar este dato como un factor condicionante, sino como desencadenante. Además, se decidió utilizar indicadores de 0 a 100 (a diferencia del original de 0 a 1), ya que los números enteros tienen un manejo numérico más preciso en ArgGIS 10.1, sin aproximaciones.

4.4.2. ÍNDICES Y PESOS ASIGNADOS

Según lo descrito en el punto 4.2, se reconocieron dos procesos: en primer lugar, las caídas y en segundo lugar, los flujos e inundaciones. Éste último será estudiado a dos escalas diferentes: flujos e inundaciones a escala local y flujos e inundaciones a escala regional. Se recuerda que la elaboración de los mapas de susceptibilidad se realiza revisando la influencia de cada proceso dentro del área de estudio local, a escala 1:5.000. Entonces la modelación de susceptibilidad se realizará para tres casos diferentes:

- **Caídas**
- **Inundaciones y flujos a escala local**
- **Inundaciones y flujos a escala regional**

4.4.2.1. Geología

Los índices de peligro de la capa de geología se asignaron elaborando una priorización de las unidades que más influyen en cada proceso. Esta priorización se hizo con base en las observaciones del Anexo Ajuste Metodológico, el estudio de la frecuencia de caídas, flujos o zonas afectadas por inundaciones para cada unidad. Revisando la zonificación de las fotos aéreas, observaciones de terreno y recomendaciones bibliográficas.

Para la generación de **caídas** (Tabla 4.4-2) se priorizaron las unidades de roca consolidada, ya que son prácticamente las únicas unidades con capacidad de formar bloques. En segundo lugar, se añadieron los depósitos sedimentarios en las laderas aledañas a la ciudad y los caminos, ya que contienen clastos de gran tamaño, que también pueden generar caídas.

Tabla 4.4-2: Asignación de los índices de peligro de unidades geológicas para caídas.

Nº Orden	Litología	Código	Índice de Peligro (H _i)
1	Lavas andesíticas- basálticas	[Jilna]	100
2	Lavas en almohadilla, brechas	[Jilnd]	100
3	Intrusivos riolíticos	[Jmhr]	100
4	Tobas, areniscas y brechas volcanoclásticas	[Jilnf]	80
5	Granodioritas- Monzogranitos	[Jmmgd]	60
6	Coluvios	[col]	60
7	Formas aluviales proximales	[al-pro]	60
8	Tonalitas y granodioritas	[Kilt]	60
9	Metaareniscas, pizarras y filitas	[Dccha] [Dcchb]	60
10	Formas aluviales Miocenas	[al-Mio]	30
11	Depósitos antrópicos	[hum]	20
12	Terrazas aluviales	[c-terr]	10
13	Terrazas marinas	[pl-terr]	10
14	Formas aluviales distales	[al-dis]	0
15	Canales de transporte	[al-act]	0
16	Depósitos de playa	[pl-act]	0
17	Canal de la quebrada principal	[al-qp]	0

Para las **inundaciones y flujos a escala local**, se ordenaron las unidades según su influencia en la generación de remociones puedan desarrollarse como un flujo (Tabla 4.4-3) con base en las influencias utilizadas por Chau *et al.*, (2004) y Evans *et al.*, (1997), que prioriza las unidades no consolidadas o con formación de suelo en las laderas aledañas a la ciudad.

Tabla 4.4-3: Asignación de los índices de peligro de las unidades geológicas para inundaciones y flujos a escala local.

Nº Orden	Litología	Código	Índice de Peligro (H _i)
1	Coluvios	[col]	100
2	Formas aluviales proximales	[al-pro]	90
3	Canales de transporte	[al-act]	80
4	Tobas, areniscas y brechas volcanoclásticas	[Jilnf]	70
5	Intrusivos riolíticos	[Jmhr]	70
6	Lavas en almohadilla, brechas	[Jilnd]	60
7	Formas aluviales Miocenas	[al-Mio]	40
8	Granodioritas- Monzogranitos	[Jmmgd]	30
9	Formas aluviales distales	[al-dis]	30
10	Lavas andesíticas- basálticas	[Jilna]	30
11	Terrazas marinas	[pl-terr]	25
12	Tonalitas y granodioritas	[Kilt]	20
13	Terrazas aluviales	[c-terr]	20
14	Depósitos antrópicos	[hum]	20
15	Metaareniscas, pizarras y filitas	[Dccha] [Dcchb]	15
16	Depósitos de playa	[pl-act]	15
17	Canal de la quebrada principal	[al-qp]	10

Para las **inundaciones y flujos a escala regional** (Tabla 4.4-4) se tuvo como criterio asignar una mayor influencia a las áreas susceptibles de ser alcanzadas dentro del área urbana, priorizando las unidades que se ubican en zonas más bajas, no consolidadas y asociadas al transporte.

Tabla 4.4-4: Asignación de los índices de peligro de las unidades geológicas para inundaciones y flujos a escala regional.

Nº Orden	Litología	Código	Índice de Peligro (H _i)
1	Canal de la quebrada principal	[al-qp]	100
2	Canales de transporte	[al-act]	100
3	Formas aluviales proximales	[al-pro]	80
4	Formas aluviales Miocenas	[al-Mio]	60
5	Formas aluviales distales	[al-dis]	60
6	Terrazas marinas	[pl-terr]	40
7	Terrazas aluviales	[c-terr]	40
8	Coluvios	[col]	40
9	Tobas, areniscas y brechas volcanoclásticas	[Jilnf]	20
10	Depósitos de playa	[pl-act]	20
11	Depósitos antrópicos	[hum]	20
12	Tonalitas y granodioritas	[Kilt]	15
13	Metaareniscas, pizarras y filitas	[Dccha] [Dcchb]	15
14	Lavas en almohadilla, brechas	[Jilnd]	10
15	Lavas andesíticas- basálticas	[Jilna]	10
16	Intrusivos riolíticos	[Jmhr]	10
17	Granodioritas- Monzogranitos	[Jmmgd]	10

4.4.2.2. Pendiente

En el caso de las **caídas** Lan *et al.*, (2010) indica que el 50% de las caídas ocurre en ángulos menores a 40° y el 84% en ángulos mayores a 30°, valores que se ajustan bien a las condiciones locales. Al igual que para los otros procesos, se mantienen las clases propuestas por Chau *et al.*, (2004), con índices ajustados a esta nueva información.

Para las **inundaciones y flujos a escala local**, se realizó una comparación de los valores sugeridos por Chau *et al.*, (2004), con los valores sugeridos por Esaki *et al.*, (2005). El primer trabajo indica que las pendientes entre 34 y 39° acumulan una mayor densidad de remociones y el segundo trabajo hace lo mismo para las pendientes entre 25-35°. Por lo que se decidió mantener los índices de Chau *et al.*, (2004) para las clases de pendiente, en que la clase más propensa a generar remociones es la de 27-39°.

Para las **inundaciones y flujos a escala regional**, se priorizó la susceptibilidad de alcance dentro del área urbana. Manteniendo las clases propuestas por Chau *et al.*, (2004), se asignó una mayor influencia a las pendientes más bajas, ya que los flujos pueden ser transportados o esparcidos, formando abanicos en los quiebres de pendiente. Todos los valores asignados para cada modelación se presentan en la Tabla 4.4-5.

Tabla 4.4-5: Asignación de los índices de peligro para pendientes.

Clases de Pendiente (°)	Índices de Peligro (H _i)		
	Flujos Locales	Flujos Regionales	Caídas
0-8	10	100	0
8-15	10	80	10
15-22	10	0	10
22-27	80	0	60
27-30	100	0	80
30-39	100	0	100
39-45	80	0	80
45-90	30	0	60

4.4.2.3. Elevación

Aunque no existe una relación directa entre la elevación y la generación de remociones (Chau, et al., 2004; Evans, et al., 1997), se observa que la mayoría de las **inundaciones y flujos de escala local** se generan entre los 50 a 400 m de altura para el área de estudio. Además las remociones generadas entre 50 a 200 m de altura tienen una mayor incidencia sobre la ciudad, por lo que son de mayor interés en este estudio (Tabla 4.4-6). En el

caso de las **inundaciones y flujos a escala regional**, para determinar el alcance de este proceso se priorizan las zonas de menor elevación. Por último para las **caídas**, de manera similar a los deslizamientos se observa que la mayoría de los bloques caídos, se encuentran cerca de laderas de 50 a 400 m altura y que en las cercanías de las áreas urbanizadas, corresponden a laderas entre los 100 a 200 m de altura.

Tabla 4.4-6: Asignación de los índices de peligro para elevaciones.

Elevación (m)	Índice de Peligro (H_i)		
	Flujos Locales	Flujos Regionales	Caídas
0-10	30	100	0
10-30	5	80	20
30-50	40	60	40
50-100	80	40	60
100-200	100	20	80
200-400	60	0	100
>400	20	0	80

4.4.2.4. Distancia a las fallas

La distancia a las fallas, se utiliza para **las inundaciones y flujos a escala local** y para las **caídas**, ya que no se considera un factor condicionante de las **inundaciones y flujos a escala regional** dentro del área urbana. Por las observaciones del ajuste metodológico se determinó aplicar esta capa para elevaciones mayores a los 60 m (correspondiente al área con resolución de 30m), ya que sobre esa altura se presentan los afloramientos de roca que pueden encontrarse alterados por la presencia de las fallas para generar deslizamientos (Tabla 4.4-7).

Tabla 4.4-7: Asignación de los índices de peligro para distancia a las fallas.

Distancia a las fallas (m)	Índice de Peligro (H_i)		
	Flujos Locales	Flujos Regionales	Caída de rocas
0-50	100	--	100
50-100	30	--	30

4.4.2.5. Zonas potenciales

Por último en la capa de zonas potenciales se añadieron las áreas con relieve convexo a la generación de **inundaciones y flujos a escala local**, y a las **caídas** (Ilustración 4.4-1, arriba y centro, respectivamente), ya que generan un mayor contraste topográfico, por lo que son más propensas a generar deslizamientos y bloques (Lan, et al., 2010). Esta capa, fue elaborada solamente para las zonas aledañas a la zona urbana. Para el alcance de las

inundaciones y flujos a escala local se añadieron las áreas afectadas durante marzo de 2015 y las desembocaduras de las quebradas San Ramón, El Hueso, Changos y La Puntilla en las que se menciona que hubo actividad y quebradas más pequeñas. La capa de acumulación de flujos no fue añadida ya que con la elaboración de las zonas potenciales se obtiene un aporte similar (Ilustración 4.4-1, Abajo). Los índices asignados en cada caso se puede revisar en la Tabla 4.4-8.

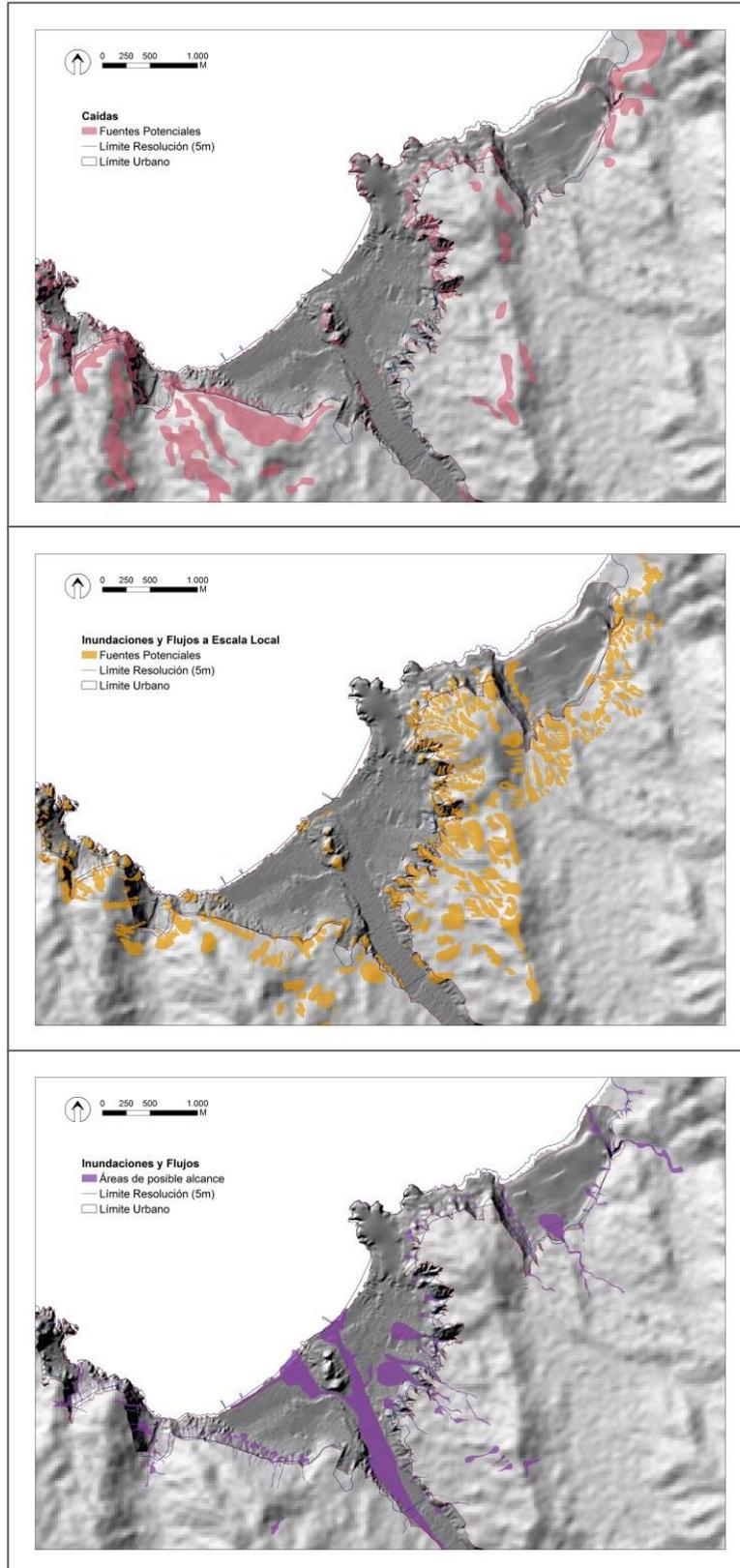
Tabla 4.4-8: Asignación de los índices de peligro para zonas potenciales.

Zonas potenciales	Índice de Peligro (I_i)		
	Flujos Locales	Flujos Regionales	Caída de rocas
Generación	100	--	100
Alcance	--	100	--

Ilustración 4.4-1: Zonas Potenciales identificadas para cada proceso.

Fuente: Elaboración Propia.

Arriba: Generación de Flujos Escala Local; Centro: Generación de Caídas; Abajo: Alcance de Inundación 2015 y áreas de acumulación de flujos.



4.4.2.6. Pesos

Se elaboraron mapas con distintas combinaciones de peso de las capas, con el fin de comparar y discutir los resultados. En primer lugar se usó la combinación C sugerida por Chau *et al.*, (2004), también se usó una distribución de pesos iguales (DI) y se elaboró una combinación extra (M), con menor peso de las zonas potenciales, para observar su influencia. Por otro lado, es importante destacar que la capa de distancia a las fallas, fue restringida sobre los 60 m de elevación, por lo que solo es aplicable para la zona de menor resolución (30m), haciendo que la sumatoria de los pesos sea diferente para cada resolución. En total se elaboraron 3 mapas para cada proceso y todas las combinaciones de pesos se presentan en la Tabla 4.4-9.

Tabla 4.4-9: Pesos asignados para mapas de susceptibilidad.

Se destacan combinaciones utilizadas para los mapas finales.

Capas	Pesos (W_j)					
	Caídas, Inundaciones y Flujos Locales			Inundaciones y Flujos Regionales		
	C	DI	M	C	DI	M
Geología (G)	1	1	1	1	1	1
Pendiente (P)	2	1	2	2	1	2
Elevación (E)	0,5	1	0,5	0,5	1	0,5
Distancia a las Fallas (DF)	0,5	1	0,5	--	--	--
Zona Potencial (ZP)	1	1	0,5	1	1	0,5
Suma Pesos 30m(ΣW_j)	5	5	4,5	4,5	4	4
Suma Pesos 5m(ΣW_j)	4,5	4	4	4,5	4	4

Los índices de peligro y los pesos de cada capa se integraron mediante la fórmula:

$$Susceptibilidad(x) = \frac{\sum_{j=1}^n W_j \cdot H_{ij}(x)}{\sum_{j=1}^n W_j}$$

Dónde x corresponde al valor de cada pixel en cada capa, n corresponde al numero de capas sumadas en cada caso, W_j son los pesos de cada capa y H_{ij} son los índices de peligro i de cada capa j . La división por la suma de los pesos, hace que el valor máximo de cada pixel sea de 100. Por lo que la coloración de los índices en los mapas generados se hace de 1 a 100.

4.5. Mapas de Susceptibilidad

Como se indicó en el punto anterior, los mapas de susceptibilidad se hacen con una evaluación de 1 a 100, que fue dividida en cinco categorías, con diferentes colores según su grado de influencia, que se presentan en la Tabla 4.5-1. Esta categorización se realiza puesto que, las áreas con un mayor valor de susceptibilidad, son las que reúnen una mayor calificación de influencia según su índice de peligro (H_{ij}) en cada una de las capas condicionantes y las áreas que tienen una categorización muy baja no reúnen condiciones que puedan ser influyentes en el proceso estudiado. Estos grados de influencia para las clases de cada capa fueron revisados en el punto 4.4.2. Los mapas de susceptibilidad de esta sección pueden ser revisados con mayor detalle en la carpeta anexa: Susceptibilidad.

Tabla 4.5-1: Categorías de susceptibilidad.

Valor	Categoría de Susceptibilidad
0 - 20	Muy Baja
21 - 40	Baja
41 - 60	Media - Moderada
61 - 80	Alta
81 - 100	Muy Alta

4.5.1. CAÍDAS DE ROCAS, DETRITOS Y TIERRA.

Para este proceso se presenta la combinación C (destacada en la Tabla 4.4-9) como mapa final en la Ilustración 4.5-2, que sigue los valores propuestos por Chau *et al.*, (2004) para los pesos, ya que es la combinación más conservadora y la que mejor coincide con los lugares en que se observaron depósitos coluviales [col] como producto de las caídas. Los mapas elaborados con las combinaciones DI y M, se presentan en la Ilustración 4.5-1, para comparar los resultados.

A la izquierda de la Ilustración 4.5-1, se observa que la combinación DI, destaca la influencia de la distancia a las fallas y la elevación, mostrando cortes abruptos en el mapa, al igual que las fallas. Por otro lado, la combinación M, presenta las zonas potenciales con un peso menor que en la combinación C, esto tiene como efecto la disminución del valor de la susceptibilidad en varias áreas del mapa, disminuyendo el alcance de las áreas de mayor susceptibilidad. El efecto que la combinación M muestra, permite evaluar la relevancia de la capa de zonas potenciales para el resultado final en la combinación C.

Ilustración 4.5-1: Variaciones de la susceptibilidad de caídas para distintos pesos.

Fuente: Elaboración Propia.

Arriba: Combinación DI; Abajo: Combinación M.

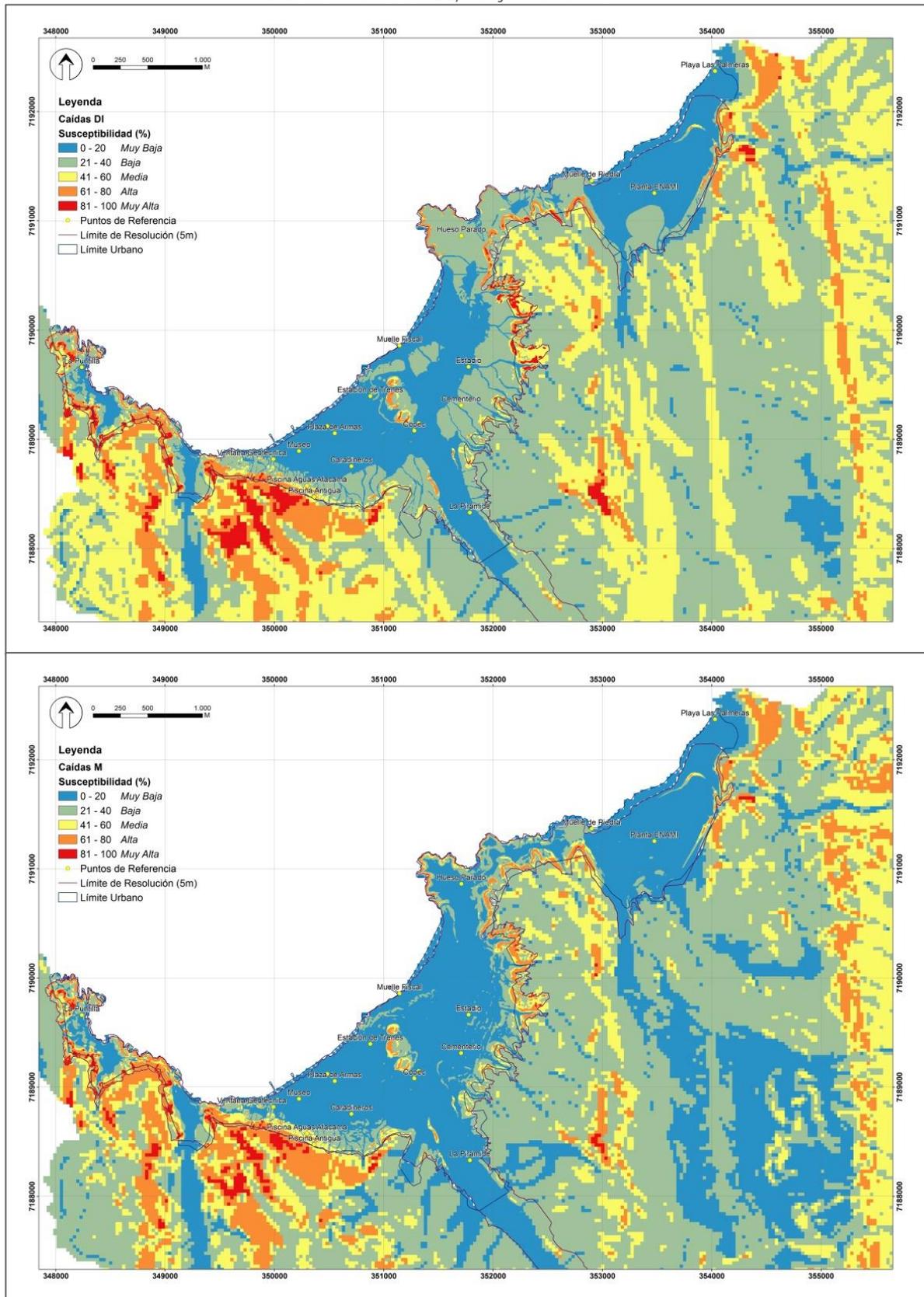
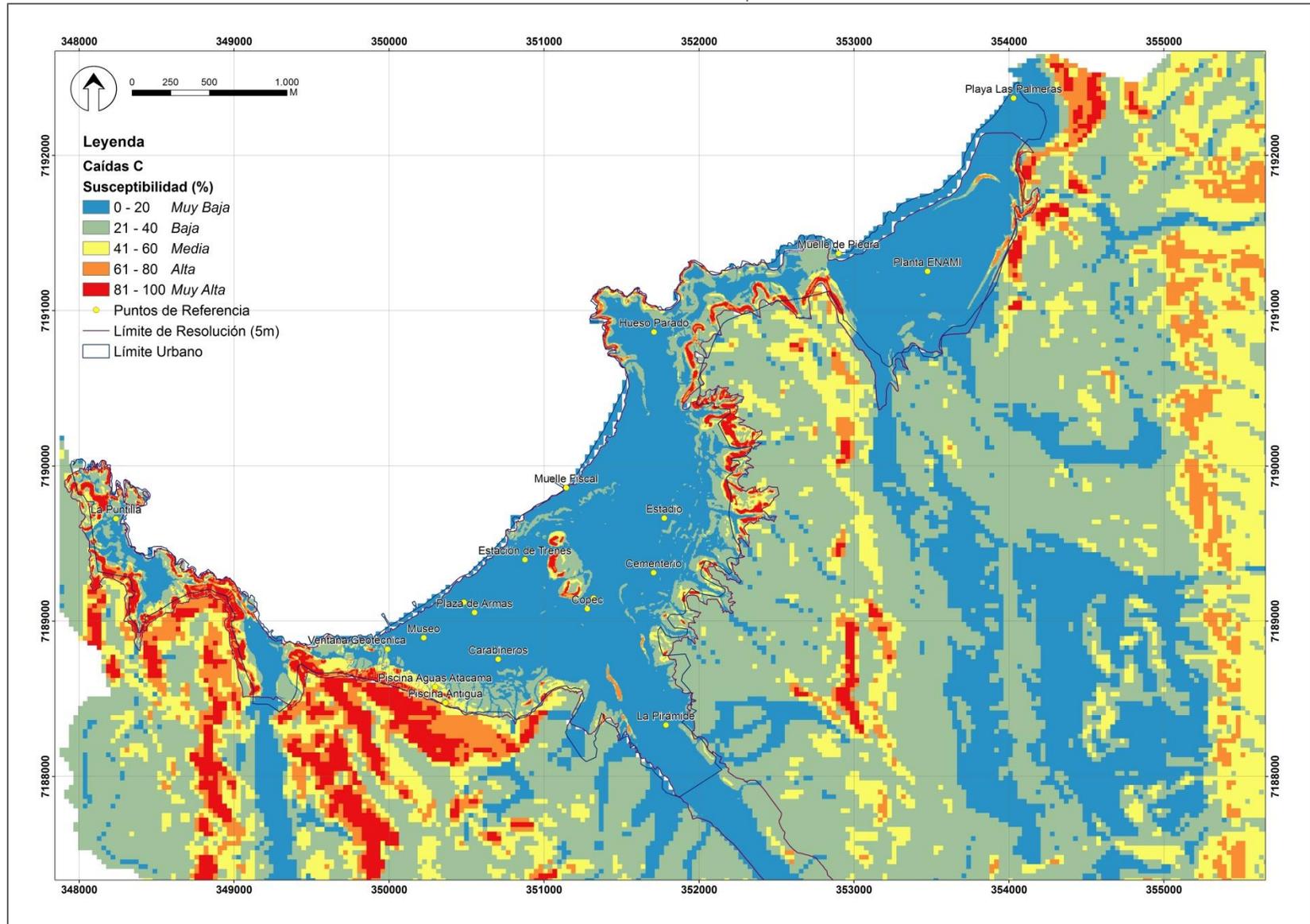


Ilustración 4.5-2: Mapa susceptibilidad de caídas.

Fuente: Elaboración Propia.



4.5.2. INUNDACIONES Y FLUJOS A ESCALA LOCAL

Para flujos locales se presenta la combinación C (destacada en la Tabla 4.4-9) como mapa final de susceptibilidad en la Ilustración 4.5-4, que usa los pesos recomendados por Chau *et al.*, (2004), por ser la combinación más conservadora y la que mejor representa las áreas con evidencias de actividad, en que se aprecia la formación de canales y el desarrollo de suelo. En la Ilustración 4.5-3 se presentan los mapas creados para las combinaciones DI y M. Al igual que para las caídas, la combinación DI exagera la influencia de la distancia a las fallas y la elevación; y la combinación M presenta las zonas potenciales con un peso menor que en la combinación C, consiguiendo el mismo efecto.

Para los dos casos ya presentados (caídas y flujos locales), la capa de distancia a las fallas, fue incorporada ya que la evidencia presentada por Álvarez *et al.*, (1967), indica que los sismos de mayor magnitud pueden generar fracturas en suelos de mala calidad. Estas fracturas, pueden servir de rampas o planos de debilidad para iniciar una remoción, ya sean recientes o con relleno posterior. Por otro lado, la presencia de las fallas, es un indicador de posibles alteraciones de la roca, que pueden incidir en su calidad geotécnica. Por estos motivos las áreas cercanas a las fallas conocidas se consideran más susceptibles para la generación de remociones, a pesar de que las fallas no se consideren activas. De todas formas, en ambos procesos la adición de esta capa se realizó con un peso amortiguado, ya que su correlación con la formación de remociones no es directa ni clara. Esta medida es la misma utilizada para el caso de la capa de elevación por Chau *et al.*, (2004), que presenta un problema similar.

Ilustración 4.5-3: Variaciones de la susceptibilidad de inundaciones y flujos locales para distintos pesos.

Fuente: Elaboración Propia.
 Arriba: Combinación DI; Abajo: Combinación M.

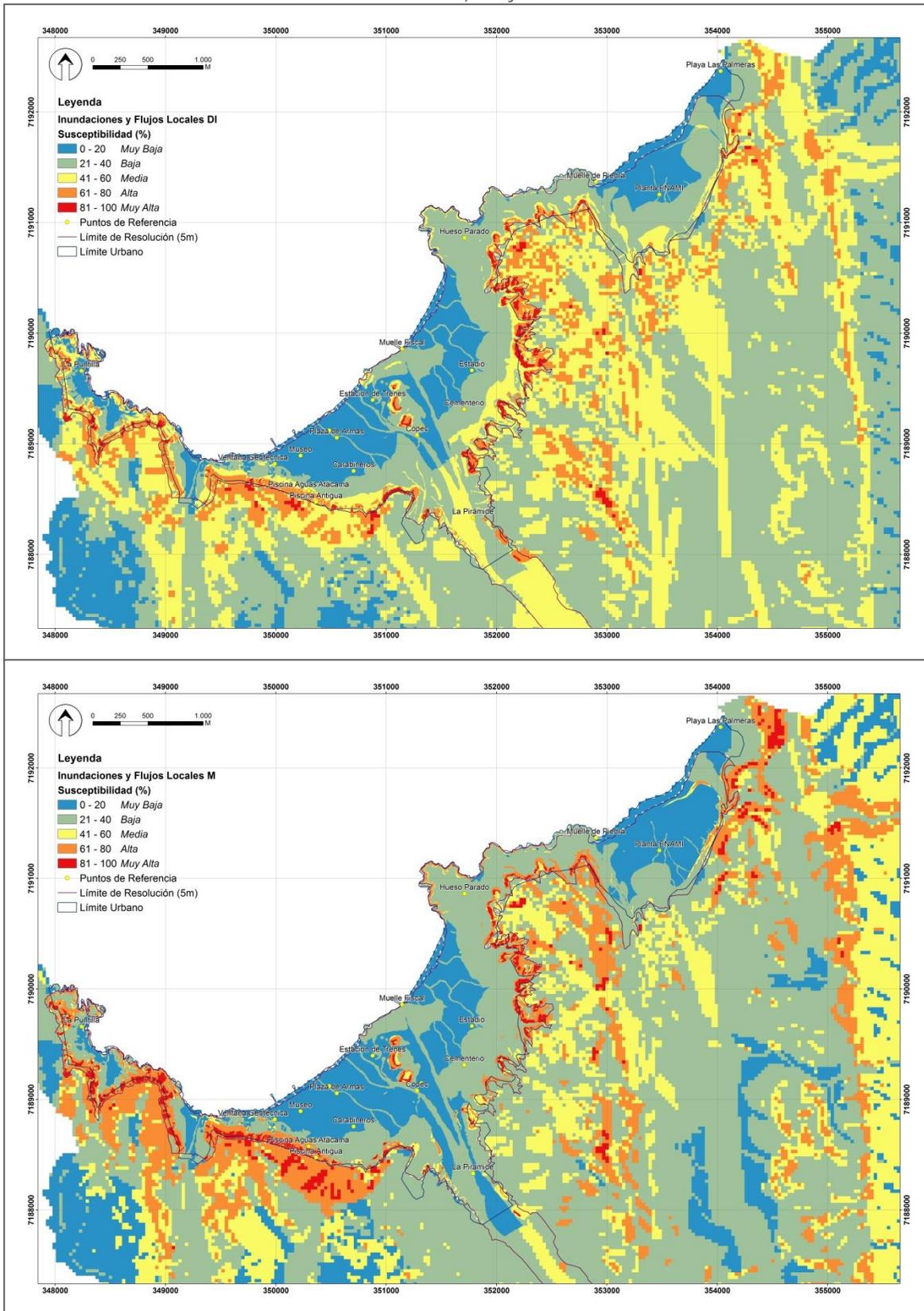
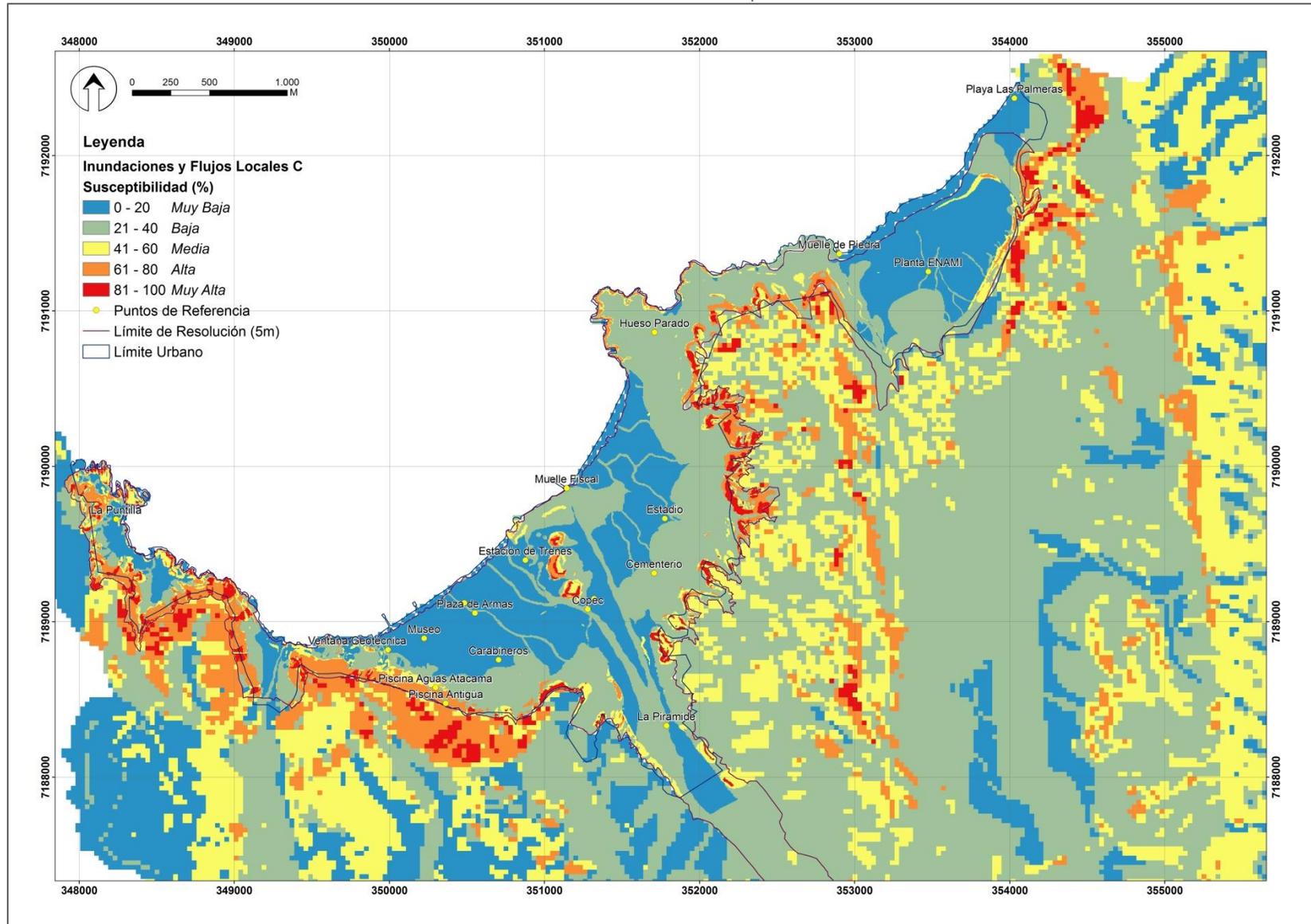


Ilustración 4.5-4: Mapa susceptibilidad de inundaciones y flujos locales.

Fuente: Elaboración Propia



4.5.3. INUNDACIONES Y FLUJOS A ESCALA REGIONAL

Por último, para la susceptibilidad de alcance de flujos de la quebrada principal y quebradas locales también se escogió la combinación de pesos C como mapa final en el Ilustración 4.5-6, ya que representa mejor las zonas afectadas por eventos anteriores y las evidencias de actividad de las fotos aéreas. En la Tabla 4.4-9 se resumen los pesos utilizados para cada combinación y en la Ilustración 4.5-5 se presentan los mapas elaborados para las combinaciones DI y M, en los que se observa un comportamiento similar a lo mencionado en los puntos anteriores.

Ilustración 4.5-5: Combinación DI para inundaciones y flujos regionales.

Fuente: Elaboración Propia.

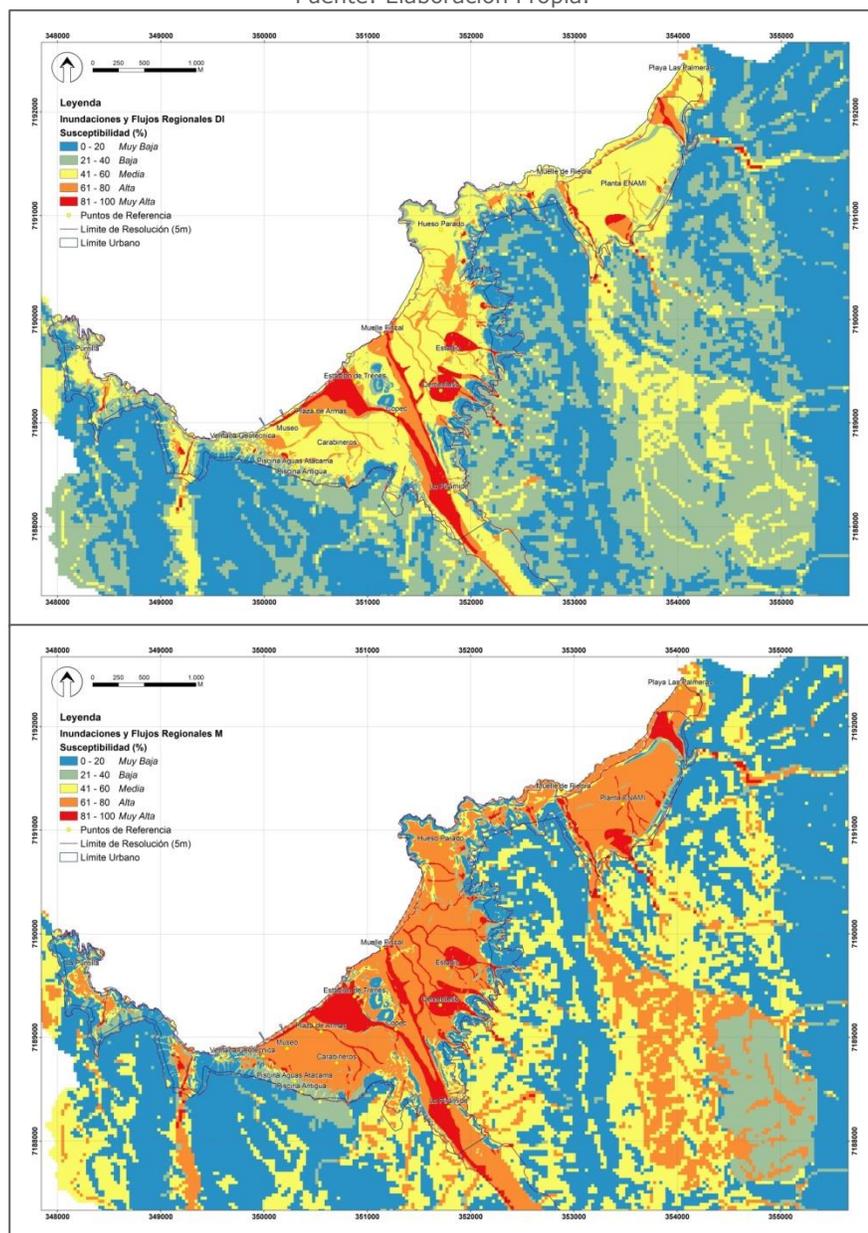
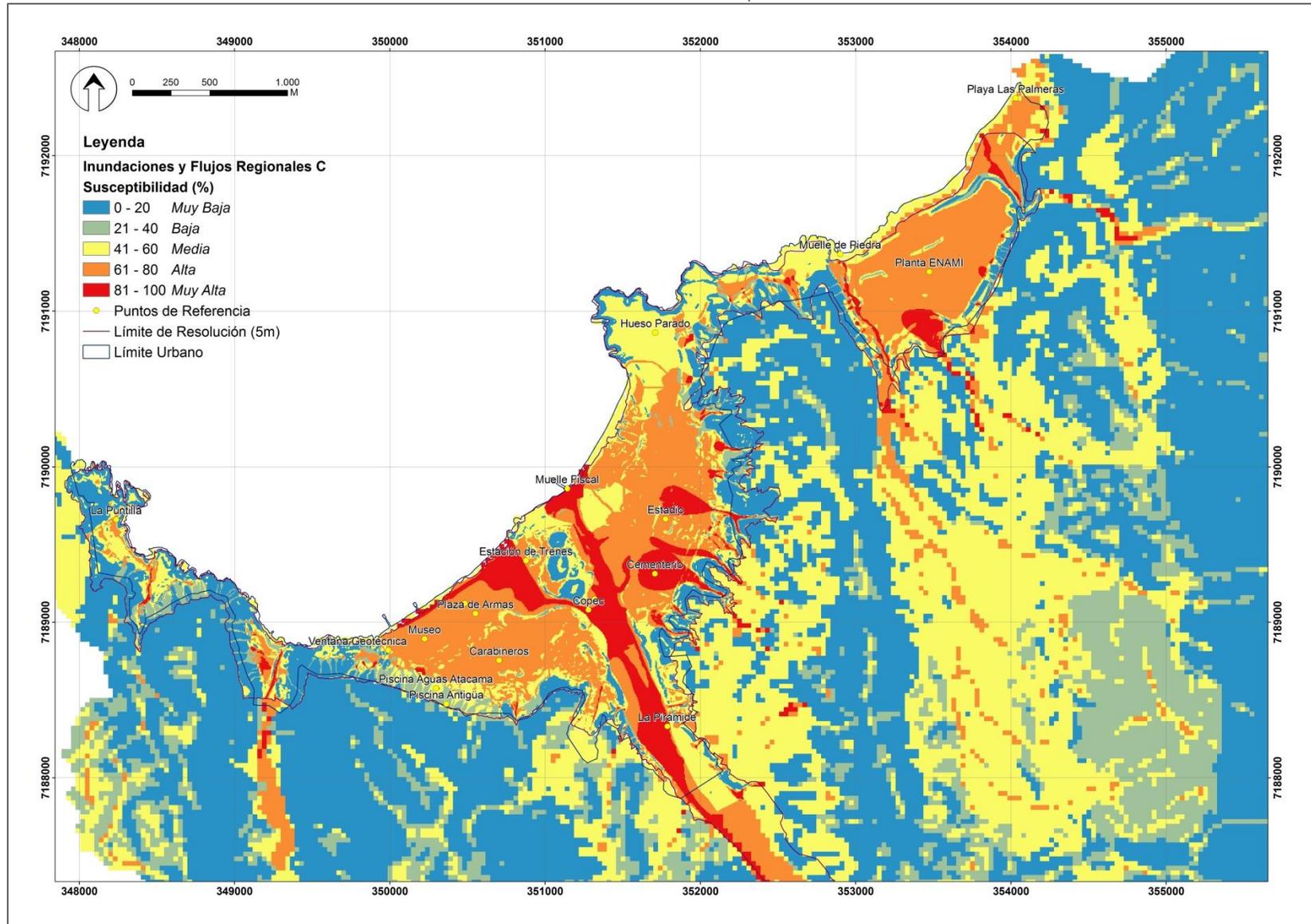


Ilustración 4.5-6: Mapa susceptibilidad de inundaciones y flujos regionales.

Fuente: Elaboración Propia.



4.6. Evaluación de Peligro

Para elaborar la evaluación de peligro se construyó una capa adicional al método utilizado hasta ahora para evaluar la susceptibilidad, esta capa se construye a partir del inventario y zonificación de remociones desarrollado en el punto 3.3, en el que se reconocieron dos procesos desencadenantes principales: la sismicidad y las precipitaciones. Tal como se mencionó en el punto 3.2, no fue posible realizar una zonificación de los eventos generados por terremotos, debido a la poca cantidad de datos específicos para el área de estudio local y porque vagamente se mencionan los efectos de las remociones, además el peligro sísmico se suele zonificar para escalas de estudio menores. Por estos motivos se ha decidido no utilizar el catastro de terremotos para evaluar la sismicidad como desencadenante dentro de este estudio. En cambio, el registro de los eventos desencadenados por causas meteorológicas, pudo ser utilizado para elaborar una zonificación de cada uno de los eventos y a continuación se explica cómo se utilizaron estas zonificaciones para realizar una evaluación de frecuencia y de peligro.

4.6.1. EVALUACIÓN DE FRECUENCIA

Las zonificaciones de los eventos meteorológicos (punto 3.2) fueron utilizadas para estimar la frecuencia en que cada unidad dentro del mapa (celda de 5x5 m o 30x30 m, según la resolución disponible) es calificada con un determinado valor de intensidad (I_i). Como 56 eventos cuentan con mapas, el máximo valor de frecuencia posible para un área del mapa es 56. El valor de la frecuencia de cada intensidad para una celda es representado por la fórmula:

$$f(I_i) = \sum_{j=1}^{n=56} R_j(I_{ij}); \text{ donde } R_j(I_{ij}) = \begin{cases} 0 & \text{si } R_j(I_{ij}) \neq I_i \\ 1 & \text{si } R_j(I_{ij}) = I_i \end{cases}$$

Dónde, R_j es un filtro que indica si la celda del evento j tiene un valor de intensidad I_i o no (detallado en la Tabla 4.6-1). El valor de n corresponde al número de eventos con zonificación de intensidad y se asume que los años sin mapa, no tuvieron eventos.

Tabla 4.6-1: Valor numérico de la Intensidad.

Fuente: Elaboración Propia.

Intensidad	Sigla	Valor (I_i)
Muy Fuerte	MF	4
Fuerte	F	3
Media	M	2
Baja	B	1
Sin Daños	SD	0

A partir de este cálculo se generan 5 mapas de frecuencia, uno para cada intensidad con su correspondiente período de retorno, estimado en el punto 3.4. El conteo de frecuencia, indica cuántas veces ocurrió un evento de determinada intensidad para cada unidad del mapa. En la Ilustración 4.6-1 se presentan los conteos de frecuencia de cada intensidad (ver la carpeta anexa: Peligro, para mayor detalle), dónde se puede observar que a medida que aumenta la intensidad, el área total afectada disminuye, al igual que el valor de la frecuencia. Es decir que, los eventos de menor intensidad son más frecuentes y están más ampliamente distribuidos que los eventos de mayor intensidad, que han ocurrido pocas veces y tienen consecuencias más intensas en áreas más reducidas. Por este motivo, si se utilizan los valores de frecuencia para realizar la zonificación de peligro, las áreas de intensidad Fuerte y Muy Fuerte tendrían los valores más bajos, mientras que las áreas afectadas por eventos Sin Daños serían las de mayor valoración.

Para resolver este problema se utiliza la frecuencia acumulada, ya que como explican Corominas y Moya (2008), este valor estadístico representa curvas de frecuencia acumulada en el plano que se desea estudiar, dando mayor importancia a los eventos de mayor intensidad. Entonces, para crear un mapa final, representativo de toda la información del catastro, se elige usar la frecuencia acumulada con la fórmula:

$$f_{ac}(I_i) = \sum_{j=0}^{n=i} f(I_j)$$

Que se puede visualizar más fácilmente en la Tabla 4.6-2.

Tabla 4.6-2: Visualización de la suma de la frecuencia acumulada.

Fuente: Elaboración Propia.

	f(SD=0)	f(B=1)	f(M=2)	f(F=3)	f(MF=4)
f_{ac} (SD=0)	f ₀				
f_{ac} (B=1)	f ₀	+ f ₁			
f_{ac} (M=2)	f ₀	+ f ₁	+ f ₂		
f_{ac} (F=3)	f ₀	+ f ₁	+ f ₂	+ f ₃	
f_{ac} (MF=4)	f ₀	+ f ₁	+ f ₂	+ f ₃	+ f ₄

En la Ilustración 4.6-2, se muestran los planos de frecuencia acumulada, para cada grado de incremento en la intensidad. En estos planos se observa que, a medida que aumenta la intensidad, también aumenta la frecuencia de activación de las distintas áreas, destacando las que han sido activadas con mayor intensidad. El plano de frecuencia acumulada que se utilizó para la evaluación de peligro, corresponde al marcado como "SD+B+M+F+MF" (Abajo en la Ilustración 4.6-2), mostrando la frecuencia acumulada total para cada punto del área de estudio, sin considerar su intensidad.

Ilustración 4.6-1: Planos de frecuencia para cada Intensidad.

Fuente: Elaboración Propia.

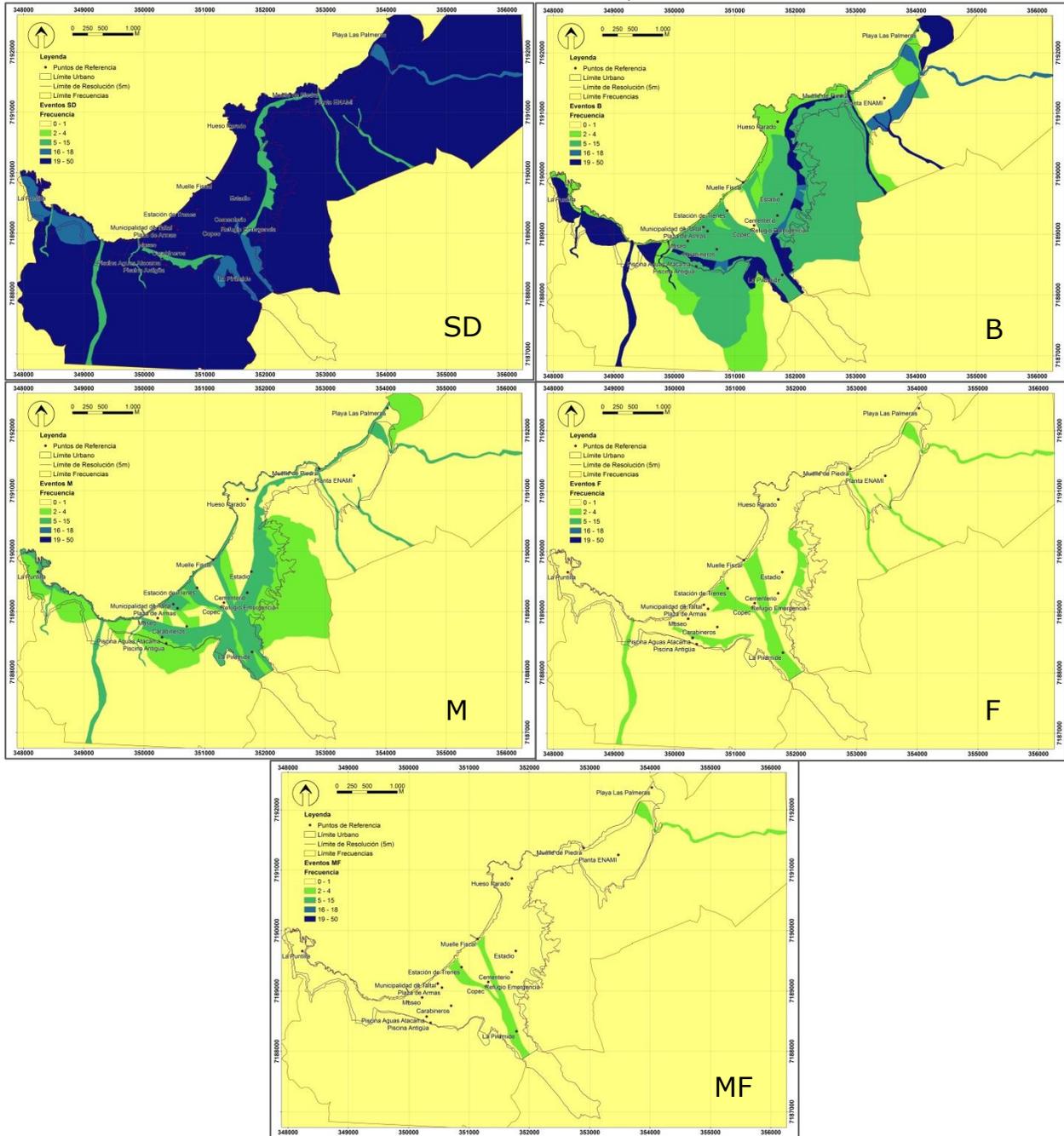
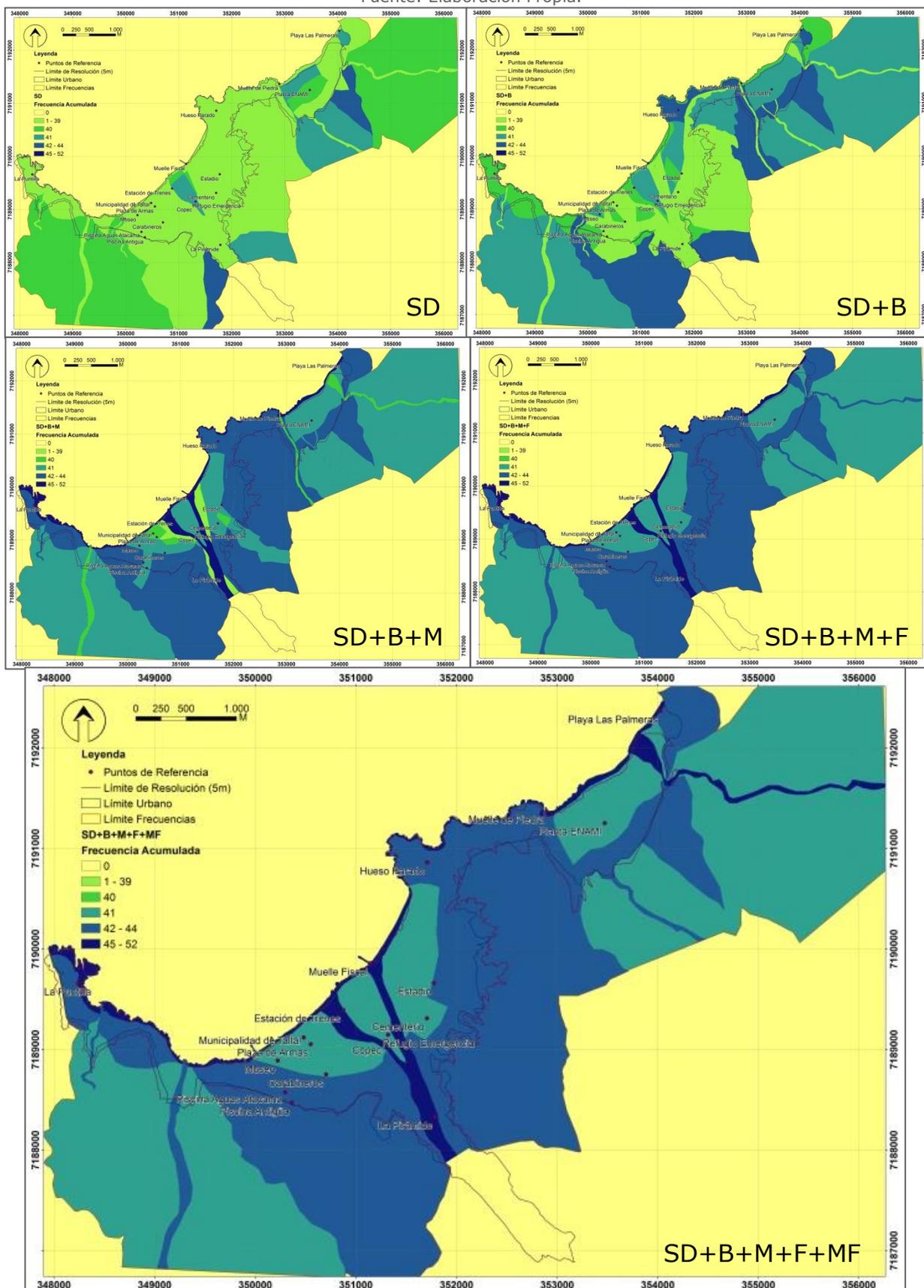


Ilustración 4.6-2: Planos de frecuencia acumulada.

Fuente: Elaboración Propia.



4.6.2. ELABORACIÓN DE MAPAS DE PELIGRO

Para elaborar los mapas de peligro, se utilizaron los mapas de susceptibilidad presentados en el punto 4.5, según los parámetros del punto 4.4.2. Al igual que para la susceptibilidad se realizó una evaluación de los mapas elaborados, para elegir los que tuvieran un mejor ajuste a las condiciones reconocidas en el área de estudio. Cada uno de los mapas de susceptibilidad es combinado con la capa de mayor frecuencia acumulada: f_{ac} (MF=4), según lo explicado en el punto anterior.

Para cada proceso se elaboraron tres mapas de peligro, con las combinaciones de pesos utilizadas en la susceptibilidad y que se resumen en la Tabla 4.6-3. Las frecuencias fueron normalizadas, como se hizo con las otras capas, y los pesos utilizados fueron sumados mediante la fórmula:

$$Peligro(x, I_i) = \frac{(\sum_{j=1}^n W_j) \cdot Susceptibilidad(x) + W_p \cdot \hat{H}}{\sum_{j=1}^n W_j + W_p}$$

Dónde:

$$Susceptibilidad(x) = \frac{\sum_{j=1}^n W_j \cdot H_{ij}(x)}{\sum_{j=1}^n W_j}$$

Y también x corresponde al valor de cada pixel en cada capa, n corresponde al numero de capas sumadas en cada caso, W_j son los pesos de cada capa, W_p es el peso de la capa de peligro, H_{ij} son los índices de peligro i de cada capa j y \hat{H} es la capa de peligro (formada con las frecuencias acumuladas). La división por la suma de los pesos, hace que el valor máximo de cada pixel sea de 100. Por lo que la coloración de los índices en los mapas generados se hace de 1 a 100, al igual que para la susceptibilidad.

Tabla 4.6-3: Pesos utilizados para elaboración del mapa de peligro.

Fuente: Elaboración Propia.

Azul: Peso capa de peligro; Rosado: Combinación utilizada para mapa final de peligro.

Capas	Pesos (W)					
	Caídas, Inundaciones y Flujos Locales			Inundaciones y Flujos Regionales		
	C	DI	M	C	DI	M
Geología (G)	1	1	1	1	1	1
Pendiente (P)	2	1	2	2	1	2
Elevación (E)	0,5	1	0,5	0,5	1	0,5
Distancia a las Fallas (DF)	0,5	1	0,5	--	--	--
Zona Potencial (ZP)	1	1	0,5	1	1	0,5
Peligro (H)	2	1	2	2	1	2
Suma Pesos 30m($\sum W_j + W_p$)	7	6	6,5	6,5	5	6
Suma Pesos 5m($\sum W_j + W_p$)	6,5	5	6	6,5	5	6

4.7. Mapas de Peligro

Al igual que para la susceptibilidad, los mapas de peligro se cuentan con una clasificación de 1 a 100, que fue dividida en cinco categorías, con diferentes colores según su grado de peligrosidad, que se presentan en la Tabla 4.7-1. Esta categorización se realiza para mostrar las áreas con un mayor grado de peligrosidad, que son las que reúnen las características más influyentes de cada una de las capas, incluida la de frecuencia, y por lo tanto son las más propensas a generar el proceso reconocido, dentro del periodo de retorno estimado para cada caso.

Tabla 4.7-1: Categorías de peligro.

Valor		Categoría de Peligro
Caídas	Flujos	
Flujos Locales	Regionales	
0 - 40	0 - 40	Muy Bajo
41 - 50	41 - 60	Bajo
51 - 60	61 - 70	Medio - Moderado
61 - 80	71 - 85	Alto
81 - 100	86 - 100	Muy Alto

4.7.1. CAÍDAS DE ROCA, DETRITOS Y TIERRA

Entre las tres combinaciones de peso realizadas, se escogió la combinación C (destacada en la Tabla 4.6-3) como mapa final de peligro para el proceso de caídas (Ilustración 4.7-2), ya que destaca bien las posibles áreas generadoras de bloques o desprendimientos que podrían resultar en caídas, destacando los depósitos en forma de conos de deyección a los pies de las laderas de área de estudio. Una mayor ocurrencia de este proceso se encuentra representada por las áreas clasificadas con peligro Moderado, Alto y Muy Alto. Las áreas demarcadas con peligro moderado serían alcanzables en menor frecuencia y magnitud que las áreas de peligro muy alto, ya que estas últimas se encuentran asociadas a zonas de mayor pendiente y altura. Por otro lado, en la Ilustración 4.7-1 se muestran los mapas de peligro elaborados para otras combinaciones de peso: la combinación DI demarca con mayor peligro las áreas próximas a las fallas y se ve atenuada la influencia de la pendiente, especialmente en las laderas cercanas a la costa; y la combinación M tiene un efecto similar, demarcando con mayor peligro las áreas potenciales.

En cuanto al período de retorno, dentro de la clasificación de intensidad, las caídas se consideraron como eventos de intensidad Media, Baja o Sin Daños, ya que este proceso genera eventos localizados, que pueden afectar sectores marginales del área urbana y no ponen en peligro la infraestructura funcional

de la ciudad. Por esta razón estos mapas de peligro se encuentran asociados a un período de retorno de 3 a 7 años, como fue calculado en el punto 3.4.1, para las intensidades mencionadas.

Ilustración 4.7-1: Variaciones al mapa de peligro de caídas.

Fuente: Elaboración Propia.
Arriba: Combinación DI; Abajo: Combinación M.

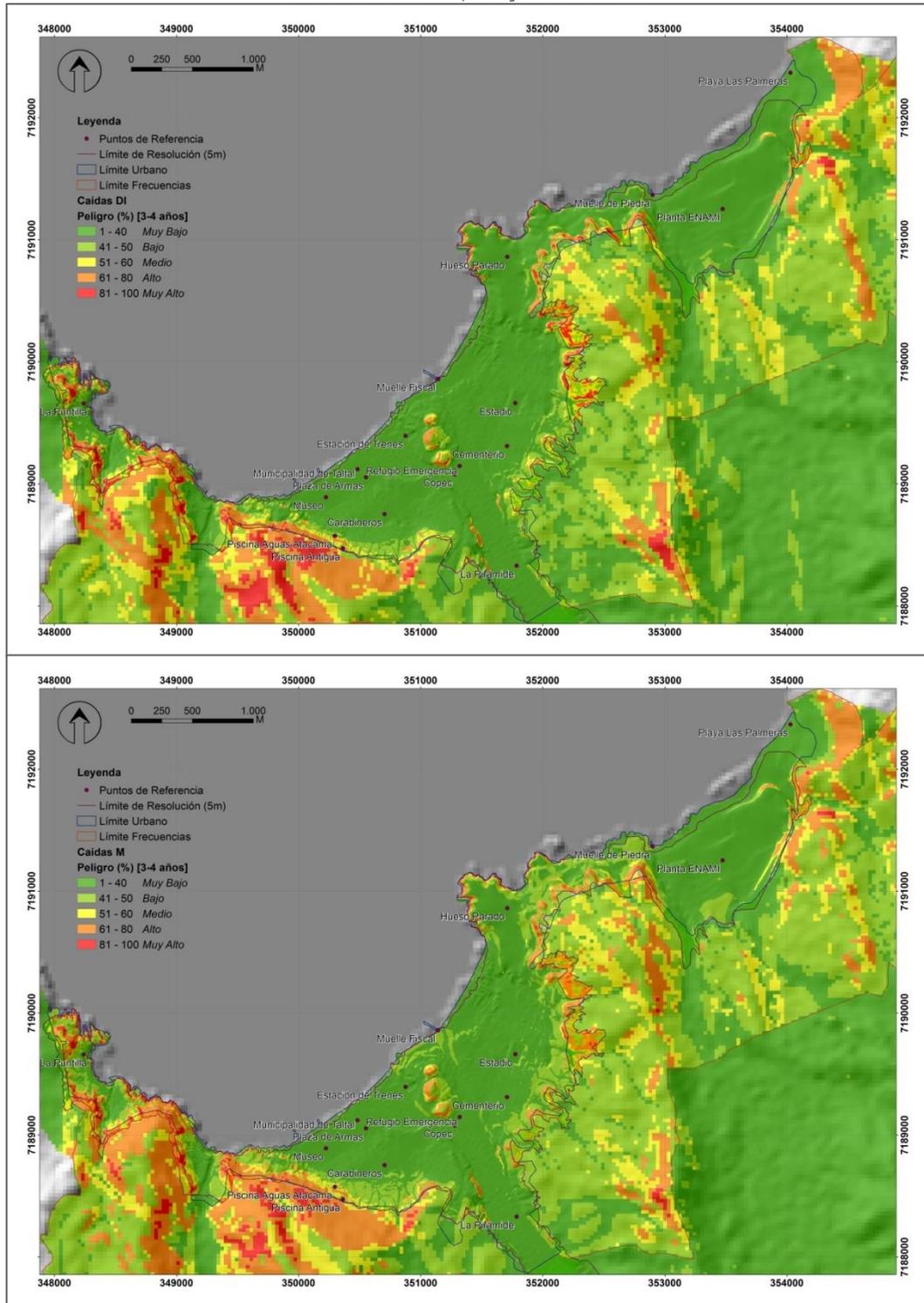
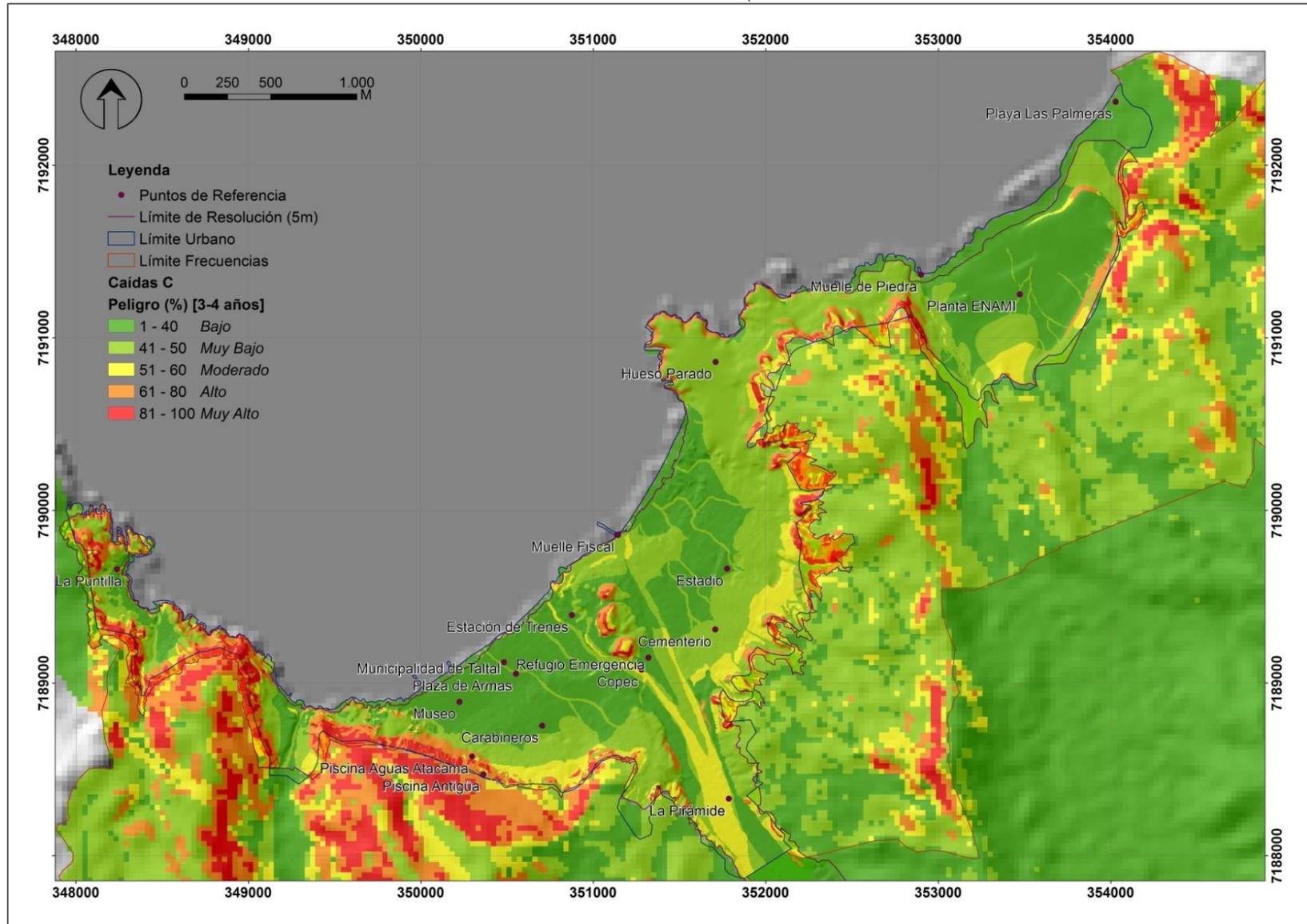


Ilustración 4.7-2: Mapa de peligro de caídas.

Fuente: Elaboración Propia.



Entre las áreas clasificadas con mayor grado de peligro se encuentran las laderas que bordean el área del límite urbano de Taltal. En el sector de La Puntilla, corresponden a los afloramientos rocosos, y depósitos coluviales que se encuentran en los faldeos de la Quebrada La Puntilla, Quebrada Changos y al borde costero, entre ambas quebradas, por donde pasa el camino entre Taltal y La Puntilla. En el sector de la ladera suroeste de Taltal, corresponden a afloramientos de roca, depósitos aluviales con alta pendiente, que alcanzan las piscinas de la zona alta de la ciudad. En el sector de los cerros centrales, se destacan las laderas al oeste de estos cerros, sobre varias casas. En el sector de la ladera sureste de Taltal, entre el Cementerio y Hueso Parado, se destacan las laderas de los cerros que separan las desembocaduras de las quebradas, al igual que en el borde costero entre Hueso Parado y el Muelle de Piedra. En el valle de la Quebrada El Hueso, se destaca la cima de la sierra que separa Taltal de este valle. Por último, en la desembocadura de la quebrada San Ramón, destacan los bordes de los depósitos antiguos de gravas sobre los que se encuentra la planta ENAMI y los faldeos con depósitos coluviales del escarpe costero, en los que se observaron bloques rodados de 30 a 100 cm de alto (Ilustración 4.7-3).

Ilustración 4.7-3: Vista hacia el N de rodados del escarpe cortero, en el sector de Playa Las Palmeras.

Fuente: Elaboración Propia.



4.7.2. INUNDACIONES Y FLUJOS A ESCALA LOCAL

Para este proceso también se utilizó la combinación C para el mapa final (Ilustración 4.7-4), ya que se destacan las laderas con evidencias de actividad, como flujos de agua y detritos en las áreas de altura media. Una mayor probabilidad de ocurrencia se asocia con las laderas clasificadas con peligro Moderado, Alto y Muy Alto, de forma creciente. Estas áreas podrían ser suficientemente inestables para generar remociones que se desarrollen en flujos a través de las quebradas. Las áreas clasificadas con peligro Alto y Muy Alto corresponden principalmente, a las mismas que las caídas, que bordean por el sur el área del límite urbano de Taltal, agregando algunas

áreas de mayor altura en la ladera sureste de la ciudad y en la sierra que la separa del valle de la Quebrada El Hueso. Las áreas clasificadas con peligro Bajo, se asocian al área de alcance de este proceso.

El período de retorno se estima considerando que, las inundaciones y flujos locales se consideran como eventos de intensidad Media y posiblemente Fuerte, ya que involucran un mayor grado de erosión y transporte que sólo puede ser generado por flujos con agua, que se desencadenan debido a precipitaciones. Por lo que, este mapa de peligro se encuentra asociado a un período de retorno de 7 a 22 años.

En la Ilustración 4.7-5 se presentan los mapas elaborados para las combinaciones de peso DI y M (presentadas en la Tabla 4.6-3). Estas combinaciones generan, para este proceso, un efecto similar al descrito en el punto anterior, para el mapa de caídas. La combinación DI, destaca con mayor grado de peligro áreas más pequeñas alrededor de las fallas y la combinación M, tiene el mismo efecto con las áreas potenciales, ambas disminuyen la influencia de las áreas de mayor pendiente y elevación.

Ilustración 4.7-4: Mapa de peligro de inundaciones y flujos locales.

Fuente: Elaboración Propia.

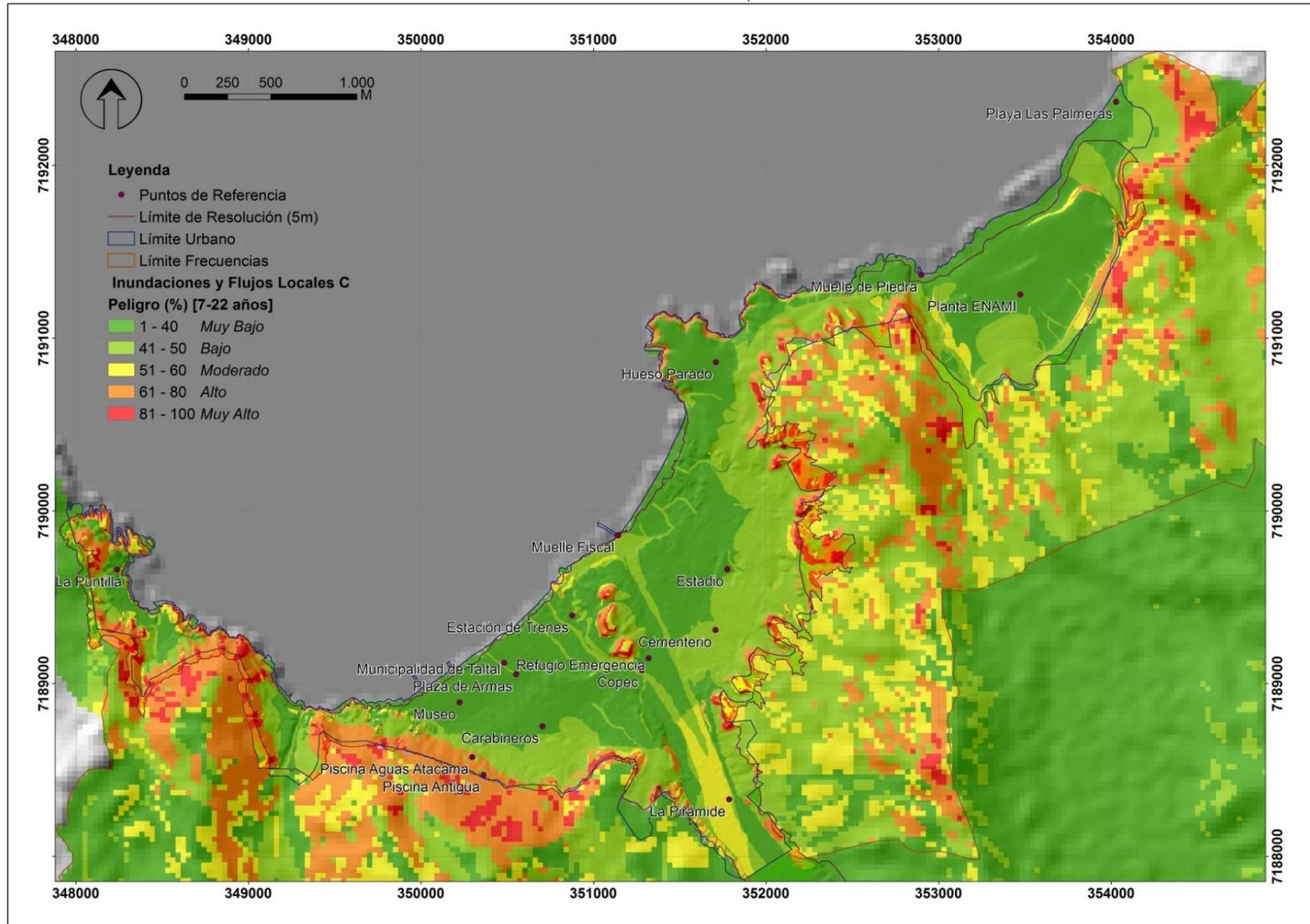
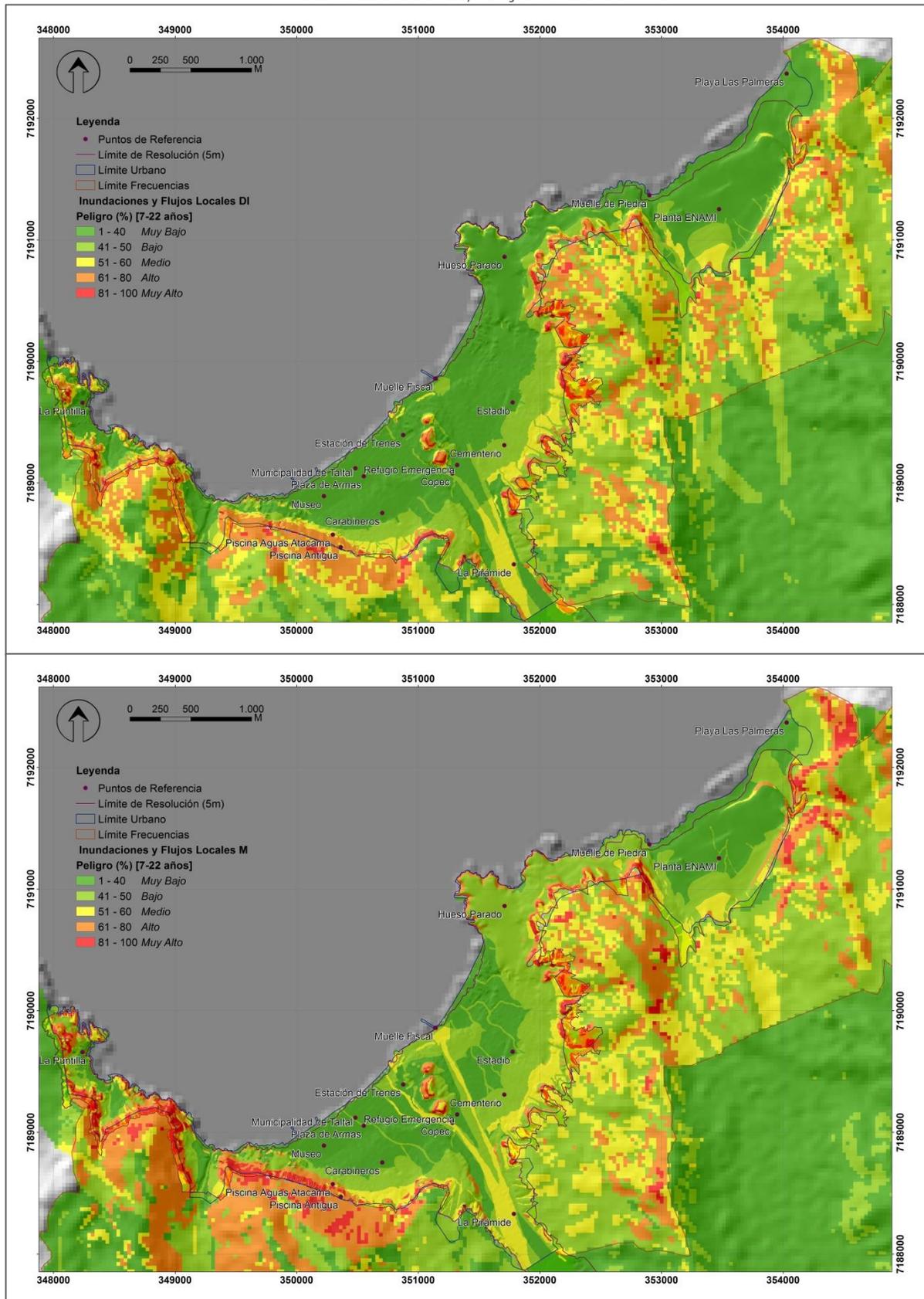


Ilustración 4.7-5: Variaciones al mapa de peligro de inundaciones y flujos locales.

Fuente: Elaboración Propia.

Arriba: Combinación DI; Abajo: Combinación M.



4.7.3. INUNDACIONES Y FLUJOS A ESCALA REGIONAL

Para este proceso se eligió la combinación DI como mapa final de peligro (Ilustración 4.7-6) a pesar de que no es la más conservadora, ya que refleja bien las descripciones de los eventos pasados y se aprecia bien el efecto de los canales de transporte locales. Las áreas clasificadas con peligro Alto y Muy Alto corresponden principalmente a canales de transporte y áreas potencialmente inundables. Las áreas clasificadas con peligro Moderado corresponden a zonas potencialmente alcanzables en casos extremos de precipitaciones locales, o en caso de haber grandes modificaciones al terreno que cambiaran el cauce natural de los flujos. Los mapas de la Ilustración 4.7-7 presentan las combinaciones de pesos C y M, en las que se puede apreciar un aumento progresivo en las áreas demarcadas con peligro Alto y Muy Alto, que se debe al aumento de la influencia de la pendiente y las zonas potenciales.

Los procesos de inundaciones y flujos se consideran como eventos de intensidad Fuerte y Muy Fuerte, ya que se generan flujos de agua locales para precipitaciones en la Cordillera de la Costa y flujos de agua y barro importantes para precipitaciones en la Depresión Central o en la Cordillera Principal, que son acumuladas y concentradas en la quebrada Taltal. Por lo que estos mapas de peligro se encuentran asociados a un período de retorno de 22 a 44 años.

Entre las áreas calificadas con peligro Muy Alto se encuentra la entrada a la ciudad desde Las Breas, dónde se encuentra la pirámide construida para dividir el flujo en dos cauces, uno por la avenida Francisco Bilbao, dónde se encuentra la bencinera COPEC y el otro, por la calle Sady Zañartu desembocando en el sector del muelle fiscal. El primer cauce, continúa hacia el norte por la calle O'Higgins hacia la Estación de Trenes y la calle Atacama en forma paralela, desembocando en la ladera este de los cerros centrales. Durante el evento de Marzo de 2015, los otros puntos mencionados en el mapa no fueron afectados, probablemente por la acción atenuadora del flujo que tuvieron las piscinas de control, pero estos puntos se encuentran dentro de áreas clasificadas con peligro Alto y podrían ser afectadas bajo condiciones diferentes del flujo de la quebrada principal o por flujos generados localmente. El refugio de emergencia se encuentra en un área clasificada con peligro Bajo, por lo que debería encontrarse a resguardo, siempre que se tomen medidas de precaución ante alertas meteorológicas o se realicen obras de protección.

Ilustración 4.7-6: Mapa de peligro para inundaciones y flujos regionales.

Fuente: Elaboración Propia.

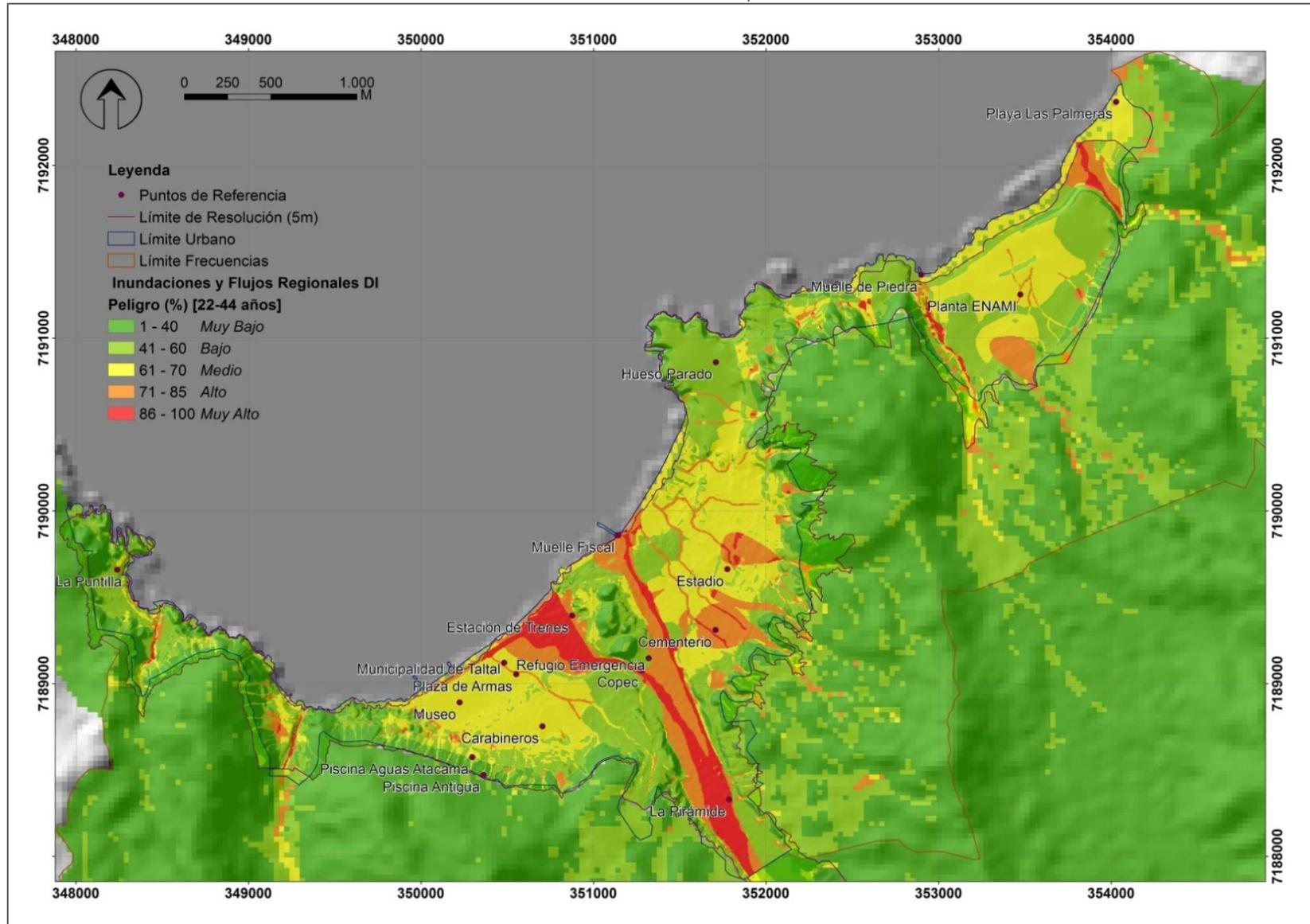
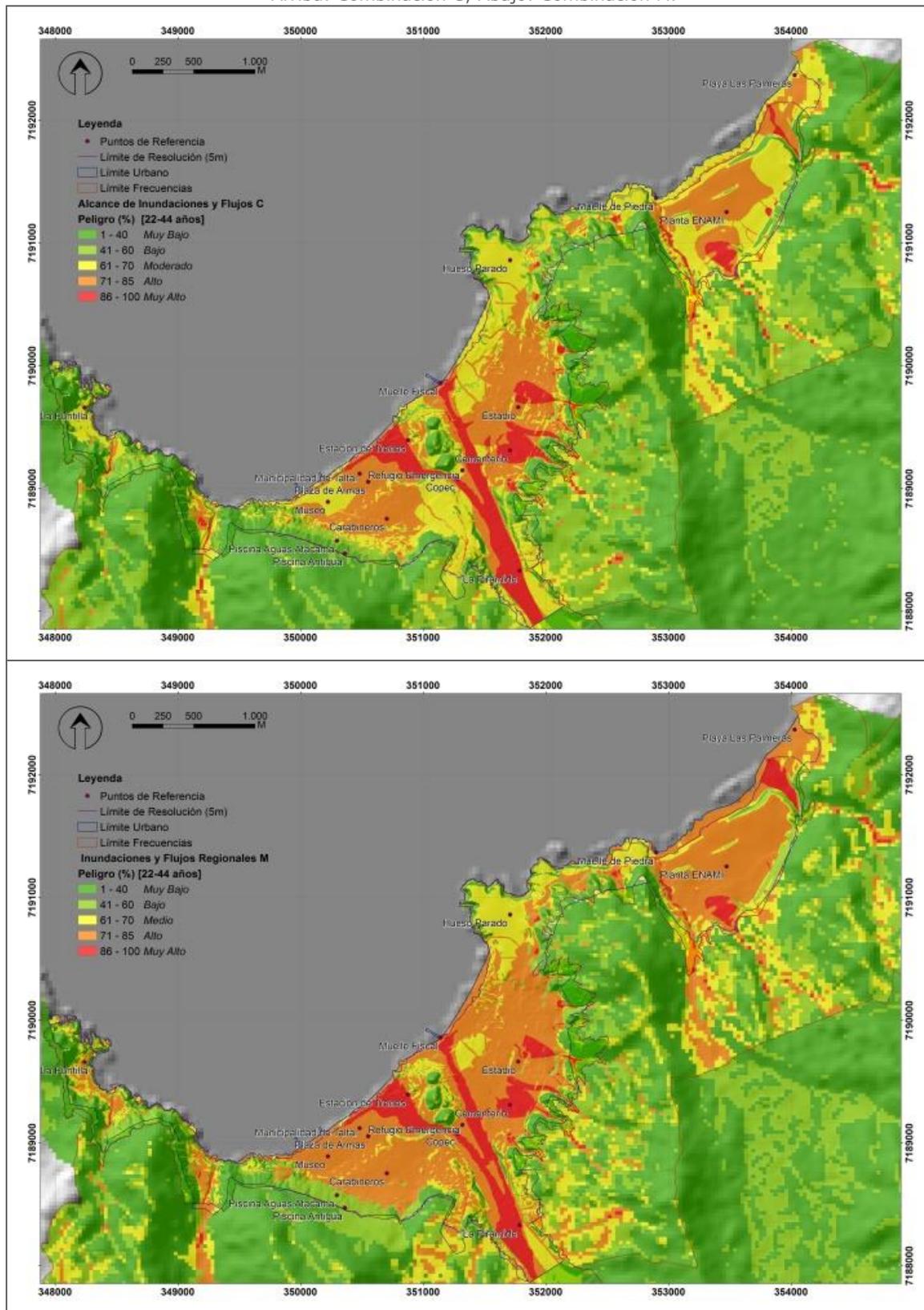


Ilustración 4.7-7: Variaciones del mapa de peligro para inundaciones y flujos regionales.

Fuente: Elaboración Propia.
 Arriba: Combinación C; Abajo: Combinación M.



5. DISCUSIONES

Para poder validar los registros históricos como base elemental de una evaluación de peligro, se desarrollaron dos etapas principales acordes con este fin, resumidas en: (1) la elaboración y evaluación del catastro, y (2) el desarrollo de las evaluaciones de susceptibilidad y peligro. En los siguientes párrafos se presentan varias discusiones generadas a partir de la consecución de los objetivos propuestos y durante el desarrollo las etapas mencionadas. También, varias ideas importantes reconocidas a partir de los resultados, que relacionan la información temporal y espacial disponible.

5.1. Elaboración y Evaluación del Catastro

5.1.1. RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN Y FUENTES

Para elaborar el catastro se revisaron varias fuentes disponibles (detalladas en la Tabla 3.1-2), entre las que se revisaron principalmente periódicos desde 1877. Sin embargo, también se revisaron bases de datos gubernamentales, algunos registros de presupuestos, informes y publicaciones sobre catástrofes, aluviones y la historia de Taltal. Entre los periódicos, se revisaron tanto los de circulación nacional como los locales. También, algunos periódicos de larga data, como el Mercurio de Valparaíso y el Mercurio de Santiago y algunos con poco tiempo en circulación, como la mayoría de los periódicos de Taltal.

El catastro se elaboró priorizando las descripciones de las fuentes gubernamentales y locales por sobre otras fuentes, especialmente si la información servía para realizar interpretaciones, en concordancia con la recomendación de Corominas y Moya (2008), que indica el uso de fuentes oficiales y/o directas. Aunque, algunos eventos no cuentan con descripción o son apenas mencionados, se considera que el catastro es bastante completo, minimizando la omisión de los eventos con algún registro. De todas formas, la información disponible no siempre se puede usar para realizar interpretaciones, como fue el caso del catastro de sismos (punto 3.3). En este caso, para varios eventos se mencionan caídas de rocas y desprendimientos, pero no se especifica con claridad su ubicación o proveniencia (Tabla 3.3-1). En cambio, en el catastro meteorológico, los eventos se encuentran por lo general detallados y comentados. Sin embargo, a pesar de minimizar la omisión de eventos, es posible que hayan ocurrido eventos de los que nunca hubo un registro, por lo que el catastro se considera incompleto.

Ciertamente, la elaboración e interpretación del catastro conlleva ciertas dificultades, ya que a pesar de conocer sobre la ocurrencia de un evento, puede haber discrepancias entre quienes lo mencionan. La ciudad de Taltal pudo haber sido sólo mencionada entre una lista de lugares afectados o la descripción del evento puede ser confusa. Una descripción confusa puede indicar que un lugar fue inundado por la última lluvia, pero se desconoce su ubicación y se desconoce si se inundó por la mala calidad de la techumbre o por una acumulación de agua y barro. En algunos casos fue posible aclarar la confusión con algún comentario que indicaba que el evento voló varios techos o que una corriente inundó varias casas. La resolución de este tipo de disyuntivas se hizo revisando con detención cada caso, considerando más de una fuente y examinando la información en los mapas de inventario (punto 3.3) de cada evento.

A pesar de estas dificultades, la elaboración e interpretación del catastro tiene varias ventajas. Una de ellas, es complementar el registro de otras fuentes, cuando alguna de ellas es débil o tiene vacíos (por ejemplo, el registro pluviométrico que comienza en la década del '70). Otra ventaja, es poder acotar y especificar los lugares más afectados por un evento a falta de un mapa o una foto que muestre su alcance y sus límites. También, permite comparar los alcances y efectos de los distintos eventos zonificados, para establecer una gradación de magnitud e intensidad relativa a los mismos. Por último, se puede establecer una línea de tiempo, que permite comparar las gradaciones relativas de cada evento y los acontecimientos propios de la ciudad (establecimiento, construcción, cambios, crecimientos, hitos), para darles un contexto y ubicación temporal.

Un punto clave, para poder sobrellevar las dificultades de la elaboración del catastro y aprovechar mejor sus ventajas, fue comprender la evolución de la información con el tiempo. Es decir, que la forma en que se presenta y se registra la información ha ido cambiando y evolucionando con el tiempo. Por esta razón, se debe comprender, complementar, investigar e interpretar los datos del registro de forma distinta. Primero se tuvo que definir, donde comenzar y se eligió el año 1877, porque ese año se encomendó la construcción de la ciudad y comenzó su historia escrita. Antes de ese año las menciones a Taltal son escasas y realizadas por exploradores, como R. Philippi y no por sus habitantes. Luego, se encontró que la información de prensa hasta 1912 es realizada únicamente por el Mercurio de Valparaíso, que funcionaba por telégrafo, con descripciones cortas y precisas, a escala regional. Para complementar esta información varios investigadores han realizado resúmenes de las notas realizadas por eruditos de la época (Philippi o Billingham, entre muchos otros), que pueden ser consultados. Entre 1913 y 1933, Taltal cuenta con los registros pluviométricos de Diego de Almeyda,

que se pueden complementar con las primeras menciones de la prensa local a partir de 1906, sobre los efectos meteorológicos. Hasta los años '60 hay varias fuentes complementarias, sin registro pluviométrico, que describen los eventos en glosa y con numerosos detalles.

A partir de la década del '70, con la creación de la ONEMI en 1974 y el término de la circulación de la prensa local en 1968, comienza la elaboración de informes oficiales. En estos informes, se presenta la información generalmente en forma de tablas que indican el número de regiones afectadas, el número de viviendas afectadas, el número de personas albergadas, los montos totales gastados en reparaciones, entre otras cifras. La prensa por lo general cita o describe en su glosa estos mismos informes de manera redundante, sin indicar las localidades afectadas o sin describir el evento y sus alcances. Sí es posible encontrar fotos en la prensa, que muestran una ventana de lo acontecido en algunos sitios específicos, pero no una visión general de los efectos y los límites del evento en cada localidad. Una posible proyección de este trabajo, podría consistir en la mejora de las descripciones de estos eventos, entrevistando a testigos clave o revisando los registros de grabaciones de algún canal de televisión.

Recién en el año 2000 se reconocieron informes oficiales con mejores medios digitales que cuentan con una zonificación de los daños y los alcances de cada evento, y también se reconoció un gran aumento en la cantidad de información disponible por la aparición de internet. Sin embargo, los informes oficiales siguen aún replicando el enfoque hacia las cifras para describir los sucesos. Se considera que este tipo de enfoque, para hacer el registro de eventos de remociones en masa, no es apropiado si es que no está acompañado de una glosa que explique su contexto. Los daños de cada evento ocurren a propiedades y a personas que tienen un nombre, una ubicación y una historia, afectando de manera diferente a cada uno de ellos. Estos detalles deben verse reflejados en los registros para que puedan ser interpretados certeramente en el futuro. Por otro lado, la gran cantidad de información disponible en internet, en algunos casos dificultó la búsqueda de datos relevantes. Como la recolección de fuentes y la correcta asociación del material encontrado al evento en mención. Se tuvo especial cuidado en la revisión de imágenes y videos que son etiquetados para un evento particular, ya que en muchos casos corresponden a otros eventos (con distinta fecha y/o ubicación).

5.1.2. PROCESOS RECONOCIDOS

Al realizar la fotointerpretación del material disponible y de la visita a terreno, se pudo reconocer depósitos recientes de coluvios y canalizaciones que evidencian transporte gravitacional y aluvional reciente (revisar el punto 2.5.5, sobre depósitos cuaternarios). También se reconocieron en el catastro varios eventos que dejan en evidencia que la formación de coluvios y depósitos aluvionales ha sido registrada en la historia de Taltal. Al evaluar los eventos del catastro sobre los daños ocurridos, se pudo reconocer que los depósitos mencionados fueron ocasionados por dos grupos principales de procesos de remociones en masa y cuál fue su mecanismo desencadenante:

- El primero, consiste en caídas de rocas, detritos y tierra. Provenientes desde las laderas que rodean el área urbana de Taltal y desde el borde costero, formando los depósitos coluviales. Son desencadenadas primariamente, por precipitaciones y marginalmente, por sismos.
- El segundo, consiste en flujos e inundaciones. Provenientes de las quebradas locales y de la quebrada principal, formando los depósitos aluviales. Son desencadenados por precipitaciones, cuya intensidad influye en la magnitud y distribución de los flujos dentro de la cuenca a escala regional.

No se encontraron evidencias de otros tipos de remociones en masa, como unidades estratificadas con orientación favorable a los volcamientos, cicatrices de deslizamientos traslacionales o rotacionales. Tampoco se reconoció evidencias de expansiones laterales o de algún proceso más complejo. En el caso de los deslizamientos traslacionales y rotacionales, la falta de evidencia de cicatrices puede deberse a que han sido borradas por la erosión y no se descarta su ocurrencia por completo. En ese caso, se trataría de procesos antiguos, sin evidencias de actividad reciente y por eso, se han excluido del análisis de peligro.

5.1.3. INCERTIDUMBRE EN LA ZONIFICACIÓN

Para realizar las zonificaciones se tuvieron que realizar varias inferencias sobre los eventos que pueden inducir a un cierto grado de error. En primer lugar, se realizó la zonificación a escala intermedia (1:20.000), más gruesa que la zonificación final de peligro de escala local (1:5.000) dentro del área urbana de Taltal. En segundo lugar, se elaboraron primero las zonificaciones de los eventos con descripciones más detalladas y a partir de éstas, se elaboraron las zonificaciones para otros eventos con características similares. La primera inferencia, fue realizada porque las mejores descripciones encontradas permitían realizar diferencias a escala de manzanas o sectores

afectados, sin ser más específicas. En la segunda inferencia, se tomaron varias consideraciones para hacer las asociaciones mencionadas: (1) el área de la cuenca en que se desarrollaron las precipitaciones (costa o cordillera), (2) el registro de precipitaciones (para modelar caudales y efectos similares), (3) la presencia o ausencia de otros fenómenos meteorológicos (viento, nieve, marejadas, granizo, tormentas eléctricas) y (4) puntos de referencia dentro de la ciudad para determinar alcances.

Para minimizar el error en estas inferencias y comparaciones, se tomó en cuenta también la información sobre lugares cercanos a Taltal, principalmente Chañaral y Antofagasta. También, las menciones a otras áreas cercanas, como Paposo, Cifuncho u oficinas salitreras. Además, al extrapolar las zonificaciones de los eventos con mejor descripción, a los eventos con menos detalles, se tuvo la precaución de usar la misma zonificación, salvo que hubiera información para hacer cambios específicos como: disminuir/aumentar su intensidad o modificar a áreas específicas que fueron afectadas de forma distinta. De todas formas, se buscó elaborar estas zonificaciones apegadas a la información disponible, sin asumir daños donde no los hubo o viceversa.

Con la construcción de la zonificación, fue posible reconocer diferencias en los efectos y en la forma en que se desarrollan los flujos e inundaciones. Distinguiendo que dependen fuertemente de las precipitaciones y cómo estas se manifiestan en la región. Se encontró diferencias tanto entre las intensidades con que se desarrollan las precipitaciones como en la magnitud y ubicación del área que éstas abarcan sobre la cuenca. Específicamente se reconoció que:

- En el caso de precipitaciones sobre de la Depresión Central o en la Cordillera Principal los flujos formados son concentrados en la quebrada Taltal y transportados por ella hasta la ciudad. Generando daños en los sectores dentro y cerca del cauce natural de la quebrada, como la Av. Bilbao y las calles O'Higgins, Atacama, Sady Zañartu y Progreso. También a las construcciones aledañas estas calles, como la bencinera COPEC, la escuela E-104 y la Plaza del Tren.
- En el caso de precipitaciones sobre de la Cordillera de la Costa, los flujos son concentrados por la quebrada Taltal (pero en menor magnitud que para el caso anterior) y por las quebradas San Ramón, Changos, El Hueso y La Puntilla, además de otras quebradas aportantes más pequeñas. Los daños generados por estas lluvias son más variables en su ubicación y de menor magnitud que el caso de las precipitaciones a mayor altura. Situación que genera flujos de barro, anegamientos e inundaciones

menores en las casas y calles aledañas a las laderas, como: las calles República, Martínez, Moreno y San Martín, la avenida Belmor Rojas. También, en los caminos a Paposo y La Puntilla. Además de, las construcciones sobre estas calles, como: el Cementerio, el Estadio y la Planta ENAMI.

Se tuvo presente la idea de manejar de manera más objetiva la incertidumbre generada a partir de las inferencias mencionadas. Para poder evaluar esta incertidumbre se estimó el grado de certeza de los eventos del catastro. Esta evaluación midió con puntajes la calidad de la información encontrada para cada evento, para comprender el grado de incertidumbre al realizar la zonificación. Sin embargo, este punto no fue incluido en la evaluación de susceptibilidad y peligro, porque implicaría incorporar esta evaluación a la zonificación de intensidad de cada evento. Para continuar, con un análisis de frecuencia (tal como en la evaluación de peligro) tomando en cuenta estos valores, lo que aumentaría en el nivel de complejidad de este trabajo. Posiblemente, el hacer esta evaluación de certeza crearía diferencias más notorias en la capa de frecuencia acumulada, ya que habría que calificar las zonificaciones con índices de certeza por sectores y dar un peso a cada evento zonificado según su grado de certeza. Por este motivo, se consideró dejar este punto como una posible mejora del método propuesto.

5.1.4. VALORACIÓN DE LOS PERÍODOS DE RETORNO

Una herramienta clave para la estimación de los períodos de retorno fue la clasificación de intensidad. Para definir esta clasificación se utilizaron inicialmente datos de eventos y catástrofes de la ciudad de Chañaral, y luego se adaptó esta definición a la historia de catástrofes de Taltal, con los datos del catastro. Esta adaptación se realizó teniendo en cuenta los tipos de eventos desarrollados en esta área de estudio y los distintos puntos de referencia afectados en cada evento dentro de la ciudad, ya que finalmente la intensidad de los daños depende del contexto histórico y urbano propio de este lugar. A partir de la definición, se clasificaron los eventos considerando el máximo valor de intensidad alcanzado por cada evento. Luego, se utilizó la clasificación de intensidad para establecer los períodos de retorno. Entonces, si se pudiera mejorar la estimación de los períodos de retorno de alguna forma, sería afinando la clasificación de intensidad.

Afinar la clasificación de intensidad, se podría lograr robusteciendo la base datos histórica de catástrofes de Taltal. Una forma de robustecer esa base de datos, sería buscando datos que hayan quedado fuera del catastro. Sin

embargo, se considera poco probable poder encontrar más datos o descripciones de eventos en Taltal, de los documentos históricos disponibles. Entonces, otra forma de mejorar la base de datos, sería documentando minuciosamente los eventos más recientes y los futuros. Por otro lado, si se desea aplicar el método en otra localidad, entonces se debe recolectar nueva información, en un nuevo catastro pertinente a ese lugar. Realizando así, los ajustes que sean necesarios a la clasificación.

Con la clasificación de intensidad se pudo establecer una relación con el período de retorno de las precipitaciones máximas diarias, asociando los eventos de mayor precipitación, especialmente a mayor altura en la cuenca, a los daños más intensos y las precipitaciones más leves a daños bajos o nulos (revisar punto 3.4, Estimación del Período de Retorno). Esta relación permitió establecer períodos de retorno, para cada grado de intensidad definido, y relacionarlos con los procesos descritos:

- En primer lugar se estableció que las caídas de roca, detritos o tierra se asocian a eventos Sin Daños, o de intensidad Baja a Media y se estimó su período de retorno en 3 a 7 años.
- En segundo lugar se consideró que los flujos e inundaciones generados en zonas locales ocasionan daños de intensidad Media a Fuerte, con un período de retorno de 7 a 22 años.
- Por último, los flujos e inundaciones generados en zonas altas de la cuenca ocasionan daños de intensidad Fuerte a Muy Fuerte y se asocian a un período de retorno de 22 a 44 años.

Estos períodos de retorno son similares, en orden de magnitud, a los calculados por el informe de Habiterra Consultores (2017) para la cuenca del río Salado en Chañaral:

- 11 años para una precipitación de 19,8 mm en Chañaral, ubicación en la costa comparable a Taltal, donde se estimó un período de retorno de 6 años para una precipitación de 19,5 mm.
- 20 años para una precipitación de 50 mm en Las Vegas, ubicación comparable a la localidad de Aguas Verdes, donde se estimó un período de retorno de 30 años para una precipitación de 52 mm.
- 200 años para una precipitación de 58,4 mm en El Salvador, ubicada en la Cordillera de Domeyko, lugar del que no se tiene un registro de precipitaciones para comparar.

Además, la comparación de estos datos con la periodicidad de la oscilación de El Niño (ENOS) y la oscilación decadal del Pacífico (ODP) indica que hay una correlación importante entre la ocurrencia de las precipitaciones y las fechas en que ambos procesos se acoplan (revisar Ilustración 3.4-3). Mostrando que las condiciones necesarias para desencadenar remociones en masa e inundaciones ocurren de manera cíclica y que, efectivamente pueden ser esperables para los períodos de retorno estimados. De todas formas, hay que tener en cuenta que los períodos de ENOS acoplado con ODP, pueden durar varios años y generar varios eventos en un plazo menor. Por otro lado, se deben tener en cuenta que los efectos del cambio climático podrían influir, de forma aún desconocida (Garreaud, 2011), en estos ciclos y cambiar sus condiciones. Aunque, la proyección general de Garreaud (2011) indica un leve aumento en las precipitaciones del norte de Chile.

5.2. Evaluación de Susceptibilidad y Peligro

5.2.1. ADAPTACIÓN DE LA METODOLOGÍA

Para realizar las evaluaciones de susceptibilidad y de peligro se utilizó el método propuesto por Chau *et al.* (2004) en la ciudad de Hong Kong, que superpone capas de información espacial sobre los mecanismos condicionantes y factores desencadenantes con herramientas GIS. Para aplicar este método en el área urbana de Taltal, se realizó una prueba de ajuste de los indicadores sugeridos. Esta prueba se realizó a través del análisis de varias combinaciones de los índices de peligro y de los pesos de las capas, con el fin de buscar un mejor acomodo a las condiciones del área de estudio y a los procesos estudiados. La prueba permitió determinar las clases que más influyen en cada proceso, para poder hacer el análisis de susceptibilidad. Estas determinaciones se realizaron mediante la fotointerpretación de las imágenes digitales disponibles en ArcGIS y Google Earth, en adición a las observaciones de terreno. Además, se cambió la utilización de índices decimales de los autores, a índices en porcentaje con números enteros. Porque los cálculos matemáticos funcionan mejor en ArcGIS de esta manera, sin realizar aproximaciones numéricas para las operaciones.

Entonces, se observa que los resultados de la prueba de ajuste dependen fuertemente de la información recolectada en el inventario de remociones, formado a partir del catastro y de las fotointerpretaciones. Como este inventario de remociones no es suficientemente amplio para hacer una aproximación estadística, se optó por realizar varios ajustes sucesivos a los indicadores. Buscando el mejor calce entre las zonificaciones de susceptibilidad con las observaciones del inventario. Es decir, con los eventos

reconocidos en el catastro y con las evidencias *in situ* de remociones (principalmente depósitos coluviales y aluviales). Esta aproximación dista bastante del método utilizado por Chau *et al.* (2004). Ya que Hong Kong cuenta con una base de datos elaborada por Evans *et al.* (1997), con un registro técnico de 1448 remociones registradas durante 14 años. Construir y publicar una base de datos similar para el Norte de Chile, evidentemente podría ayudar a fortalecer los indicadores. Especialmente, si se utilizan en la estimación de la susceptibilidad con una aproximación estadística, como la propuesta por Lara (2007) y Náquira (2009). Sin embargo, como ya se mencionó en la discusión sobre el catastro (punto 5.1.4), se considera poco probable poder encontrar más datos para Taltal. Entonces, el fortalecimiento de una base estadística tendría que hacerse con datos de otras localidades o con un mejor registro de los eventos recientes y futuros.

5.2.2. ELECCIÓN DE ESCALAS

La elección de escalas de trabajo para la evaluación de la susceptibilidad responde a dos consideraciones: los insumos disponibles y la variedad de magnitudes en el área las cuencas que confluyen Taltal.

Los insumos disponibles para la realización de este estudio fueron curvas de nivel (cada 2 y 2,5 m) del área urbana de Taltal y un modelo digital de elevación (DEM) con una resolución de 30x30 m, para las regiones de Antofagasta y Atacama. Con las curvas fue posible construir un DEM con resolución de 5x5 m y del DEM regional se tomó la porción correspondiente a la cuenca de la quebrada Taltal y sus alrededores. Además, se contaba con la carta geológica de Naranjo y Puig (1984) a escala 1:250.000 (escala regional), que cubría toda el área de la cuenca mencionada, por lo que se decidió hacer su análisis a esta misma escala. Con el DEM de mayor resolución para el área urbana se decidió hacer el análisis de la misma a escala 1:5.000 (escala local). También, se decidió utilizar una escala auxiliar de trabajo de 1:20.000 (escala intermedia), como un puente entre el análisis de las dos primeras escalas, tan diferentes. La escala intermedia permitió además, la incorporación de los alrededores del área urbana de Taltal, a la evaluación de susceptibilidad y de peligro.

Con esta elección de escalas fue posible analizar por capas la susceptibilidad. Las capas elegidas para este análisis fueron: geología, pendiente, elevación, distancia a las fallas y zonas potencialmente activas. Otros factores como el clima de aridez extrema y la sismicidad, fueron considerados de carácter regional (escala 1:250.000) y homogéneos a escala local e intermedia. Las precipitaciones intensas con baja recurrencia, también fueron estudiadas a

escala regional. Las laderas que rodean la ciudad y las desembocaduras de las quebradas más pequeñas alrededor del área urbana fueron analizadas a escala local (1:5.000). En cambio las zonas más altas de las mismas laderas y las cuencas de estas quebradas pequeñas fueron analizadas a escala intermedia (1:20.000). Eso se debe en primer lugar, al límite del área con mayor resolución, pero también a la diferencia en magnitud del área de las cuencas más pequeñas con respecto a la quebrada Taltal. Para comprender mejor este punto se recomienda revisar la Ilustración 4.1-1.

5.2.3. ESTUDIO DE RIESGO ANTERIOR

En cuanto al estudio de riesgo presentado por Urbe Arquitectos (2012), más allá de las diferencias de nomenclatura respecto a las unidades geológicas y morfológicas presentes, las áreas de restricción en general coinciden con las áreas de mayor peligro presentadas para el núcleo urbano. Entre las áreas reconocidas que no cuentan con recomendaciones de dicho estudio, se encuentran: la quebrada ENAMI, la quebrada La Puntilla, varias quebradas pequeñas que desembocan en el camino entre Taltal y la quebrada El Hueso, y las laderas sobre las que pasa el camino a La Puntilla. En cuanto al análisis del riesgo debido a la construcción de las obras de control aluvional, Urbe Arquitectos (2012) indica que el riesgo es mínimo debido a la canalización subterránea de los flujos, análisis que fue válido para el evento más reciente de Mayo de 2017 con lluvias en la Cordillera de la Costa, pero no para el evento de Marzo de 2015 con lluvias en la alta cordillera. Esta diferencia deja en evidencia que la construcción de obras de mitigación no mitiga totalmente el peligro al que se expone el área urbana de Taltal, especialmente de los eventos de mayor intensidad, que presentan un mayor riesgo a la población y tienen un mayor periodo de retorno.

6. CONCLUSIONES

Los registros históricos disponibles se utilizaron en cada etapa de este trabajo, alcanzando el objetivo principal. Primero, se reconocieron los procesos desarrollados dentro del área de estudio causando daños a bienes materiales y personales, estimando su recurrencia e intensidad. Luego, se elaboró una evaluación de susceptibilidad de dichos procesos, ajustando esta evaluación a las referencias del registro de remociones en masa. Por último, se recreó la ubicación espacio-temporal de los efectos reconocidos para cada evento, agregando esta información a la susceptibilidad para formar una evaluación de peligro.

La información histórica disponible fue utilizada en conjunto con los recursos actuales, tales como: sistemas de información geográfica, imágenes aéreas en línea, modelos digitales de elevación, mapas geológicos y urbanos, e informes geológicos de los eventos más recientes. De esta forma, se logró cada uno de los tres objetivos específicos. También se revalorizó y usó el registro histórico como un elemento primario en la evaluación de peligro para la ciudad de Taltal. Por este motivo, se concluye que efectivamente, la información del registro puede ser usada en la evaluación de peligro para otras localidades y se recomienda hacerlo.

Con base en el catastro, se reconocieron y evaluaron dos procesos para elaborar zonificaciones de susceptibilidad y de peligro. Uno de estos procesos fue estudiado a dos escalas de trabajo diferentes, por lo que finalmente se elaboraron tres zonificaciones de peligro:

- Caídas de rocas, detritos o tierra.
- Flujos e inundaciones a escala local.
- Flujos e inundaciones a escala regional.

La separación de escalas para el proceso de inundaciones y flujos, fue reconocida a través de la información del catastro y recopilada como mapas de inventario. Sin esta información, no habría sido posible realizar la diferenciación entre los efectos que las precipitaciones, sobre distintas áreas de la cuenca y a distintas escalas, tienen sobre el área urbana de Taltal. Hecho que destaca la importancia del uso del registro histórico para comprender el origen de los efectos de cada evento.

A continuación, se presentan las principales conclusiones realizadas a partir de las zonificaciones de peligro elaboradas para cada uno de los procesos reconocidos:

- Para la evaluación de caídas rocas, detritos y tierra, se determinó condicionar más fuertemente las unidades de roca de la Formación La Negra y del Intrusivo Hipabisal Riolítico, ya que son las unidades que conforman las laderas que rodean el área urbana. También, se condicionaron desfavorablemente las pendientes entre 30 y 39°, las elevaciones entre 200 y 400 m de altura, las zonas a menos de 50 m de una falla y las zonas consideradas potencialmente activas. Además, se relacionó este proceso con un período de retorno de 3 a 4 años y a una intensidad de daños Baja a Sin Daños.
- Para las inundaciones y flujos a escala local, se determinó condicionar desfavorablemente los depósitos coluviales, seguido de los depósitos coluviales proximales y los canales aluviales. También, se condicionaron desfavorablemente las pendientes entre 27 y 39°, las elevaciones entre 100 y 200 m, las zonas a menos de 50 m de una falla y las zonas potencialmente activas. Además, este proceso fue relacionado con un período de retorno de 7 a 22 años y una intensidad de efectos Media a Fuerte.
- Para los flujos e inundaciones a escala regional, se condicionaron fuertemente los canales aluviales locales y de la quebrada principal, las pendientes menores a 8°, las elevaciones menores a 10 m de altura y las zonas potencialmente alcanzables. A esta última, se le agregó el área afectada durante el evento de marzo de 2015. Además, este tipo de eventos fue relacionado a un período de retorno de 22 a 44 años y a una intensidad de daños Fuerte a Muy Fuerte.

También se determinó que los condicionantes más importantes corresponden a la pendiente, seguido de la geología y las zonas potenciales, y que en segundo orden, influyen la elevación y la distancia a las fallas. Los mapas de susceptibilidad para cada proceso reflejan en buena medida las observaciones de las fotos aéreas y las evidencias de terreno. Los mapas de peligro, fueron elaborados a partir de la evaluación de susceptibilidad, agregando la información de registro histórico. Es importante decir, que éstos últimos, reflejan en buena medida el alcance y la ocurrencia de estos procesos según las evidencias encontradas en el registro histórico. También que resaltan las mismas áreas definidas como susceptibles, aclarando las áreas en duda. Por último, en los mapas de peligro se evidencia una concordancia con los mapas de susceptibilidad, aportando nueva información sobre el alcance y periodicidad de los procesos más peligrosos.

En cuanto a los períodos de retorno estimados, es posible concluir que estos valores son concordantes con los periodos estimados por Habiterra Consultores (2017) para Chañaral y que también son concordantes con los ciclos de acoplamiento de la Oscilación de El Niño y la Oscilación Decadal del Pacífico, tal como lo plantea Vargas *et al.*, (2000; 2006), dejando en evidencia la estrecha relación entre la ocurrencia de eventos con daños a la ciudad de Taltal y los fenómenos climáticos. Por otro lado, Garreaud (2011) plantea que las implicancias del cambio climático son aún desconocidas y podrían influir en mayores precipitaciones en el Norte de Chile.

Como reflexión final, es importante recalcar que el gran protagonista de este trabajo es el registro histórico. Con él se ha podido encontrar información más que suficiente para estimar períodos de retorno con sustento. También, para poder estimar áreas afectadas de forma repetitiva y con precisión aceptable para definir áreas de peligro. Es común leer o escuchar que el registro histórico de catástrofes en Chile es malo, subjetivo y que no se puede usar de forma seria. La reflexión que se plantea en este trabajo es la de leer y releer con otra mirada, específicamente con la mirada de geólogo, lo que se ha escrito en la prensa y en los informes sobre los eventos. Con esa mirada se intentó interpretar los relatos, darles sentido y luego, evaluarlos de manera integral. Como resultado, se encontraron relatos descriptivos, consistentes, satisfactorios y sobretodo emocionantes.

BIBLIOGRAFÍA

- Alfaro, A., 2011. *Peligro sísmico en el segmento norte de la Región del Maule, Chile*. Tesis para optar al grado de Geólogo. Departamento de Geología, Universidad de Chile, 136 p.
- Alfaro, A. y otros, 2015. *Fotointerpretación de los efectos de los aluviones del 24, 25 y 26 de Marzo en Taltal: Zona de Inundación, y zonas propuestas para evacuación, camapmentos y acopio*, Antofagasta: SERNAGEOMIN. Serie: Efectos geológicos del evento meteorológico de Marzo de 2015, 17p.
- Almeyda, E., 1948. *Pluviometría de las zonas del desierto y las estepas cálidas de Chile*. Santiago: Editorial Universitaria, 162 p.
- Álvarez, L., Ortiz, F., Dobrovolny, E. & Lemke, R., 1967. *Efectos Geológicos del Sismo de Taltal del 28 de Diciembre de 1966*, Santiago, Chile: Instituto de Investigaciones Geológicas, 20p.
- Amigo, Á. & Bertín, D., 2013. *Mapa preliminar de peligros volcánicos, Volcán Lastarria*, Antofagasta: Sernageomin. Escala 1:50.000, Programa de Riesgo Volcánico.
- Amilibia, A. et al., 2008. The role of inherited tectono-sedimentary architecture in the development of the central Andean mountain belt: Insights from the Cordillera de Domeyko. *Journal of Structural Geology*, 30(12), pp. 1520-1539.
- Arabasz, W., 1968. Geologic structure of the Taltal area, Northern Chile, in relation to the earthquake of December 28, 1966. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 58(3), pp. 835-842.
- Becker, R. & Sinko, A., 2013. *Econometric Computing Learning Resource (ECLR)*. [En línea] Disponible en: http://eclr.humanities.manchester.ac.uk/index.php/Probability_Norm [Último acceso: 7 Noviembre 2016].
- Beyer, E., 1877. *Daños del Maremoto*, Taltal. Escala 1:4.000.
- Bureau of Meteorology, 2007. *Climate, Bureau of Meteorology. Australian Government*. [En línea] Disponible en: <http://www.bom.gov.au/climate/influences/timeline/> [Último acceso: 15 02 2017].
- Cascini, L., 2008. Applicability of landslide susceptibility and hazard zoning at different scales. *Engineering Geology*, Volume 102, pp. 164-177.
- Charrier, R., Farías, M. & Maksaev, V., 2009. Evolución tectónica, paleogeográfica y metalogénica durante el Cenozoico en los Andes de Chile Norte y Central e implicaciones para las regiones adyacentes de Bolivia y Argentina. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 65(1), pp. 5-35.
- Charrier, R. et al., 2013. Cenozoic tectonic evolution in the Central Andes in northern Chile and west central Bolivia: implications for paleogeographic, magmatic and mountain building evolution. *International Journal of Earth Sciences*, 102(1), p. 235-264.

- Charrier, R., Pinto, L. & Rodríguez, M. P., 2007. Tectonostratigraphic evolution of the Andean Orogen in Chile. In: T. Moreno & W. Gibbons , eds. *Geology of Chile*. London: The Geological Society, pp. 21 - 114.
- Chau, K. et al., 2004. Landslide hazard analysis for Hong Kong using landslide inventory and GIS. *Computers & Geosciences*, Volume 30, pp. 429-443.
- Chong, G., 1973. *Reconocimiento Geológico del área Catalina-Sierra de Varas y estratigrafía del Jurásico del Profeta, provincia de Antofagasta*. Memoria para optar al título de Geólogo (Inédito). Departamento de Geología, Universidad de Chile, 248 p.
- Chong, G., Gajardo, A., Hartley, A. & Moreno, T., 2007. Industrial minerals and Rocks. En: T. Moreno & W. Gibbons, (eds) *Geology of Chile*. London: The Geological Society, pp. 201-214.
- Chow, V. T., Maidment, D. R. & Mays, L. W., 1994. Capítulo 12: Análisis de Frecuencia. En: M. E. S. R., ed. *Hidrología Aplicada*. Bogotá: McGraw Hill, 584 p.
- Cohen, K., Finney, S. & Gibbard, P., 2015. *International Commission on Stratigraphy*. [En línea] Disponible en: <http://www.stratigraphy.org/ICSchart/ChronostratChart2015-01.pdf> [Accessed Mayo 2016].
- Comte, D. & Pardo , M., 1991. Reappraisal of Great Historical Earthquakes in the Northern Chile and Southern Peru Seismic Gaps. *Natural Hazards*, Issue 4, pp. 23-44.
- Corominas, J. & Moya, J., 2008. A review of assessing landslide frequency for hazzard zoning purposes. *Engineering Geology*, Volumen 102, pp. 193-213.
- Cruden, D. & Varnes, D., 1996. *Landslides types and processes, Special report*. Transportation Research Board, National Academy of Sciences, p. 247: 36-75.
- CSN, 2012. *Centro Sismológico Nacional*. [En línea] Disponible en: <http://www.sismologia.cl/> [Último acceso: 6 Octubre 2016].
- Esaki, T., Thapa, P., Mitani, Y. & Ikemi, H., 2005. Landslide and debris flow characteristics and hazard mapping in mountain hill-slope terrain using GIS, central Nepal.. *Landslide Risk Management*, pp. 657-667.
- Escribano, J. y otros, 2013. *Cartas Bahía Isla Blanca y Taltal, Región de Antofagasta. Escala 1:100.000*, Santiago: Serie de Geología Básica, SERNAGEOMÍN.
- Evans, N., Huang, S. & King, J., 1997. *The natural terrain landslide study. Phases I and II. Geo Report No. 73*, The Government of Hong Kong, Special Administrative Region: Geotechnical Engineering Office, Civil Engineering Department, 128 p.
- Fell, R. et al., 2008. Guidelines for landsilde susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning. *Engineering Geology*, Volume 102, pp. 85-98.

- Fernández, J., Falcón, F., Arenas, M. & Huerta, S., 2014. *Geología para el ordenamiento territorial: Área de Antofagasta, Región de Antofagasta. Mapa 3: Peligro sísmico y de inundación por tsunami*. Escala 1:100.000, Serie Geológica Ambiental, SERNAGEOMIN.
- Ferrando, R. y otros, 2013. *Carta Aguas Blancas, Región de Antofagasta*. Escala 1:100.000, Serie Geológica Básica, SERNAGEOMIN.
- García, F., 1967. Geología del Norte Grande de Chile. *Symposium sobre el Geosinclinal Andino*, Departamento de Geología, Universidad de Chile, 138 p.
- Garreaud, R. D., 2011. Cambio Climático: Bases Físicas e Impactos en Chile. *Revista Tierra Adentro - INIA*, Issue 93, 14p.
- Garreaud, R., Molina, A. & Farías, M., 2010. Andean uplift, ocean cooling and Atacama hyperaridity: A climate modeling perspective. *Earth and Planetary Sciences Letters*, Volume 292, pp. 39-50.
- Garreaud, R., Vuille, M. & Clement, A., 2003. The climate of the Altiplano: observed current conditions and mechanisms of past changes. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, Volume 194, pp. 5-22.
- Garreaud, R., Vuille, M., Compagnucci, R. & Marengo, J., 2009. Present-day South American climate. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, Volumen 281, pp. 180-195.
- Garrido, N., Fuenzalida, F. & Neira, H., 2015. *Informe Técnico. Evaluación de áreas a evacuar y puntos de encuentro multipropósito ante riesgos de remociones en masa y tsunami en la ciudad de Taltal*, Taltal: Mesa Técnica PE Taltal Nov 2015, Sernageomin, 14 p.
- Gimeno, H., 2005. *Taltal: crisol de nacionalidades: historia y geografía humana*. Taltal: Ilustre Municipalidad de Taltal (Printtec), 98 p.
- González de Vallejo, L., Ferrer, M., Ortuño, L. & Oteo, C., 2002. *Ingeniería Geológica*. Madrid: Pearson Educación, 744 p.
- Google Earth, 2016. *Image CNES/Astrium, Terrametrics, Google.*, Varias escalas.
- Habiterra Ltda. Consultores, 2017. *Estudio de Riesgos y Actualización del Plan Regulador Comunal de Chañaral (en prep.)*, Chañaral: Xterrae Ltda. & ICASS Ltda.
- Hauser, A., 1993. Remociones en masa en Chile.. *Boletín del Servicio Nacional de Geología y Minería*, Issue 45, pp. 7-29.
- Hauser, A., 1993. Remociones en masa en Chile. *Boletín del Servicio Nacional de Geología y Minería*, Issue 45, pp. 7-29.
- HYCON, 1956. 24412, 24413. [Arte] (Instituto Geográfico Militar).
- Lan, H., Derek Martin, C., Zhou, C. & Ho Lim, C., 2010. Rockfall hazard analysis using LiDAR and spatial modeling. *Geomorphology*, Volumen 118, pp. 213-223.
- Lara, M., 2007. *Metodología para la evaluación y zonificación de peligro de remociones en masa con aplicación en Quebrada San Ramón, Santiago Oriente, Región Metropolitana*. Memoria para optar al grado de magíster en geología. Departamento de Geología, Universidad de Chile, 212 p.

- Lemke, R., Dobrovolsky, E., Alvarez, L. & Ortiz, F., 1968. Geologic and related effects of the Taltal earthquake, Chile, of December 28, 1966. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 58(3), pp. 851-859.
- León, T., 2014. *Geología marina de la bahía de Taltal e implicancias para la prospección arqueológica submarina*. Memoria para optar al grado geólogo. Departamento de Geología, Universidad de Chile, 109 p.
- Leyton, F., Ruiz, S. & Sepúlveda, S., 2010. Reevaluación del peligro sísmico probabilístico en Chile central. *Andean Geology*, 37(2), pp. 455-472.
- Martínez, B., 2009. *Susceptibilidad de remoción en masa en la Quebrada de Macul, Región Metropolitana*. Memoria para optar al título de Geóloga. Departamento de Geología, Universidad de Chile, 66 p.
- MINVU, 2001. *Plan Regulador Comunal de Taltal*, Taltal.
- MINVU, 2015. *Noticias MINVU*. [En línea] Disponible en: <http://www.minvu.cl/opensite/det/20150424174152.aspx> [Último acceso: 3 Junio 2016].
- Náquira, M. V., 2009. *Susceptibilidad de remociones en masa en las costas de fiordos cercanos a Hornopirén, X Región*. Memoria para optar al título de Geóloga. Departamento de Geología, Universidad de Chile, 201 p.
- Naranjo, J. & Puig, A., 1984. *Hojas Taltal y Chañaral, Regiones de Antofagasta y Atacama. Escala 1:250.000*, Santiago: Serie Carta Geológica de Chile 62-63. Sernageomin.
- NOAA, 2017. *Pacific Decadal Oscillation, Teleconnections*. [En línea] Disponible en: <https://www.ncdc.noaa.gov/teleconnections/pdo/> [Último acceso: 15 02 2017].
- ONEMI, 2012. *Mapa de Riesgo Regional, Peligro Volcánico y Tsunami - Región de Antofagasta*, Antofagasta: Unidad de Gestión Territorial.
- ONEMI, 2015. *Análisis Multisectorial de Eventos 2015*, Santiago: Comité Científico Técnico 2015.
- Ortlieb, L., Vargas, G. & Hocquenghem, A.-M., 2002. ENSO Reconstruction Based on Documentary Data From Ecuador, Peru and Chile. *Environment and History*, Volume 3, pp. 255-272.
- Pesevski, I., Jovanovski, M., Papic, J. & Abolmasov, B., 2015. Model for GIS landslide database establishment and operation in Republic of Macedonia. *Geologica Macedonica*, 29(1), pp. 75-86.
- Pitt, A. & Ellis, J., 1968. Preliminary report on some aftershocks of the December 28, 1966 earthquake in Northern Chile. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 58(3), pp. 843-850.
- Rivera Marfán, J., 2014. *Historia de los puertos y caletas del Norte de Chile: (desde Arica hasta Papudo)*. Valparaíso, Chile: Dirección General de Territorio Marítimo y de Marina Mercante, 575 p.
- SAF, 1997. 3924, 3925, 3926. [Fotografías aéreas] (Servicio Aerofotogramétrico de la Armada de Chile). Escala 1:70.000, proyecto GEOTEC.
- SERNAGEOMIN, 2015. *Ranking de Volcanes*. [En línea] Disponible en: <http://www.sernageomin.cl/archivos/Ranking-de-Volcanes.pdf>

- [Último acceso: 11 Julio 2016].
- SHOA, 2012. *Puerto Taltal. Carta de Inundación por tsunami, referida a evento del año: 1877*, Valparaíso: Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada. Escala 1:10.000.
- Stern, C. et al., 2007. Chilean Volcanoes. En: T. Moreno & W. Gibbons, (eds) *Geology of Chile*. London: The Geological Society, pp. 147-178.
- Ulriksen, C., 1979. *Regional geology, geochronology and metalogeny of the Coastal Cordillera of Chile Between 25°30' and 26°00' south*. Dalhousie University, Canadá, 220 p.
- Urbe Arquitectos, 2012. *Estudio fundado de riesgo para la ciudad de Taltal*, Taltal. Modificación al plan reguador comunal de Taltal, borde costero urbano y zona portuaria. Ilustre Municipalidad de Taltal, 62 p.
- Urrutia, R. & Lanza, C., 1993. *Catástrofes en Chile 1541 - 1992*. Santiago: La Noria, 440 p.
- USGS, 2008. *What are Volcano Hazards?*. [En línea] Disponible en: <http://pubs.usgs.gov/fs/fs002-97/> [Último acceso: 11 Julio 2016].
- Vargas, G., Ortlieb, L. & Rutlant, J., 2000. Aluviones históricos en Antofagasta y su relación con eventos El Niño/Oscilación del Sur. *Revista Geológica de Chile*, 27(2), pp. 157-176.
- Vargas, G., Rutlant, J. & Ortlieb, L., 2006. ENSO tropical-extratropical climate teleconnections and mechanisms for Holocene debris flows along the hyperarid coast of western South América (17°-24°S). *Earth and Planetary Science Letters*, Volume 249, pp. 467-483.
- Willis, B., 1929. Studies in comparative seismology: Earthquake conditions in Chile. *Carnegie Institution of Washington*, Issue 382, p. 178.

ANEXOS

Índice de Ilustraciones y Tablas Incluidas en los Anexos

Anexo A—1: Tabla catastro de eventos meteorológicos (1 de 7).	5
Anexo A—2: Tabla catastro de eventos meteorológicos (2 de 7).	6
Anexo A—3: Tabla catastro de eventos meteorológicos (3 de 7).	7
Anexo A—4: Tabla catastro de eventos meteorológicos (4 de 7).	8
Anexo A—5: Tabla catastro de eventos meteorológicos (5 de 7).	9
Anexo A—6: Tabla catastro de eventos meteorológicos (6 de 7).	10
Anexo A—7: Tabla catastro de eventos meteorológicos (7 de 7).	11
Anexo A—8: Tabla catastro de terremotos y tsunamis (1 de 7).	12
Anexo A—9: Tabla catastro de terremotos y tsunamis (2 de 7).	13
Anexo A—10: Tabla catastro de terremotos y tsunamis (3 de 7).	14
Anexo A—11: Tabla catastro de terremotos y tsunamis (4 de 7).	15
Anexo A—12: Tabla catastro de terremotos y tsunamis (5 de 7).	16
Anexo A—13: Tabla catastro de terremotos y tsunamis (6 de 7).	17
Anexo A—14: Tabla catastro de terremotos y tsunamis (7 de 7).	18
Anexo B—1: Períodos de retorno a partir de los datos de precipitaciones encontrados para Taltal.	19
Anexo B—2: Períodos de retorno a partir de los datos de precipitaciones encontrados para Aguas Verdes.	20
Anexo B—3: Períodos de retorno a partir de la estimación de intensidad.	21
Anexo C—1: Ventana geotécnica de la Formación La Negra [Jiln(a)].	23
Anexo D—1: Asignación del grado de certeza para terremotos y tsunamis.	25
Anexo D—2: Puntajes para evaluar el grado de certeza de los eventos meteorológicos.	26
Anexo D—3: Asignación del grado de certeza para eventos meteorológicos.	27
Anexo D—4: Distribución Normal clásica en forma de campana.	27
Anexo D—5: Asignación del grado de certeza para eventos meteorológicos.	28
Anexo D—6: Histograma de puntajes asignados para la estimación de certeza.	28
Anexo E—1: Escala modificada Sieberg de intensidades de Tsunamis.	29
Anexo E—2: Definición de intensidades para tsunamis con respecto a la escala de Sieberg.	30
Anexo E—3: Definición de intensidad para sismos, con respecto a la escala de Mercalli.	30

Anexo E—4: Escala modificada de Mercalli de intensidades de sismos.	30
Anexo E—5: Definición de intensidades para Marejadas.....	32
Anexo F—1: Zona isosísmica grado VIII en escala de Mercalli, para el terremoto de 1877.	34
Anexo F—2: Zanja formada por aluvión de 1930 en calle Atacama.	35
Anexo F—3: Mapa isosísmico del terremoto de 1966.....	37
Anexo F—4: Zonas afectadas por aluvión en Marzo de 2015, Taltal.....	38
Anexo G—1: Unidades geológicas en la cuenca de la Quebrada Taltal y aledañas a la ciudad de Taltal.....	40
Anexo G—2: Unidades estratificadas Paleozoicas.	41
Anexo G—3: Representación del contexto tectónico Triásico Tardío.....	42
Anexo G—4: Unidades estratificadas Triásicas.....	42
Anexo G—5: Representación del contexto tectónico Jurásico.....	43
Anexo G—6: Unidades estratificadas Jurásicas.	43
Anexo G—7: Representación del contexto tectónico Cretácico.	44
Anexo G—8: Unidades estratificadas Cretácicas.....	45
Anexo G—9: Representación del contexto Paleógeno.	46
Anexo G—10: Unidades estratificadas Paleógenas.	46
Anexo G—11: Representación del contexto Mioceno.....	47
Anexo G—12: Unidades estratificadas Miocenas.	47
Anexo G—13: Unidades estratificadas Modernas.....	48
Anexo G—14: Intrusivos Paleozoicos.....	49
Anexo G—15: Intrusivos Jurásicos.....	50
Anexo G—16: Intrusivos Cretácicos.	51
Anexo H—1: Índices de Peligro asignados para prueba de ajuste.	52
Anexo H—2: Pesos asignados para la prueba de ajuste.	54
Anexo H—3: Comparación entre resultados de la Prueba 1.	55
Anexo H—4: Comparación entre resultados de la Prueba 2.	56
Anexo H—5: Comparación entre resultados de la Prueba 3.	57

Anexos Externos			
Nombre	Tipo	Citado en	Contenido
Ajuste Metodológico	Carpeta	Punto 4.4.1	Imágenes
Carta Geológica	Mapa	Punto 1.5	Imagen
Catastro Eventos Meteorológicos	Datos XML	Punto 3.4.1	Hojas de datos y análisis de los mismos
Catastro Terremotos y Tsunamis	Datos XML	Punto 3.4.1	Hojas de datos y análisis de los mismos
Inventario	Carpeta	Punto 0	Imágenes y KMZ
Noticias	Carpeta	Punto 3.1	Documentos PDF
Peligro	Carpeta	Punto 4.7	Imágenes
Práctica Chañaral	Documento Word	Punto 3.2	Informe anterior
Susceptibilidad	Carpeta	Punto 4.5	Imágenes
Zonificación de Intensidades	Carpeta	Punto 0	Imágenes

A. Anexo A: Catastro

Anexo A—1: Tabla catastro de eventos meteorológicos (1 de 7).

Eventos Meteorológicos										
ID	Fecha	Condición Meteorológica	Consecuencias	Precipitación (mm)	Descripción General	Descripción de daños en Taltal	Observaciones	Fuentes	Intensidad	Certeza
1796M	Junio de 1796	Lluvia- EN	Flujo de Barro -		Intensa lluvia que hizo bajar torrentes por la quebrada de Paipote.	--	Taltal aún no se fundaba	BM; OYV; RM; UYL;	--	I-
1827M	Mayo a Junio de 1827	Lluvia- Viento- Nieve- EN	Flujo de Barro - Flujo de Agua - Inundación -		Temporales de lluvia, viento y nieve azotaron desde Copiapó hasta Curicó. En Copiapó bajaron aguas por la quebrada Paipote inundando la ciudad.	--	Taltal aún no se fundaba	BM; OYV; RM; UYL;	--	I-
1877M	Julio 29 de 1877	Lluvia- Viento- EN++	Flujo de Agua - Inundación -		Fuertes temporales afectaron desde el desierto de Atacama, hasta Chiloé. Desborde del río Salado en Chañaral y del río Copiapó.	--	Año en que se encomienda la construcción de la ciudad de Taltal por el presidente Pinto.	BM; MV 30-7-1877; OYV; RM; UYL;	--	I-
1884M	Junio 22 y Julio 6 de 1884	Lluvia- Viento- EN (LN/EN)	Flujo de Agua -		Frente de mal tiempo genera precipitaciones en Copiapó, Chañaral, Pan de Azúcar e Iquique entre el 22 el 27 de Junio. Hubo una fuerte avenida de las quebradas casi destruyó las oficinas salitreras situadas entre Ramírez y Pozo Almonte.	Se puede inferir que este frente también pudo haber generado precipitaciones en Taltal o en el interior de la quebrada.	La línea del ferrocarril desde Taltal hacia el interior se encontraba en construcción	BM; MV 2+7-7-1884; O; OYV; Z;	B	I
1888M	Agosto 13 de 1888	Lluvia- Viento- EN+	Sin Daños	Sí, Taltal;	Temporal en Atacama, inundación en río Salado, lluvias en Taltal, Chañaral, Caldera y Copiapó.	Lluvias y viento muy fuerte durante la noche del 13, no se registran daños.	--	BM; MV 20-8-1888; O;	SD	C-
1895M	Junio 1 y Junio 17 de 1895	Viento- Marejadas- Llovizna- EN	Sin Daños		Fuertes temporales acompañados de grandes marejadas entre Arica y Vallenar. Daños en los muelles de Arica, Tocopilla, Cobija, Chañaral, Vallenar e Iquique, además de daños a embarcaciones pequeñas.	En Taltal no hubo lluvias importantes durante este mes, solo lloviznas.	--	BM; LD 18-6-1895; MV 3-6-1895; OYV;	--	C-
1899M	Junio de 1899	Lluvia- Viento- Marejadas- EN			Varios frentes de mal tiempo, durante Mayo a Agosto, causaron daños de todo tipo entre Iquique y Osorno. A mediados de Junio un frente afectó entre Vallenar y Osorno, produjo marejadas en Tocopilla, Antofagasta y Chañaral, deteriorando muelles y dejando destruidas las casas cerca del mar.	Se infiere que no fue afectada.	Taltal no se menciona en la prensa en relación a este evento	BM; OYV; UYL;	SD	I-
1902M	Julio 11, Julio 16 y Julio 28 de 1902	Lluvia- LN/EN	Flujo de Agua - Inundación -		Frente lluvioso se desarrolla en la segunda quincena de Julio. Genera lluvias entre Copiapó e Iquique, provocando un gran aluvión en Copiapó, donde llovió durante 48 horas. En Antofagasta la lluvia fue menor, pero dejó barro y socavó algunas calles.	Similar a la de 1884, pero menor. Avenida de las quebradas provocada por las lluvias de Julio. No se descartan lluvias en Taltal y al interior.	No se menciona a Taltal en la prensa, pero noticias indican que el frente se desplazó hacia el norte pasando por Taltal	BM; MV 3-6-1902; Z;	B	I-
1906M	Enero 1 a Enero 10 de 1906	Lluvia- Viento- Marejadas- EN	Flujo de Barro - Erosión -		Desbordes de los ríos Copiapó y Huasco deja graves daños en Copiapó y Vallenar. En Iquique, tres días aguaceros y neblina causó filtraciones y daños en las casas.	Fuerte temporal hunde varias embarcaciones y deteriora el muelle del Fisco. Aluvión bajó por la quebrada del Ferrocarril este año.	Aluvión se menciona en prensa local de 1918.	BM; MV 12-01-1906; ONE 2001; OYV; UYL; VP 23-5-1918;	M	I

Anexo A—2. Tabla catastro de eventos meteorológicos (2 de 7).

Eventos Meteorológicos										
ID	Fecha	Condición Meteorológica	Consecuencias	Precipitación (mm)	Descripción General	Descripción de daños en Taltal	Observaciones	Fuentes	Intensidad	Certeza
1911M	Junio 24 de 1911	Lluvia-Tormenta Eléctrica-LN/EN (EN)			Frente de mal tiempo entre Arica y Coquimbo genera lluvias entre Antofagasta e Iquique. En Antofagasta la lluvia fue acompañada de truenos y relámpagos, Calama fue cubierto por nieve. Perjuicios en el cantón de Huara, estimados en medio millón de pesos (de la época). En Iquique causó varios daños y pérdidas.	Hay evidencias de que el frente se desplazó hacia el norte, desde Copiapó hasta Tacna, por lo que no se descartan lluvias en Taltal y al interior.	Taltal no es mencionado en la prensa, pero frente afecta ciudades al sur y al norte.	BM; MS 25-6-1911; MA 25-6-1911; ONE 2001; OYV; UYL; Z;	SD	I
1912M	Mayo 17 a Mayo 18 de 1912	Lluvia- Nieve-EN	Flujo de Barro -		Temporal produjo aluviones en Cobija y Gatico, cantones salitreros cubiertos de nieve.	Temporal en Aguas Blancas (a 150Km al NE de Taltal), dejando cerros cubiertos de nieve.	No se menciona a Taltal en la prensa.	BM; MS 19+21-5-1912; MA 22+23-5-1912; ONE 2001;	SD	I
1913M	Agosto 17 de 1913	Lluvia- EN	Sin Daños	10 Taltal;	Lluvias en La Serena y Coquimbo. Prensa de Antofagasta no menciona este evento.	Registro de precipitaciones indica que también llovió en Taltal	--	A; BM; MS 20-8-1913;	SD	I
1914M	Septiembre 15 a Septiembre 16 de 1914	Lluvia- EN	Sin Daños	8 Taltal;	Dos días de lluvia en Antofagasta.	Registro de precipitaciones indica que también llovió en Taltal	--	A; BM; MA 7-6-1919; OYV;	SD	I
1918M	Mayo 21 a Mayo 22 de 1918	Lluvia-Tormenta Eléctrica-LN/EN	Flujo de Agua - Inundación -	25 Taltal;	Frente de mal tiempo entre Copiapó y Antofagasta, genera crecida del río Salado en Chañaral, cortes de FFCC y algunos daños en Antofagasta.	En Taltal llovió durante toda la noche, el agua entró a las casas ocasionando daños. Al interior del departamento las quebradas formaron torrentes y las líneas de ferrocarril fueron cortadas en varios puntos, pero estas corrientes no formaron un aluvión que llegara hasta la ciudad. Daños en Oficina Santa Luisa.	--	A; BM; MS 24-5-1918; MA 23-5-1918; ONE 2001; OYV; UYL; VP 23+27-5-1918;	B	C
1919M	Junio 6 de 1919	Lluvia- EN	Flujo de Barro - Inundación -	7 Taltal;	Barríos arrasados por aluvión en Ovalle y La Serena, cortes en la vía férrea.	Se infiere que la ciudad fue afectada sin mención en la prensa nacional.	No se menciona este evento en otras fuentes, periódico local discontinuado durante Mayo, Junio y Julio de ese año	A; BM; MA 7-6-1919; OYV;	M	I
1920M	Junio de 1920	Lluvia- LN/EN		14 Taltal;	--	--	No se encontraron otros registros para este evento	A; BM;	B	I-
1923M	Julio 9 de 1923	Lluvia- Nieve- Marejadas- EN	Sin Daños	12 Taltal;	--	Lluvias torrenciales durante medio día, nevadas al interior, sin daños.	--	A; BM; VP 10-7-1923;	SD	C-
1924Ma	Junio 3 a Junio 4 de 1924	Marejadas- LN	Sin Daños		Fuertes marejadas entre Antofagasta y Valparaíso.	No hubo daños en Taltal.	--	BM; MS 21+22-5-1924 y 4+5+6-6-1924; UYL; VP 6-6-1924;	B	C-
1924Mb	Septiembre 1 a Septiembre 10 de 1924	Lluvia- LN	Sin Daños	12 Taltal;	--	Diez días lluviosos o nublados.	--	A; BM; VP 11-9-1924;	SD	C-
1925M	Julio 31 a Agosto 1 de 1925	Lluvia- LN/EN	Inundación -	19 Taltal;	--	Día de lluvias intensas forma lodazales y acequias, impide el cruce de calles a pie por presencia de agua y barro.	--	A; BM; OYV; VP 3-8-1925;	B	C-
1926M	Junio 9 y Junio 30 de 1926	Lluvia- Viento- EN	Sin Daños	25 Taltal;	Temporales entre Valparaíso y Tongoy.	El día 9 se observa tiempo amenazador, hilos del telégrafo cortados, atrasos en el tren longitudinal, probablemente por temporales más al sur. El 29 se registran lluvias en la ciudad.	--	A; BM; OYV; VP 9+30-6-1926;	B	C-

Anexo A—3: Tabla catastro de eventos meteorológicos (3 de 7).

Eventos Meteorológicos										
ID	Fecha	Condición Meteorológica	Consecuencias	Precipitación (mm)	Descripción General	Descripción de daños en Taltal	Observaciones	Fuentes	Intensidad	Certeza
1927Ma	Junio 3 de 1927	Lluvia- LN	Flujo de Agua - Inundación -	40,3 Taltal;	Durante este mes se registran varias catástrofes por frente de mal tiempo. Chiloé y Copiapó son las ciudades más afectadas.	Llueven 40,3 mm en total, durante 6 horas, ocasionando grandes perjuicios, casas anegadas y calles cubiertas de lodo.	--	A; BM; VP 4-6-1927;	M	C-
1927Mb	Julio 4 de 1927	Lluvia- Nieve- LN/EN	Inundación -	25,8 Taltal;	Durante este mes se registran varias catástrofes por frente de mal tiempo. Chiloé y Copiapó son las ciudades más afectadas.	Llueven 25,8 mm, con mayor intensidad, pero dejando menores perjuicios, principalmente en la Escuela Superior de Hombres N°1, que se encuentra con salas y patio inundados. También ha nevado en la pampa, hasta más abajo de Aguas Verdes. Las oficinas Flor de Chile, Tricolor, Catalina, Aguada y sus campamentos también se encuentran cubiertas de nieve. La vía férrea que llega hasta el puerto fue socavada por las aguas que bajaron por la quebrada Taltal, así como también la calle O'Higgins, que fue reforzada por Bomberos para canalizar el agua temporalmente.	--	A; BM; VP 5+6-7-1927;	M	C-
1928M	Julio 11 de 1928	Lluvia- Nieve- EN	Inundación -	40 Taltal;	--	Llueve a intervalos durante tres noches, causando daños a varias casas que fueron completamente inundadas. También nieva en la pampa, paralizando la Oficina Caupolicán y cortando las líneas de tren.	--	A; BM; VP 13-7-1928;	M	C-
1929Ma	Junio 20 a Junio 21 de 1929	Lluvia- LN	Flujo de Barro - Inundación -	29 Taltal;	Frente de mal tiempo genera aluviones en varios poblados de Atacama. Cortes en la vía férrea desde La Serena a Taltal. Daños en Antofagasta.	Lluvias dejan perjuicios en varias habitaciones. Quedó completamente inundada la cuadra entre las calles Serrano, Ramírez, Riquelme y San Martín (como en años anteriores), incluyendo la "Pensión Victoria". La Escuela Completa de Hombres N°1, quedó en condiciones desastrosas (incluyendo la oficina del director y las salas). En la parte baja de la misma calle Riquelme hubo habitaciones anegadas por el agua, incluyendo el negocio de la señora Guillermina de Vallejos y la oficina de la imprenta. En la Escuela Completa N°4 de Niñas, el agua entró por la calle Riquelme al patio inundando las salas. La Escuela de Niñas N°5, en la calle San Martín entre Sargento Aldea y República, también fue dañada. Se cortó el ferrocarril en el Km 7, donde fue removido el terraplén y destruyó la vía férrea. También hubo daños a la línea del ferrocarril dentro de la ciudad, así como a los postes telefónicos y al Estadio de Taltal. El camino al interior fue dañado en varios puntos hasta el Km 22 y también el camino a Paposo.	--	A; BM; MS 21+22-6-1929; OYV; VP 21+22+25-6-1929;	F	C-
1929Mb	Agosto 10 de 1929	Lluvia- Nieve- LN	Inundación -		Temporal entre Antofagasta y Puerto Montt. Anegamientos en las zonas bajas de la mayoría de las ciudades, además de caídas de árboles y postes. Daños en el puerto de Antofagasta.	Taltal no sufre daños durante temporal que destruye el puerto de Antofagasta, pero cinco días después, las lluvias causaron inundaciones en varios barrios.	--	BM; MS 10-8-1929; ONE 2001; OYV; VP 14-8-1929;	M	I

Anexo A—4: Tabla catastro de eventos meteorológicos (4 de 7).

Eventos Meteorológicos										
ID	Fecha	Condición Meteorológica	Consecuencias	Precipitación (mm)	Descripción General	Descripción de daños en Taltal	Observaciones	Fuentes	Intensidad	Certeza
1930M	Agosto 20 a Agosto 22 de 1930	Lluvia- Viento- EN	Flujo de Barro - Flujo de Agua -	67 Taltal;	Temporal de viento y lluvias afecta Calama, Antofagasta, Taltal y Chañaral.	En Taltal el temporal duró diez horas. Se generaron aluviones de agua y barro. Se rompió el puente La Brea, paralizando el servicio de trenes. Interrupción del servicio de agua potable. Inundación de las casas, se cuentan 20 viviendas arrasadas por el barro. Bajó un torrente de agua por la quebrada de Taltal, vaciando por las calles Cadenas, O'Higgins, Riquelme, Serrano y Atacama, que quedaron cubiertas con 60 cm de barro, casas anegadas y con sus cimientos socavados, muebles y tabiques fueron removidos y esparcidos calles abajo. La calle Atacama fue socavada en un tramo de dos cuadras en una zanja de 5m de ancho y 3 de profundidad. También cayeron postes de alumbrado, se rompieron las cañerías de agua potable y del alcantarillado. Daños en el Km 2 hasta Aguas verdes y en varias partes hasta el Km 32 a Las Breas. El camino a Paposo fue cortado en las quebradas de San Ramón, Cascadas y Bandurrias. La corriente arrastraba agua, barro, piedras y otros elementos y pasaban por la calle Atacama como "su verdadero cauce" hacia el mar y bajaron también por la quebrada El Hueso.	--	A; BM; MS 21-8-1930; ONE 2001; OYV; LR 21+22-8-1930; UYL; V;	MF	C
1931M	Octubre de 1931	Lluvia- EN		9 Taltal;	--	--	No se encontraron otros registros para este evento	A; BM;	SD	I-
1932M	Julio 1 de 1932	Lluvia- EN	Flujo de Agua -	30 Taltal;	Fuerte temporal en Antofagasta	Lluvias dañaron el alumbrado público y la vereda de la calle Riquelme, entre Juan Martínez y José A. Moreno.	--	A; BM; MS 2-7-1932; OYV; VP 5-7-1932;	B	C-
1936M	Julio 19 de 1936	Lluvia- Viento- LN/EN			Frente de mal tiempo afecta Antofagasta y Taltal, aumentando los daños del sismo.	Temporal de viento y lluvia aumenta los daños del terremoto en la postación y tendido del telégrafo. El viento voló techos en Paposo y en las oficinas Santa Luisa, Flor de Chile y Sierra Overa, también arrancó árboles de su sitio. Se cayeron los postes telefónicos de las calles Ramírez, Aldea, San Martín y Serrano, como también algunos postes de alumbrado eléctrico.	Daños fueron ocasionados por el viento	BM; ONE 2001; EP 13351; LR 20-7-1936; UYL;	B	C-
1938M	Febrero 26 de 1938	Lluvia- LN	Inundación -		Lluvias y crecidas de los ríos causan daños en Copiapó, Calama e Iquique.	--	No es posible confirmar ni descartar daños en Taltal	BM; MS 27-2-1938 y 1+3-3-1938; UYL;	--	I-

Anexo A—5: Tabla catastro de eventos meteorológicos (5 de 7).

Eventos Meteorológicos										
ID	Fecha	Condición Meteorológica	Consecuencias	Precipitación (mm)	Descripción General	Descripción de daños en Taltal	Observaciones	Fuentes	Intensidad	Certeza
1940M	Junio 12 a Junio 13 de 1940	Lluvia- Viento- Marejadas- EN	Flujo de Barro - Deslizamientos - Erosión -		Fuertes temporales durante ese año dejan destrozos en varias zonas del país. En Junio un frente de mal tiempo afectó la zona norte con mayor efecto en Taltal.	Marejadas, lluvias y aluvión. El aluvión se produjo durante la noche, dejando dos muertos y decenas de heridos que fueron rescatados de los escombros. Varias casas fueron arrastradas por completo, otras fueron destruidas y las calles quedaron llenas de escombros y barro, así como establecimientos comerciales. El aluvión arrasó con violencia varias casas de la calle Carena, fue destruido en Liceo Industrial y la planta eléctrica quedó totalmente inundada. Servicios de agua, luz y telégrafos fueron suspendidos por los daños. Varias personas fallecidas. Deslizamientos en los cerros.	--	BM; MS 14+15-6-1940; ONE 2001; OYV; UYL; V;	MF	C-
1942M	Junio 14 y Junio 23 de 1942	Lluvia- Viento- LN	Flujo de Agua - Deslizamientos -		--	Lluvias generan la corrida de aguas por varias quebradas hasta el mar. Daños en caminos a Las Breas y Paposo. Daños en techos por el viento y casas en la acera poniente tienen entrada de agua y barro, también la vereda sur de la calle Riquelme. Planta Municipal de electricidad dañada	--	BM; EP 17+24-6-1942 y 2-7-1942;	M	C-
1946M	Mayo 21 de 1946	Lluvia- Viento- EN			Lluvias entre Copiapó y Combarbalá.	Ciclón y lluvias dejan perjuicios en la ciudad.	Mencionado 2 años después en diario local.	BM; MS 21-5-1946; VP 26-6-1948;	B	I
1948M	Mayo 20 de 1948	Lluvia- Viento- LN			Ciclón comienza en Arica y se desplaza hacia el sur dejando daños en Iquique, Coquimbo y La Serena.	Causa daños en varios sectores sacando techos, tabiques desnivelados o botados, árboles quebrados. Mayor daño en el cementerio.	Daños ocasionados por el viento. Evento calificado como tragedia en prensa de 1967	BM; UYL; VP 26-5-1948 y 30-8-1967;	B	C-
1954Ma	Febrero 15 a Febrero 20 de 1954	Lluvia- Viento- EN/LN (EN)	Sin Daños		Frente de mal tiempo genera aluviones en poblados de Iquique y crecida del río Copiapó.	No hubo daños en la ciudad ni en los caminos cercanos, pero si hubo corte de comunicaciones y caminos que dejaron la ciudad aislada.	--	BM; ONE 2001; OYV; VP 24-2-1954;	SD	C-
1954Mb	Julio 9 a Julio 10 de 1954	Lluvia- Viento- EN/LN (LN)	Deslizamientos -		Temporal de viento en Antofagasta.	Lluvias provocan daños en techumbres de varias casas. Camino a Paposo seriamente afectado.	Daños fueron ocasionados por el viento	BM; ONE 2001; OYV; VP 14-7-1954;	B	C-
1965M	Agosto 10 a Agosto 12 de 1965	Lluvia- Viento- EN+	Sin Daños		Temporal de viento y lluvia entre Atacama y Aysén	Prensa local informa daños en carretera cerca de Los Vilos para los viajeros.	No se mencionan daños en la prensa de Taltal.	BM; MS 1+11+12-8-1965; ONE 2001; OYV; VP 18-8-1965;	SD	C-
1967M	Agosto 26 a Agosto 27 de 1967	Lluvia- Viento- Nieve- Marejadas- LN	Flujo de Agua - Inundación - Deslizamientos -		Temporal de viento, lluvia y nieve en la provincia de Antofagasta, durante los primeros días de Agosto. Otro frente, el 26 de Agosto, un corto e intenso frente de mal tiempo afectó a Iquique, Antofagasta y Copiapó. En Antofagasta cayeron en 6 horas, 9mm de agua, destruyendo techos y dejando viviendas anegadas.	Temporal con viento y lluvia causa daños en el 80% de las casas. Se cavó una zanja para canalizar el agua de la quebrada Taltal y minimizar los daños. Hubo 6 embarcaciones varadas en la costa, cortado el camino a Paposo por derrumbes. No hubo aluvión. Dejó 30 cm de nieve en pampa Pimiento, en las minas Julia y Oficina Alemana.	--	BM; MS 27+28-8-1967; ONE 2001; UYL; VP 30-8-1967;	M	C-

Anexo A—6: Tabla catastro de eventos meteorológicos (6 de 7).

Eventos Meteorológicos										
ID	Fecha	Condición Meteorológica	Consecuencias	Precipitación (mm)	Descripción General	Descripción de daños en Taltal	Observaciones	Fuentes	Intensidad	Certeza
1972M	Febrero 10 de 1972	Lluvia Cordillerana-EN+	Flujo de Barro -		Invierno altiplánico provocó lluvias torrenciales y aluviones en las provincias de Tarapacá, Antofagasta y Atacama. En la Provincia de Antofagasta los caminos interiores se cortaron en varios puntos y la ciudad de Antofagasta quedó con menos de la mitad del suministro de agua potable. El río Salado se desbordó arrasando con los poblados a su paso.	Aluvión de agua y lodo inundó la localidad de Aguas Verdes, obligando la evacuación de sus 50 habitantes. Puso en peligro la captación de agua potable para Taltal y el ferrocarril hacia la Oficina Alemania. Se realizaron obras para desviar el cauce para mantener a salvo la Planta de Bombas y el ferrocarril. Daños en la Carretera Panamericana.	--	BM; DGA; MS 11-2-1972; LN 12-2-1972; OYV; UYL;	SD	C
1973M	Junio 7 a Junio 8 de 1973	Lluvia- Nieve- LN	Deslizamientos - Sin Daños	12 Taltal;	Temporal de lluvia y nieve afecta Antofagasta y Copiapó, causando varios cortes en rutas.	Intensas lluvias y nevada durante la noche. Camino a Paposo interrumpido. Sin daños.	--	BM; DI; MS 9-6-1973; LN 9-6-1973;	B	C-
1975M	Enero 1975	LN+ (EN)	Flujo de Agua - Inundación -		Invierno altiplánico genera inundaciones entre Camiña y Tocopilla.	Se infiere que Taltal no fue afectada.	Taltal no es mencionado en la prensa en relación con este evento.	BM; DGA; MS Enero-1975; OYV; UYL;	SD	I
1976Ma	Enero 24 a Enero 28 de 1976	LN+	Flujo de Agua - Inundación -		Invierno altiplánico llega con fuertes lluvias entre Arica y La Serena. Entre Antofagasta y Salta se destruyó parte de la vía férrea.	Se infiere que Taltal no fue afectada.	Taltal no es mencionado en la prensa en relación con este evento.	BM; DGA; MS 25+29-1-1976; OYV; UYL;	SD	C-
1976Mb	Mayo 27 de 1976	Neblina- LN+	Sin Daños	3,5 Taltal;	Temporales entre Antofagasta y Aysén.	No hubo daños, solo nubosidad parcial y neblina.	--	BM; DGA; MS 28-5-1976; ONE 2001; OYV;	--	C-
1978M	Enero 16 de 1978	Marejadas- EN	Erosión -		Temporal causa fuertes marejadas en las costas del Norte Chile entre Iquique y Valparaíso.	Las marejadas causan daños en rellenos, pasarelas y durmientes en el puerto. Autoridades evacuaron a personas en una hostería y a varios residentes.	--	BM; MS 16-1-1978;	M	C-
1980M	Febrero 20 a Febrero 23 de 1980	Tormenta Eléctrica- LN/EN	Sin Daños		Entre el 20 y 23 de Febrero una tormenta eléctrica se extendió entre Calama y Puyehue dejando varias zonas del país afectadas. Damnificados en Calama y La Serena.	Se infiere que Taltal no fue afectada.	Taltal no es mencionado en la prensa en relación con este evento.	BM; MS Febrero-1980; UYL;	SD	I-
1982M	Mayo 1982	Lluvia- Viento- EN++	Sin Daños		Lluvias y viento de hasta 120 km/h con intensas nevazones afectaron Antofagasta, Calama, Chuquicamata y poblados del interior.	Se infiere que Taltal no fue afectada.	Taltal no es mencionado en la prensa en relación con este evento.	BM; MS Mayo-1982; ONE 2001; OYV;	SD	I-
1983M	Julio 1 de 1983	Lluvia- EN	Inundación -		Lluvias causadas por un frente de mal tiempo entre Iquique y La Serena.	Precipitaciones en Taltal, varias personas afectadas.	--	BM; MS 2-7-1983;	B	I
1987M	Julio 25 de 1987	Lluvia- Marejadas- EN	Flujo de Barro - Inundación - Erosión -	54,5 Taltal; 45,5 Sierra Overa; 49,7 Vaquillas;	Temporales del mes de Julio en la zona central se extienden hacia el norte provocando lluvias entre Antofagasta y La Serena.	Fuertes lluvias anegaron calles y obligaron el cierre del puerto. Zozobraron dos embarcaciones, causando la desaparición de 4 pescadores. Inundación y aluvión deja 260 familias damnificadas y 300 casas dañadas, 12 embarcaciones aisladas en el mar y 40% del puerto anegado.	--	BM; DI; DGA; MS 26-7-1987; ONE 2001; SNGM 2016; V;	F	C
1991M	Junio 17 a Junio 18 de 1991	Lluvia- EN	Flujo de Barro -	35,5 Taltal; 33,6 Aguas Verdes	Temporales entre Antofagasta y Rancagua. Daños más graves en Antofagasta por flujos de barro y detritos desencadenados durante la madrugada del 18 de Junio, fue similar en Chañaral.	En Taltal hubo lluvias intensas que provocaron un aluvión de agua y barro con graves consecuencias.	--	BM; DI; DGA; ONE 1991; OYV; UYL; V;	F	I

Anexo A—7: Tabla catastro de eventos meteorológicos (7 de 7).

Eventos Meteorológicos										
ID	Fecha	Condición Meteorológica	Consecuencias	Precipitación (mm)	Descripción General	Descripción de daños en Taltal	Observaciones	Fuentes	Intensidad	Certeza
1992Ma	Mayo 27 a Mayo 28 de 1992	Lluvia- EN	Flujo de Agua -	21,5 Taltal; 2 Aguas Verdes	Temporal de lluvia se desplaza desde la zona central al norte del país, causando precipitaciones entre Iquique y Copiapó, dejando cerca de 20 mil damnificados en Calama, Copiapó, Antofagasta y Arica.	En Taltal comenzó a llover desde las 19 horas del día 27, hasta la mañana del 28. El acceso a la Ruta 5 fue restringido para vehículos pesados. Hubo 4 damnificados.	--	BM; DGA; MS 20+30-5-1992;	M	C
1992Mb	Junio 4 a Junio 6 de 1992	Lluvia- Nieve- EN	Sin Daños		Lluvia y Nevada en Calama, varias personas extraviadas en la nieve.	Se infiere que Taltal no fue afectada.	Taltal no es mencionado en la prensa en relación con este evento.	BM; MS 5+7-6-1992;	SD	I
1995M	Mayo 19 de 1995	Lluvia- Viento- Tormenta Eléctrica- EN	Inundación -	0,3 Taltal;	Tormenta eléctrica intermitente entre Iquique y Copiapó genera lluvias en Copiapó, Taltal, Diego de Almagro e Iquique.	Fuerte lluvia durante la noche del 19, acompañada de truenos y relámpagos. Los fuertes vientos y la llovizna anegaron 8 casas de material ligero en la zona alta de la ciudad. 32 damnificados.	Daños ocasionados principalmente por el viento	BM; DI; MS 20-5-1995;	M	C
1999M	Junio 28 de 1999	Lluvia- LN	Inundación - Deslizamientos -	11 Taltal; 6,5 Aguas Verdes	Frente de mal tiempo en la zona central, causa precipitaciones entre Taltal y Linares, mayores daños en Santiago. Mayores daños en Paposó, al norte de Taltal.	Derrumbes en el camino entre Taltal y Paposó dejan aislado el poblado de Paposó, afectado por un aluvión.	--	BM; DI; DGA; MS 29+30-6-1999;	B	C-
2000M	Mayo 31 a Junio 2 de 2000	Lluvia- LN	Inundación - Deslizamientos -	43,5 Taltal; 0,5 Aguas Verdes	Frente de mal tiempo afectó Antofagasta, Tocopilla y Taltal causando anegamientos.	Cerca de 100 viviendas anegadas, cierre del puerto, caminos cortados, 26 evacuados. Camino a Paposó cortado por un rodado.	--	BM; DI; DGA; MS 2+3-6-2000; ONE 2000;	M	C
2003M	Junio 1 a Junio 1 de 2003	Lluvia- Viento- EN		0,5 Taltal;	--	Ocho familias damnificadas, daños a viviendas de material ligero ubicadas en la parte alta de la ciudad. Cortes parciales de electricidad.	Daños fueron ocasionados por el viento	BM; DI; DGA; MS 3-6-2003;	B	C-
2005Ma	Abril de 2005	Lluvia- EN		0,7 Taltal; 24 Aguas Verdes	--	--	--	BM; DGA;	SD	I-
2005Mb	Julio 14 a Julio 15 de 2005	Lluvia- LN/EN	Flujo de Barro -	1,3 Taltal;	Una serie de 10 frentes de mal tiempo afecta desde Antofagasta hasta Coyhaique, el último frente, formando un núcleo frío en altura, genera precipitaciones desde Taltal a Copiapó y en la Cordillera.	En Taltal hubo 15 familias damnificadas y 50 aisladas. Corte del camino entre Taltal y Paposó. Lluvias provocaron deslizamientos de tierra en distintos sectores, dejando varias localidades aisladas, 250 familias afectadas.	Paposó se considera parte de la comuna de Taltal	BM; DI; EMOL 15-7-2005; ONE 2005;	M	C
2006M	Agosto de 2006	Lluvia- EN		0,5 Taltal; 31 Aguas Verdes	--	--	--	BM; DGA; ONE 2011;	SD	I-
2011M	Julio 8 a Julio 11 de 2011	Lluvia- LN	Inundación - Deslizamientos -	22 Taltal; 25 Aguas Verdes	Frente de mal tiempo y núcleo frío en altura, generan precipitaciones desde Arica a Copiapó y nieve en la Cordillera. Cerca de 60.000 damnificados.	En Taltal se registran chubascos aislados el día 8, 16 personas damnificadas, 4 casas con daños graves, 200 casas con daños menores, cortes en comunicación. Cortes en Ruta 1, Paposó, km 6, salida Taltal y Ruta B-710 desde cruce con Ruta 5 con tránsito suspendido por desprendimiento de rocas y barro.	--	BM; DGA; EMOL 31-7-2011; ONE 2015; OYV; SNGM 2015;	M	C
2015Ma	Marzo 24 a Marzo 25 de 2015	Lluvia Cordillerana- EN	Flujo de Barro -	30 Taltal; 85,5 Aguas Verdes	Frente de núcleo frío en altura, genera precipitaciones en toda la región, especialmente en la alta cordillera, generando aluviones en Antofagasta, Taltal, Chañaral, Copiapó, Vallenar y Coquimbo.	Tres aluviones afectaron la zona urbana de Taltal. Los flujos fueron encausados por las calles: Zañartu, Progreso (Eusebio Lillo), Bilbao, O´ Higgins, Atacama, Riquelme, Matta y Esmeralda. El aluvión movilizó escombros, bloques de roca y cemento, se observaron postes destruidos e inclinados en la dirección del flujo y un Camión fue arrastrado por el flujo.	--	BM; C 2015; DGA; MS 25+26+27+28+29+30-3-2015;	MF	C
2015Mb	Agosto 9 de 2015	Marejadas- EN	Deslizamientos - Erosión -	3 Taltal; 3 Aguas Verdes	--	Socavón provocado por marejadas en el Km 25 del camino a Paposó	--	BM; SNGM 2016;	B	I

Anexo A—8: Tabla catastro de terremotos y tsunamis (1 de 7).

Terremotos y Tsunamis											
ID	Fecha	Hora	Evento	Magnitud	Ubicación	Descripción General	Descripción Local	Observaciones	Intensidad	Certeza	Fuentes
1819EQ	11 de Abril de 1819	10:00	Terremoto	8,3Ms	Copiapó (27,4°S-70,4°W)	Los días 3, 4 y 11 de Abril hubo tres terremotos cada uno más fuerte que el anterior. Derribarón una iglesia, la cárcel, la casa municipal, casas y edificios en Copiapó.	--	Taltal aún no se fundaba como ciudad o puerto.	--	I	B; CO; G; LO; T; UYL; CSN;
1819TSU	11 de Abril de 1819	10:00	Tsunami	2Mt	Copiapó	El terremoto del día 11, también ocasionó un tsunami que ocasionó daños desde Caldera hasta Constitución.	--	Taltal aún no se fundaba como ciudad o puerto.	--	I	LK; LO; T; UYL; SHOA;
1822EQ	5 de Noviembre de 1822	22:30	Terremoto	8,5Ms	Copiapó	Fuerte temblor en Copiapó que dejó la ciudad casi destruida. Fue sentido en Coquimbo.	--	Taltal aún no se fundaba como ciudad o puerto.	--	I	G; LO; T; UYL; CSN;
1836EQ	3 de Julio de 1836	--	Terremoto	7,1Ms	Cobija	Terremoto que afectó principalmente a Cobija y generó un pequeño tsunami.	--	Taltal aún no se fundaba como ciudad o puerto.	--	I-	CYP; G; T;
1836TSU	3 de Julio de 1836	--	Tsunami	1Mt	Cobija Mejillones	Temblor afectó principalmente a Cobija, generando un pequeño tsunami.	--	Taltal aún no se fundaba como ciudad o puerto.	--	I	B; CYP; G; LO; T;
1844EQ	18 de Octubre de 1844	--	Terremoto	--	Antofagasta Salta	--	--	Taltal aún no se fundaba como ciudad o puerto.	--	I-	B;
1847EQ	19 de Enero de 1847	--	Terremoto	--	Copiapó	Fuerte temblor en Copiapó causó el derrumbe de varias casas y daños en otras.	Sismo destruyó la ciudad.	Mencionado en prensa de 1966	--	I	B; G; T; UYL; MV 29-12-1966;
1851EQ	26 de Mayo de 1851	13:14	Terremoto	7,2Ms	Copiapó	Fuerte temblor entre Copiapó, Huasco, Freirina y Vallenar.	--	Taltal aún no se fundaba como ciudad o puerto.	--	I	B; G; LK; LO; T; UYL;
1851TSU	26 de Mayo de 1851	0:00	Tsunami	1,6Mt	Copiapó	Temblor fue acompañado por un tsunami en Caldera y Huasco.	--	Taltal aún no se fundaba como ciudad o puerto.	--	I	B; G; LK; LO; RM; T; UYL; SHOA;
1859EQ	5 de Octubre de 1859	8:00	Terremoto	7,6Ms	Copiapó (27,4°S-70,4°W)	Daños graves en Copiapó y valle del Huasco. Más de 200 casas desplomadas, varias víctimas, grietas en la tierra, vías férreas deformadas o desniveladas.	Por la magnitud de este evento y la distancia a Taltal, se infiere que pudo haber algunos daños menores.	En este año la ciudad apenas comenzaba a construirse.	B	I	CO; G; LO; RM; T; MV 8+10-10-1859; CSN;
1859TSU	5 de Octubre de 1859	8:00	Tsunami	2,5Mt	Caldera	Graves daños por tsunami en Caldera.	Se infiere que hubo daños similares o menores a los causados en Caldera.	El primer muelle de la ciudad se construye en 1862.	M	I	G; LK; LO; RM; T; SHOA;
1868EQ	13 de Agosto de 1868	16:45	Terremoto	8,8Ms	Arica (18,5°S-70,4°W)	Fuerte terremoto entre Ica, Perú hasta Tarapacá, Chile. Fue sentido entre Guayaquil, Valparaíso y La Paz. Produjo daños en Arica, Iquique y Pisagua. En Mejillones se sintió muy fuerte pero no causó grandes daños. En Copiapó se sintió como ondas suaves e intensas, presentando dificultad para permanecer de pie, pero sin derrumbar edificios.	Se infiere que los efectos fueron similares a los de Copiapó.	--	B	I	B; CO; CYP; G; LO; RM; UYL; MV 16+19+21-8-1868; CSN;

Anexo A—9: Tabla catastro de terremotos y tsunamis (2 de 7).

Terremotos y Tsunamis											
ID	Fecha	Hora	Evento	Magnitud	Ubicación	Descripción General	Descripción Local	Observaciones	Intensidad	Certeza	Fuentes
1868TSU	13 de Agosto de 1868	16:45	Tsunami	4,3Mt	Arica	Sismo produjo un tsunami en toda la costa del Pacífico hasta Chiloé, la ola llegó a Nueva Zelanda y Oceanía. Produjo daños graves en Arica, Iquique, Pisagua y Mejillones. En Caldera, Carrizal y Coquimbo hubo daños en muelles y embarcaciones. Cobija, Tocopilla y Paquica sufrieron daños menores. En Caldera arrasó con el Muelle y hacía el sur las ciudades costeras también sufrieron daños de distinta consideración.	Es posible inferir que en Taltal hubo un tsunami de mediana intensidad, con base en las descripciones de Caldera y Talcahuano.	En esta fecha Taltal ya se encontraba calificado como puerto habilitado y contaba con un muelle.	M	I	B; CYP; G; LK; LO; RM; T; UYL; MV 16+19+21-8-1868; CSN; SHOA;
1869EQa	24 de Agosto de 1869	13:30	Terremoto	7,8Ms	Arica Pica (19,6°S-70,2°W)	Terremoto en el sur de Perú y Norte de Chile. Se sintió entre Arequipa y Coquimbo, pero el mayor daño fue en Arica y Pica, generando un tsunami menor. En Copiapó solo se sintió un sismo leve.	Se infiere que en Taltal hubo efectos similares a los de Copiapó.	--	SD	I	B; CYP; LO; T; MV 28-08-1869; CSN;
1869TSU	24 de Agosto de 1869	13:30	Tsunami	1Mt	Arica, Pisagua e Iquique	Tsunami generado por terremoto que afectó el sur de Perú y Norte de Chile. Afectó principalmente Arica, Pisagua e Iquique.	No afecta Caldera, por lo que se infiere que tampoco afectó a Taltal.	--	SD	I	B; CYP; G; LK; T;
1869EQb	24 de Octubre de 1869	--	Terremoto	7,8Ms	Cobija Mejillones	--	--	Posible fecha errada.	--	I-	B; T;
1870EQ	22 de Abril de 1870	--	Terremoto	7,5Ms	Calama	Fuerte temblor causó daños en Calama y destruyó parte de Arica. Se sintió en el desierto de Atacama entre Arica y Caldera.	Se infiere que en Taltal se sintió con fuerza, pero sin causar daños o con daños muy leves.	--	B	I	CYP; G; T; UYL; MV 27+29-04-1870;
1871EQa	5 de Octubre de 1871	5:00	Terremoto	7,5Ms	Iquique (20,2°S-70,2°W)	Se sintió entre Lima y Copiapó, causando mucho daño en Iquique.	No se tiene descripción sobre Taltal, pero se infiere que debe haberse sentido el temblor sin causar daños.	--	SD	I	B; CYP; G; LK; LO; T; MV 20-10-1871; CSN;
1871EQb	22 de Octubre de 1871	--	Terremoto	--	Antofagasta Jujuy	--	Posible fecha errada.	--	--	I-	B;
1876EQ	26 de Octubre de 1876	10:00	Terremoto	--		Sismo deja perjuicios en Oficinas Salitreras, se sintió hasta Cobija y Caracoles	--	--	--	I-	CYP; G; T;
1877EQ	9 de Mayo de 1877	21:26	Terremoto	8,8Ms	Pisagua (20,2°S-70,2°W)	Terremoto causó daños entre Arica y Copiapó. Fue sentido hasta Valparaíso. Arica, Iquique, Pisagua, Cobija y Antofagasta sufrieron daños por el sismo. En Antofagasta el movimiento impidió que la gente se mantuviera de pie, las casas oscilaron y las mercaderías se cayeron.	En Taltal no hubo daños a causa del sismo, pero se generó un incendio como consecuencia.	--	SD	C	B; CYP; G; LO; RM; T; UYL; MV 10+11+14+15-05-1877; CSN;
1877TSU	9 de Mayo de 1877	22:26	Tsunami	4,6Mt	Pisagua	Sismo genera maremoto que causa daños entre Arica y Constitución. Arica, Iquique, Tocopilla, Cobija, Antofagasta, Mejillones y Chañaral sufrieron graves daños por el tsunami. En Constitución, Talcahuano, Tomé y Penco el mar salió causando daños a muelles y embarcaciones.	Sobre Taltal sólo se sabe que hubo varias personas ahogadas. Teniendo en cuenta también, los maremotos ocurridos en Antofagasta y Chañaral, se infiere que en Taltal hubo un tsunami fuerte.	--	F	C-	CYP; G; LK; LO; RM; T; UYL; MV 10+11+14+15-05-1877; CSN; SHOA;
1895TSU	4 de Junio de 1895	--	Tsunami	--	Chañaral	Salida del mar en Chañaral y Coquimbo en horas de la mañana.	Causas desconocidas, no se menciona este fenómeno para Taltal.	No hay registro de sismos para esta fecha (Greve, 1964)	--	--	MV 3-6-1895; LD 4+6-06-1895;

Anexo A—10: Tabla catastro de terremotos y tsunamis (3 de 7).

Terremotos y Tsunamis											
ID	Fecha	Hora	Evento	Magnitud	Ubicación	Descripción General	Descripción Local	Observaciones	Intensidad	Certeza	Fuentes
1908EQ	23 de Febrero de 1908	--	Terremoto	--	Antofagasta	Temblor causó averías (IV) en Antofagasta	--	--	--	I-	B; G; T;
1909EQ	8 de Junio de 1909	1:00	Terremoto	7,6Ms	Chañaral (26,5°S-70,5°W)	Temblor en Copiapó causó daños y la muerte de una persona. Dejó daños en Chañaral, El Inca y Copiapó. Se sintió entre Antofagasta y Valparaíso.	En Taltal el sismo fue fuerte, ocasionando alarma y quebrando platos, en las oficinas hubo derrumbes en los relaves.	Mencionado en prensa de 1966	M	C	B; CO; G; LK; T; UYL; MS 29-12-1966; MN 08-06-1909; CSN;
1913EQ	27 de Mayo de 1913	8:10	Terremoto	7,3Ms	Iquique	Temblor local de dos minutos de duración.	Daños en casas particulares y comerciales.	No se menciona en la prensa local ni nacional.	M	C-	UYL; MS 29-12-1966;
1916EQ	25 de Agosto de 1916	--	Terremoto	--		Sismos entre Iquique y Antofagasta, se siente en la pampa. Genera caída de vidrios y botellas en Tocopilla. Rodados en los cerros cercanos a la vía férrea. Un muerto y cuatro heridos en Gatico. También se sienten en Copiapó y La Serena con menor intensidad.	Es posible inferir que este sismo se sintió con fuerza en Taltal	--	SD	I	UYL; MS 26-08-1916; MA 26-08-1916;
1918EQa	20 de Mayo de 1918	12:57	Terremoto	7,9Ms	Vallenar (28,5°S-71,5°W)	Sismo con epicentro en el Valle del Elqui y IX grados de intensidad. Generó daños en La Serena, Ovalle, Vicuña y Copiapó.	Temblor se sintió en Taltal, sin causar daños	--	SD	C	CO; G; LO; T; UYL; MS 21-05-1918; MA 22-05-1918; VP 20-05-1918; CSN;
1918EQb	4 de Diciembre de 1918	7:52	Terremoto	8,2Ms	Chañaral (26°S-71°W)	Terremoto muy destructivo en Copiapó y Caldera. También causó daños en Taltal, La Serena y Vallenar.	En Taltal se reventó uno de los estanques de petróleo de la "Union Oil Company", dejando cinco muertos y decenas de heridos. El contenido fue precipitado al mar y arrasó la casa del cuidador. Corte de un puente en el Km 14 impide tráfico de trenes, cortes en las líneas telegráficas y de electricidad.	--	F	C	CO; G; LO; RM; T; UYL; VP 5+6-12-1918; CSN;
1918TSU	4 de Diciembre de 1918	7:52	Tsunami	2,3Mt	Chañaral	El terremoto fue acompañado de un Tsunami con mayor efecto en Caldera.	Prensa local descarta maremoto.	--	SD	C	CO; LK; LO; T; UYL; VP 5+6-12-1919; CSN; SHOA;
1922EQ	10 de Noviembre de 1922	23:53	Terremoto	8,39Ms; 8,5Mw	Vallenar (28,5°S-70°W)	Fuerte terremoto entre Vallenar y Coquimbo. Se sintió entre Antofagasta, Santiago y Buenos Aires. El epicentro se ubicó entre los valles Elqui y Choapa. Causó daños en Copiapó, Tierra Amarilla, Caldera, Vallenar, Freirina, La Serena y Vicuña.	Taltal se encuentra en el límite de la zona de ruptura según Comte <i>et al.</i> 2002, el temblor se sintió fuerte y causó alarma, pero no causó daños mayores. Caída de algunas murallas.	Mencionado en prensa de 1966	M	C	B; CO; CYP; G; LO; T; UYL; MS 29-12-1966; VP 11+12+14-11-1922; CSN;
1922TSU	10 de Noviembre de 1922	23:55	Tsunami	3,2Mt	Vallenar	Terremoto genera tsunami entre Antofagasta y Los Vilos. Causando daños en Antofagasta, Taltal, Caldera, Chañaral, Huasco, Coquimbo, Tongoy y Los Vilos.	En Taltal el tsunami llegó 20 a 30 minutos después del sismo, se llevó ocho botes y causó perjuicios de menor consideración.	--	M	C	BO; G; LK; LO; T; UYL; VP 11+12+14-11-1923; CSN; SHOA;
1924EQa	28 de Enero de 1924	21:15	Terremoto	--		Sismo entre Antofagasta y Tinguiririca. Caída de murallas en Copiapó, dejando una persona herida y desplome de algunas casas en Vallenar.	Fuerte temblor causa alarma en la población, sin daños.	Mencionado en prensa de 1966	SD	C	UYL; MS 29-12-1966; VP 29-01-1924;
1924EQb	20 de Octubre de 1924	3:57	Terremoto	--		Fuerte temblor, se sintió entre Taltal y Santiago.	--	--	SD	C-	G;
1925EQ	15 de Mayo de 1925	7:18	Terremoto	7,1Ms	Chañaral (26°S-71°W)	Sismo sacude Chañaral, Caldera y Copiapó. Derrumbe de casas en Caldera. Edificios agrietados en Chañaral. Caída de murallas en Copiapó.	Sismo se sintió con fuerza en Taltal, causando alarma. Movimientos forman grietas en calles y jardines, como caída de rocas de los cerros circundantes hacia las casas. Varios muros agrietados en peligro de derrumbarse.	Mencionado en prensa de 1966	F	C	CO; G; LK; UYL; MS 16-05-1925 y 29-12-1966; VP 15-05-1925; CSN;

Anexo A–11: Tabla catastro de terremotos y tsunamis (4 de 7).

Terremotos y Tsunamis											
ID	Fecha	Hora	Evento	Magnitud	Ubicación	Descripción General	Descripción Local	Observaciones	Intensidad	Certeza	Fuentes
1929TSU	9 de Agosto de 1929	--	Tsunami	2Mt	Antofagasta	Fuerte temblor en Iquique y Pampa Unión, derrumbes de casas dejan un muerto y nueve heridos.	En Taltal el sismo fue fuerte y causó alarma, pero no causó daños.	--	SD	I-	LK; MS 20-10-1929;
1930EQ	23 de Septiembre de 1930	23:34	Terremoto	6,5Ms	Chañaral	--	--	No se menciona en la prensa local ni nacional.	--	I-	CO;
1933EQ	23 de Febrero de 1933	8:09	Terremoto	7,6Ms	Iquique (20°S-71°W)	Sismo que afectó principalmente a Iquique y fue sentido entre Arica y Vallenar.	Se infiere que no fue afectado.	Taltal no es mencionado en la prensa	SD	I	CYP; G; UYL; MS 23+24-02-1933; CSN;
1935EQ	13 de Febrero de 1935	17:22	Terremoto	6,5Ms	Taltal	--	Fuerte temblor causa alarma, sin daños.	--	SD	C	CO; VP 13-02-1935;
1936EQ	13 de Julio de 1936	7:15	Terremoto	7,3Ms	Antofagasta (24,5°S-70°W)	Sismo ocasionó daños importantes en Taltal y daños menores en Antofagasta, Copiapó, Vallenar, Chañaral y Coquimbo.	Afectó a Taltal y a las oficinas de Santa Luisa y Flor de Chile. En Flor de Chile hubo derrumbes y en Santa Luisa fue destruido el campamento y las casas recién construidas. En Taltal hubo destrozos en el 80% de las casas, se rompieron los estanques y las cañerías de agua potable, se cayó gran parte de la postación y tendido del telégrafo. Hubo serios destrozos en el liceo de hombres, la gobernación, el correo, el cementerio, algunas iglesias y las plazas. Ley N°5933 concede fondos para la reparación de edificios públicos y auxiliar a los damnificados de Taltal. También hubo una muerte y una decena de heridos. Cortes en caminos por caídas de piedras.	Mencionado en prensa de 1966	MF	C	CA; G; UYL; MS 14+15-07-1936 y 29-12-1966; EP 17+20-07-1936; LR 13-07-1936; CSN;
1936TSU	13 de Julio de 1936	--	Tsunami	0,5Mt		--	Oscilaciones marcadas en el oleaje se produjeron antes del sismo, alertando a pescadores y a personas para evacuar. No hubo daños por el oleaje.	--	SD	C	LK; MS 14-07-1936;
1937EQa	12 de Octubre de 1937	17:53	Terremoto	6,5Ms	Paposo	--	Fuerte temblor (VIII)	Mencionado en prensa de 1966	F	C-	CO; G; MS 29-12-1966;
1937EQb	1 de Noviembre de 1937	8:35	Terremoto	6Ms	Paposo	--	--	--	M	I	CO;
1937EQc	11 de Diciembre de 1937	23:03	Terremoto	6Ms	Paposo (25°S-70°W)	--	--	--	M	I-	CO; G;
1939EQ	18 de Abril de 1939	2:22	Terremoto	7,4Ms	Caldera (27°S-70°W)	Fuerte temblor dejó varias casas arruinadas en Copiapó	Temblor causa alarma en la población, pero no hay daños que lamentar.	Mencionado en prensa de 1966	SD	C	CO; G; UYL; MS 19-04-1939 y 29-12-1966;
1942EQ	8 de Julio de 1942	1:52	Terremoto	7Ms	Antofagasta (24°S-70°W)	--	Grandes temblores, sin daños.	--	SD	C	MS 29-12-1966; EP 09-07-1942; CSN;
1944EQ	22 de Diciembre de 1944	22:31	Terremoto	6,5Ms	Paposo	--	Temblor provoca rodados en la quebrada San Ramón, provocando la muerte de una persona.	Mencionado en prensa de 1966	M	C	CO; EP 27-12-1944;

Anexo A–12: Tabla catastro de terremotos y tsunamis (5 de 7).

Terremotos y Tsunamis											
ID	Fecha	Hora	Evento	Magnitud	Ubicación	Descripción General	Descripción Local	Observaciones	Intensidad	Certeza	Fuentes
1946TSU	1 de Abril de 1946	--	Tsunami	--		Maremoto de Unimak en Islas Aleutianas alcanza las costas chilenas dejando daños en algunos puertos.	No se observan cambios en la marea de Taltal.	--	SD	C	UYL; MS 03-04-1946; EP 03-04-1946;
1946EQ	2 de Agosto de 1946	12:25	Terremoto	7,9Ms	Chañaral (26,5°S-70,5°W)	Sismo en Copiapó se siente hasta Antofagasta. Deja dos muertos y algunos heridos por caída de murallas, daños en iglesia, hospital, comisaría, cuartel del regimiento, casas y negocios.	Temblor no causó daños a viviendas ni hubo heridos. Derrumbes en mina Emma Luisa y Mineral de Guanaco.	--	SD	C	CO; G; LK; UYL; MS 3+4-08-1946; EP 07-08-1946; CSN;
1947EQa	21 de Enero de 1947	20:06	Terremoto	7Ms	Paposo	--	--	--	F	I	CO;
1947EQb	29 de Julio de 1947	--	Terremoto	7Ms	Cobija	--	--	--	SD	I-	CYP;
1952TSU	5 de Mayo de 1952	8:50	Tsunami	--		Un terremoto en la península de Kamchatka a las 16:58 UTM del día anterior generó un tsunami que fue propagado por el Océano Pacífico y que llegó a las costas chilenas con olas de 3,6m. En Antofagasta una lancha gasolinera fue destruida por las olas y el agua avanzó playa adentro.	--	--	SD	I	LK;
1955TSU	12 de Abril de 1955	16:25	Tsunami	1Mt	(30°S-72°W)	Terremoto submarino frente a Coquimbo produjo una ola en Caldera, Coquimbo y Tongoy.	--	--	SD	I	UYL; MS 06-05-1952;
1955EQ	17 de Noviembre de 1955	6:53	Terremoto	6,8Ms	Chañaral	--	Posible fecha errada	--	B	I-	G; LK;
1956EQ	17 de Diciembre de 1956	22:31	Terremoto	7Ms	Taltal (25,5°S-68,5°W)	Sismo con epicentro en la cordillera, cerca del límite con Argentina.	Violento temblor causa derrumbes en casas y corte de energía eléctrica. Varios con contusiones y rasmillones.	Mencionado en prensa de 1966	M	C	CO; G; UYL; MS 29-12-1966; VP 19-12-1956; CSN;
1957TSU	9 de Marzo de 1957	11:22	Tsunami	--		Cambio en las mareas por terremoto en las Aleutianas	--	--	SD	C-	MS 10+11-03-1957; CSN;
1957EQ	29 de Julio de 1957	13:15	Terremoto	7Ms	Antofagasta (23,5°S-71,5°W)	--	--	--	B	I	CSN;
1959EQ	28 de Noviembre de 1959	12:34	Terremoto	6,6Ms	Taltal	--	--	--	M	I	CO;
1965EQ	23 de Febrero de 1965	18:11	Terremoto	7Ms	Taltal (25,7°S-70,6°W)	--	--	--	M	I-	CSN;

Anexo A-13: Tabla catastro de terremotos y tsunamis (6 de 7).

Terremotos y Tsunamis											
ID	Fecha	Hora	Evento	Magnitud	Ubicación	Descripción General	Descripción Local	Observaciones	Intensidad	Certeza	Fuentes
1966EQ	28 de Diciembre de 1966	4:18	Terremoto	7,8Ms	Taltal (25,5°S-70,7°W)	Sismo entre Antofagasta y La Serena con epicentro a 30Km de Taltal, en Flor de Chile.	Tuvo una Intensidad VIII en la escala de Mercalli. Dejó tres muertos, seis heridos graves y muchos heridos leves. También cientos de familias damnificadas, unas 50 viviendas fueron destruidas, entre ellas: Banco del Estado, la cárcel y las 3 panaderías; también varios edificios en peligro de derrumbarse. Interrupción de los servicios de agua potable, energía eléctrica y telégrafo. Las maquinarias de la prensa local fueron destruidas. Se debieron demoler 42 casas, los edificios del Banco de Estado, del Club de Leones y del teatro. Se registraron deslizamientos en la costa entre Taltal y Paposo, y en tranques de relave de varias minas. La Oficina Flor de Chile también fue gravemente afectada. Rodados de poco volumen en la vía férrea, en la carretera Panamericana y el camino a Antofagasta causan retrasos. Daños graves en la red de alcantarillado de la ciudad.	--	F	C	AL; L; UYL; MS 29+30-12-1966; VP 28-12-1966; CSN;
1966TSU	28 de Diciembre de 1966	4:18	Tsunami	0,5Mt	Taltal	Leve tsunami fue registrado en el mareógrafo de Antofagasta con una amplitud de 45 cm. La amplitud máxima fue de 80 cm en Caldera.	No produjo daños.	--	SD	C	AL; L; LK; MS 29-12-1966; SHOA;
1971EQ	17 de Junio de 1971	17:00	Terremoto	7Ms	Taltal (25,4°S-69°W)	Sismo en Taltal, fue sentido en Antofagasta, Chuquicamata, Calama, Tocopilla, Mejillones, María Elena y Pedro de Valdivia.	Tuvo una intensidad VII en la escala de Mercalli. Epicentro en Catalina, dejó un muerto en el sector de Lomas Bayas, derrumbe de viviendas, desprendimientos en los cerros del camino costero y cortes en las comunicaciones.	--	M	C	RM; UYL; MS 18-06-1971; LN 18-06-1971; CSN; DI;
1976EQ	29 de Noviembre de 1976	21:42	Terremoto	7Ms	Iquique (20,5°S-68,9°W)	Sismo con epicentro en Pozo Almonte, se sintió entre Arica y Taltal	Temblor largo causa pánico en la población, grado V. Sin Daños.	--	B	C	UYL; MS 30-11-1976 y 01-12-1976; CSN; NEIC;
1978EQ	3 de Agosto de 1978	14:11	Terremoto	7Ms	Chañaral	Fuerte sismo se sintió entre Antofagasta y Combarbalá, dando muerte a una persona en Inca de Oro y dejando 7 heridos en Copiapó.	En Taltal se sintió como un sismo de grado VII y tuvo aproximadamente un minuto de duración.	--	M	C	MS 4+5-08-1978; CSN; NEIC;
1983EQa	1 de Febrero de 1983	0:22	Terremoto	5,2Ms	Calama (23,3°S-68,7°W)	Sismo con epicentro en Antofagasta genera marejadas en Mejillones.	Sismo de mediana intensidad, sin daños.	--	--	--	UYL; MS 2+3-02-1983; NEIC;
1983EQb	4 de Octubre de 1983	14:53	Terremoto	7,3Ms	Chañaral (26,5°S-70,6°W)	Sismo con epicentro en la costa entre Chañaral y Copiapó, fue sentido entre Arica y Santiago.	En Taltal fallecieron tres personas por derrumbes en piques mineros de Cachinales y Ema Luisa, en Guanaco. Cinco heridos, cierre de actividad minera por 30 días. Camino a Carrizalillo cortado, familias incomunicadas. Grietas en casas, caída de postes y letreros, deslizamientos de tierra, 67 familias damnificadas y doce viviendas dañadas. Escuela pública, equipos de la radio "José Santos Ossa" y red de agua potable con daños.	--	M	C	UYL; MS 5+6+7-10-19783; CSN; DI; NEIC;
1987EQ	5 de Marzo de 1987	6:17	Terremoto	7,3Ms	Antofagasta (24,4°S-70,1°W)	Fuerte sismo en Antofagasta, con daños en el puerto.	Sismo grado V-VI causa alarma por el gran número de réplicas, sin daños.	--	B	C	MS 6+7-03-1987; CSN; DI; NEIC;

Anexo A–14: Tabla catastro de terremotos y tsunamis (7 de 7).

Terremotos y Tsunamis											
ID	Fecha	Hora	Evento	Magnitud	Ubicación	Descripción General	Descripción Local	Observaciones	Intensidad	Certeza	Fuentes
1993EQ	11 de Julio de 1993	9:36	Terremoto	6,6Mw	Taltal (25,3°S-70,1°W)	Sismo se siente entre Antofagasta y Chañaral.	Sismo con mayor efecto en Taltal generó cortes de luz y teléfono por 15 minutos, desprendimiento de cornisas, sin daños importantes en la ciudad. Desprendimientos de tierra en el Km 30 camino a Paposo (Paso Malo) y en el camino de acceso a la Ruta 5.	--	M	C	MS 12-07-1993; DI; NEIC;
1995EQ	30 de Julio de 1995	1:11	Terremoto	7,3Ms; 8Mw	Antofagasta (23,4°S-70,3°W)	Terremoto causó daños a 120 hogares de Antofagasta, Taltal, Mejillones y Calama.	Se registraron 10 casas agrietadas o con caída de muros. Daños de mediana consideración en la municipalidad y el hospital.	--	M	C	MS 31-07-1995 y 01-08-1995; DI; NEIC; SHOA;
1995TSU	30 de Julio de 1995	1:11	Tsunami	--	Antofagasta	No causó grandes daños en costas chilenas	Variaciones entre 70 cm a 1,5 m, no se emitió alerta de tsunami.	--	B	C	MS 01-08-1995; NEIC; SHOA;
2000EQ	12 de Mayo de 2000	15:43	Terremoto	7,2Mw	Jujuy (23,5°S-66,4°W)	Sismo en Antofagasta, daños a varias rutas.	Rodados en el camino a Paposo.	--	B	C	MS 13-05-2000;
2002EQ	18 de Abril de 2002	12:08	Terremoto	6,6Mw	Copiapó (27,5°S-70,6°W)	Sismo con mayor fuerza en Copiapó, se sintió entre Antofagasta y San Antonio.	En Taltal tuvo una intensidad V a VI en la escala de Mercalli y se reportaron 3 casas dañadas.	--	B	C	ONE2002; MS 18+19-04-2002; NEIC;
2007EQ	14 de Noviembre de 2007	12:40	Terremoto	7,5Ms; 7,7Mw	Tocopilla (22,3°S-70°W)	Sismo con mayor fuerza en Iquique y Tocopilla y que fue sentido entre Tarapacá y Valparaíso.	En Taltal solo se registraron cortes de energía eléctrica. (VI)	--	B	C	ONE2007; MS 15-11-2007; CSN; NEIC;
2014EQ	1 de Abril de 2014	20:46	Terremoto	8,2Mw	Pisagua (19,6°S-70,9°W)	Terremoto afecta Arica, Iquique y Antofagasta, cinco personas fallecidas.	No afectó a Taltal	--	B	C	MS 2+3-04-2014; CSN; NEIC;
2014TSU	1 de Abril de 2014	21:46	Tsunami	--	Pisagua	En Iquique la primera ola fue de 2,3m y entró 200m desde la costa. Se realizó evacuación masiva luego del sismo.	No afectó a Taltal	--	SD	C	MS 2+3-04-2014;

B. Anexo B: Períodos de Retorno

Anexo B—1: Períodos de retorno a partir de los datos de precipitaciones encontrados para Taltal.

Año	PP. Mensual (mm)	PP. máx. diaria	Nº Orden	Ordenada	Pb(ex)	1-Pb(ex)	T
1987	45,5	31	1	35,5	0,03	0,97	30,00
1988		0,5	2	31	0,07	0,93	15,00
1989		1,8	3	30	0,10	0,90	10,00
1990		1	4	21	0,13	0,87	7,50
1991	35,5	35,5	5	19,5	0,17	0,83	6,00
1992	21,5	19,5	6	15,5	0,20	0,80	5,00
1993		1	7	11	0,23	0,77	4,29
1994		0,1	8	10	0,27	0,73	3,75
1995	0,3	2,5	9	6,5	0,30	0,70	3,33
1996		0,5	10	5	0,33	0,67	3,00
1997		6,5	11	4	0,37	0,63	2,73
1998		0,5	12	2,5	0,40	0,60	2,50
1999	6,5	11	13	1,8	0,43	0,57	2,31
2000		21	14	1,5	0,47	0,53	2,14
2001		0,5	15	1,3	0,50	0,50	2,00
2002		10	16	1	0,53	0,47	1,88
2003		0,5	17	1	0,57	0,43	1,76
2004		0,3	18	0,5	0,60	0,40	1,67
2005	2,0	1,3	19	0,5	0,63	0,37	1,58
2006	0,5	0,5	20	0,5	0,67	0,33	1,50
2007		0	21	0,5	0,70	0,30	1,43
2008		0	22	0,5	0,73	0,27	1,36
2009		1,5	23	0,5	0,77	0,23	1,30
2010		4	24	0,3	0,80	0,20	1,25
2011	22,0	15,5	25	0,1	0,83	0,17	1,20
2012		0	26	0	0,87	0,13	1,15
2013		0	27	0	0,90	0,10	1,11
2014		5	28	0	0,93	0,07	1,07
2015	30,0	30	29	0	0,97	0,03	1,03

Anexo B—2: Períodos de retorno a partir de los datos de precipitaciones encontrados para Aguas Verdes.

Año	PP. Mensual (mm)	PP. máx. diaria	Nº Orden	Ordenada	Pb(ex)	%Pb(ex)	T
1987		0,0	1	52,0	0,03	0,97	30,00
1988		0,0	2	33,6	0,07	0,93	15,00
1989		0,0	3	31,0	0,10	0,90	10,00
1990		0,0	4	19,5	0,13	0,87	7,50
1991	33,6	33,6	5	19,5	0,17	0,83	6,00
1992	2,0	2,0	6	10,5	0,20	0,80	5,00
1993		0,0	7	6,5	0,23	0,77	4,29
1994		0,0	8	5,0	0,27	0,73	3,75
1995		0,0	9	5,0	0,30	0,70	3,33
1996		0,0	10	4,0	0,33	0,67	3,00
1997		4,0	11	3,5	0,37	0,63	2,73
1998		3,5	12	2,5	0,40	0,60	2,50
1999	6,5	6,5	13	2,0	0,43	0,57	2,31
2000		2,5	14	1,5	0,47	0,53	2,14
2001		0,0	15	1,0	0,50	0,50	2,00
2002		5,0	16	1,0	0,53	0,47	1,88
2003		0,0	17	0,0	0,57	0,43	1,76
2004		0,0	18	0,0	0,60	0,40	1,67
2005	24,0	19,5	19	0,0	0,63	0,37	1,58
2006	31,0	31,0	20	0,0	0,67	0,33	1,50
2007		1,0	21	0,0	0,70	0,30	1,43
2008		1,0	22	0,0	0,73	0,27	1,36
2009		0,0	23	0,0	0,77	0,23	1,30
2010		5,0	24	0,0	0,80	0,20	1,25
2011	25,0	19,5	25	0,0	0,83	0,17	1,20
2012		10,5	26	0,0	0,87	0,13	1,15
2013		1,5	27		0,90	0,10	1,11
2014		0,0	28		0,93	0,07	1,07
2015	85,5	52,0	29		0,97	0,03	1,03

Anexo B—3: Períodos de retorno a partir de la estimación de intensidad.

Año	Intensidad	Nº Orden	Ordenada	Pb(ex)	1-Pbex	%Pb(ex)	T
1884	1	1	4	0,01	0,99	99,25	133
1885		2	4	0,02	0,98	98,50	67
1886		3	4	0,02	0,98	97,74	44
1887		4	3	0,03	0,97	96,99	33
1888	0	5	3	0,04	0,96	96,24	27
1889		6	3	0,05	0,95	95,49	22
1890		7	2	0,05	0,95	94,74	19
1891		8	2	0,06	0,94	93,98	17
1892		9	2	0,07	0,93	93,23	15
1893		10	2	0,08	0,92	92,48	13
1894		11	2	0,08	0,92	91,73	12
1895	0	12	2	0,09	0,91	90,98	11
1896		13	2	0,10	0,90	90,23	10
1897		14	2	0,11	0,89	89,47	10
1898		15	2	0,11	0,89	88,72	9
1899	0	16	2	0,12	0,88	87,97	8
1900		17	2	0,13	0,87	87,22	8
1901		18	2	0,14	0,86	86,47	7
1902	1	19	2	0,14	0,86	85,71	7
1903		20	1	0,15	0,85	84,96	7
1904		21	1	0,16	0,84	84,21	6
1905		22	1	0,17	0,83	83,46	6
1906	2	23	1	0,17	0,83	82,71	6
1907		24	1	0,18	0,82	81,95	6
1908		25	1	0,19	0,81	81,20	5
1909		26	1	0,20	0,80	80,45	5
1910		27	1	0,20	0,80	79,70	5
1911	0	28	1	0,21	0,79	78,95	5
1912	0	29	1	0,22	0,78	78,20	5
1913	0	30	1	0,23	0,77	77,44	4
1914	0	31	1	0,23	0,77	76,69	4
1915		32	1	0,24	0,76	75,94	4
1916		33	1	0,25	0,75	75,19	4

1917		34	0	0,26	0,74	74,44	4
1918	1	35	0	0,26	0,74	73,68	4
1919	2	36	0	0,27	0,73	72,93	4
1920		37	0	0,28	0,72	72,18	4
1921		38	0	0,29	0,71	71,43	4
1922		39	0	0,29	0,71	70,68	3
1923	0	40	0	0,30	0,70	69,92	3
1924	1	41	0	0,31	0,69	69,17	3
1925	1	42	0	0,32	0,68	68,42	3
1926	1	43	0	0,32	0,68	67,67	3
1927	2	44	0	0,33	0,67	66,92	3
1928	2	45		0,34	0,66	66,17	3
1929	3	46		0,35	0,65	65,41	3
1930	4	47		0,35	0,65	64,66	3
1931	0	48		0,36	0,64	63,91	3
1932	2	49		0,37	0,63	63,16	3
1933		50		0,38	0,62	62,41	3
1934		51		0,38	0,62	61,65	3
1935		52		0,39	0,61	60,90	3
1936		53		0,40	0,60	60,15	3
1937		54		0,41	0,59	59,40	2
1938		55		0,41	0,59	58,65	2
1939		56		0,42	0,58	57,89	2
1940	4	57		0,43	0,57	57,14	2
1941		58		0,44	0,56	56,39	2
1942	2	59		0,44	0,56	55,64	2
1943		60		0,45	0,55	54,89	2
1944		61		0,46	0,54	54,14	2
1945		62		0,47	0,53	53,38	2
1946	1	63		0,47	0,53	52,63	2
1947		64		0,48	0,52	51,88	2
1948	1	65		0,49	0,51	51,13	2
1949		66		0,50	0,50	50,38	2
1950		67		0,50	0,50	49,62	2
1951		68		0,51	0,49	48,87	2
1952		69		0,52	0,48	48,12	2

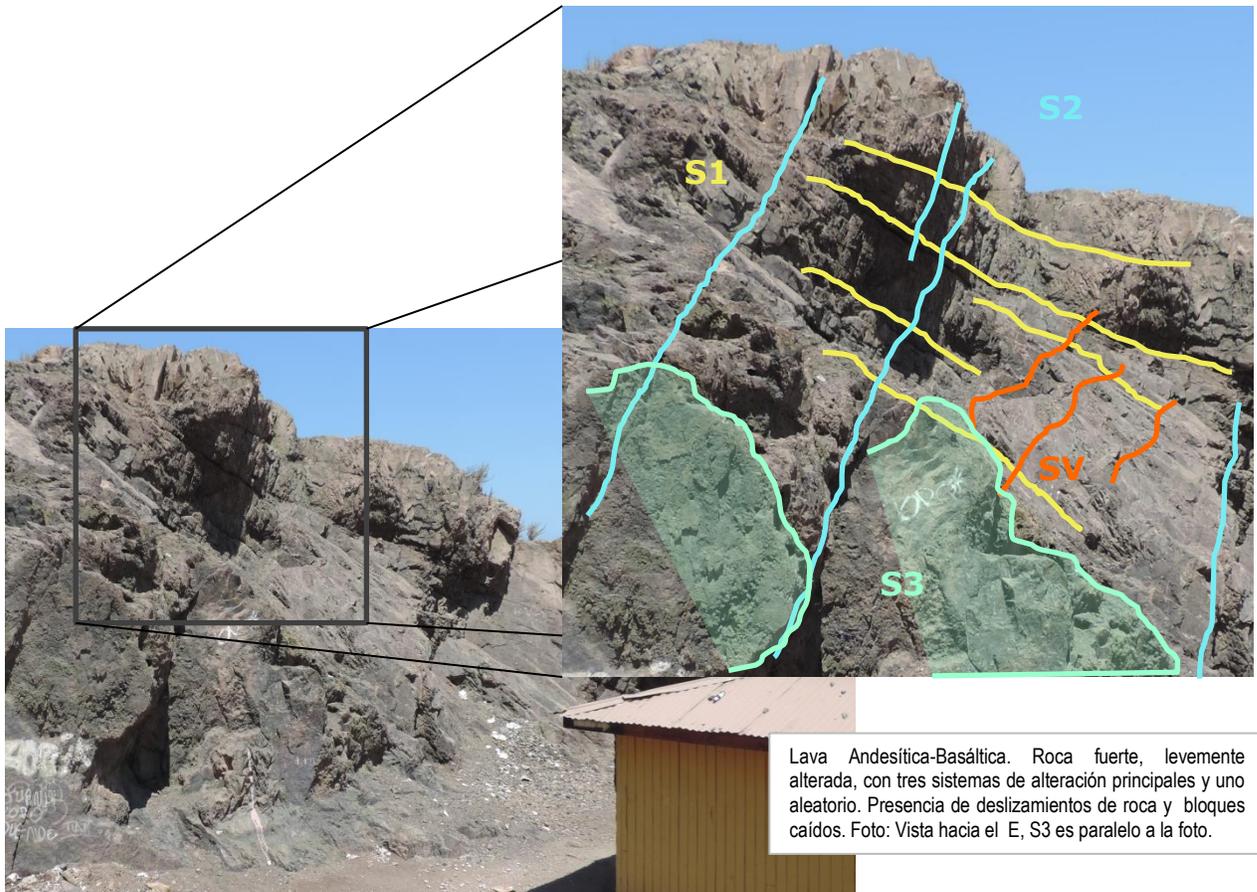
1953		70		0,53	0,47	47,37	2
1954	1	71		0,53	0,47	46,62	2
1955		72		0,54	0,46	45,86	2
1956		73		0,55	0,45	45,11	2
1957		74		0,56	0,44	44,36	2
1958		75		0,56	0,44	43,61	2
1959		76		0,57	0,43	42,86	2
1960		77		0,58	0,42	42,11	2
1961		78		0,59	0,41	41,35	2
1962		79		0,59	0,41	40,60	2
1963		80		0,60	0,40	39,85	2
1964		81		0,61	0,39	39,10	2
1965	1	82		0,62	0,38	38,35	2
1966		83		0,62	0,38	37,59	2
1967	2	84		0,63	0,37	36,84	2
1968		85		0,64	0,36	36,09	2
1969		86		0,65	0,35	35,34	2
1970		87		0,65	0,35	34,59	2
1971		88		0,66	0,34	33,83	2
1972	1	89		0,67	0,33	33,08	1
1973		90		0,68	0,32	32,33	1
1974		91		0,68	0,32	31,58	1
1975		92		0,69	0,31	30,83	1
1976	0	93		0,70	0,30	30,08	1
1977		94		0,71	0,29	29,32	1
1978	2	95		0,71	0,29	28,57	1
1979		96		0,72	0,28	27,82	1
1980		97		0,73	0,27	27,07	1
1981		98		0,74	0,26	26,32	1
1982		99		0,74	0,26	25,56	1
1983	1	100		0,75	0,25	24,81	1
1984		101		0,76	0,24	24,06	1
1985		102		0,77	0,23	23,31	1
1986		103		0,77	0,23	22,56	1
1987	3	104		0,78	0,22	21,80	1
1988		105		0,79	0,21	21,05	1

1989		106		0,80	0,20	20,30	1
1990		107		0,80	0,20	19,55	1
1991	3	108		0,81	0,19	18,80	1
1992	2	109		0,82	0,18	18,05	1
1993		110		0,83	0,17	17,29	1
1994		111		0,83	0,17	16,54	1
1995	2	112		0,84	0,16	15,79	1
1996		113		0,85	0,15	15,04	1
1997		114		0,86	0,14	14,29	1
1998		115		0,86	0,14	13,53	1
1999	1	116		0,87	0,13	12,78	1
2000	2	117		0,88	0,12	12,03	1
2001		118		0,89	0,11	11,28	1
2002		119		0,89	0,11	10,53	1
2003	1	120		0,90	0,10	9,77	1
2004		121		0,91	0,09	9,02	1
2005	2	122		0,92	0,08	8,27	1
2006	0	123		0,92	0,08	7,52	1
2007		124		0,93	0,07	6,77	1
2008		125		0,94	0,06	6,02	1
2009		126		0,95	0,05	5,26	1
2010		127		0,95	0,05	4,51	1
2011	2	128		0,96	0,04	3,76	1
2012		129		0,97	0,03	3,01	1
2013		130		0,98	0,02	2,26	1
2014		131		0,98	0,02	1,50	1
2015	4	132		0,99	0,01	0,75	1

C. Anexo C: Terreno

Anexo C-1: Ventana geotécnica de la Formación La Negra [Jiln(a)].

VALORACION DEL MACIZO ROCOSO (R.M.R.)									
Sector: Calle Esmeralda, Taital		Coordenadas: 2524591N 7029475E			Altura: 7m			2/12/2016	
PARAMETRO		RANGO DE VALORES						VALORACION	
R. COMPRES. UNIAXIAL (Mpa)		>250 (15)	100-250 (12)	50-100 (7)	25-50 (4)	<25(2) <5(1)			7
RQD %		90-100 (20)	75-90 (17)	50-75 (13)	25-50 (8)	<25 (3)			8
ESPACIAMIENTO (m)		>2 (20)	0,6-2 (15)	0,2-0,6 (10)	0,06-0,2 (8)	< 0,06 (5)			20
CONDICION DE JUNTAS	PERSISTENCIA	<1m long. (6)	1-3 m Long. (4)	3-10m (2)	10-20 m (1)	> 20 m (0)			6
	APERTURA	Cerrada (6)	<0.1mm apert. (5)	0.1-1.0mm (4)	1 - 5 mm (1)	> 5 mm (0)			4
	RUGOSIDAD	Muy rugosa (6)	Rugosa (5)	Mod. rugosa (3)	Lisa (1)	Muy lisa (0)			3
	RELLENO	Limpia (6)	Duro < 5mm (4)	Duro > 5mm (2)	Blando < 5 mm (2)	Blando > 5 mm (0)			4
	ALTERACION	Sana (6)	Lev. alterado (5)	Mod. alterado (3)	Alta alteración (1)	Descompuesta (0)			6
AGUA SUBTERRANEA		Seco (15)	Húmedo (10)	Mojado (7)	Goteo (4)	Flujo (0)			15
VALOR TOTAL RMR (Suma de valoración 1 a 5) =									73
CLASE DE MACIZO ROCOSO									
RMR	100 - 81	80 - 61	60 - 41	40 - 21	20 - 0	Clase II			
DESCRIPCION	I MUY BUENA	II BUENA	III REGULAR	IV MALA	V MUY MALA				



D. Anexo D: Estimación de Certeza

Cada evento registrado en el catastro fue revisado para poder realizar una estimación lo más certera posible de la intensidad del evento. Para ello fue necesario evaluar la bondad de los datos asignando un valor de certeza, según la confianza en las fuentes, la calidad de la descripción y la mención del evento por distintos actores. La intensidad de cada evento se asignó según un criterio claramente formulado, ya que con una mejor calidad de información, es posible realizar una mejor estimación, crear un inventario visual de los efectos y facilitar la estimación de la intensidad como de la evaluación de susceptibilidad.

I. Estimación de certeza para terremotos y tsunamis

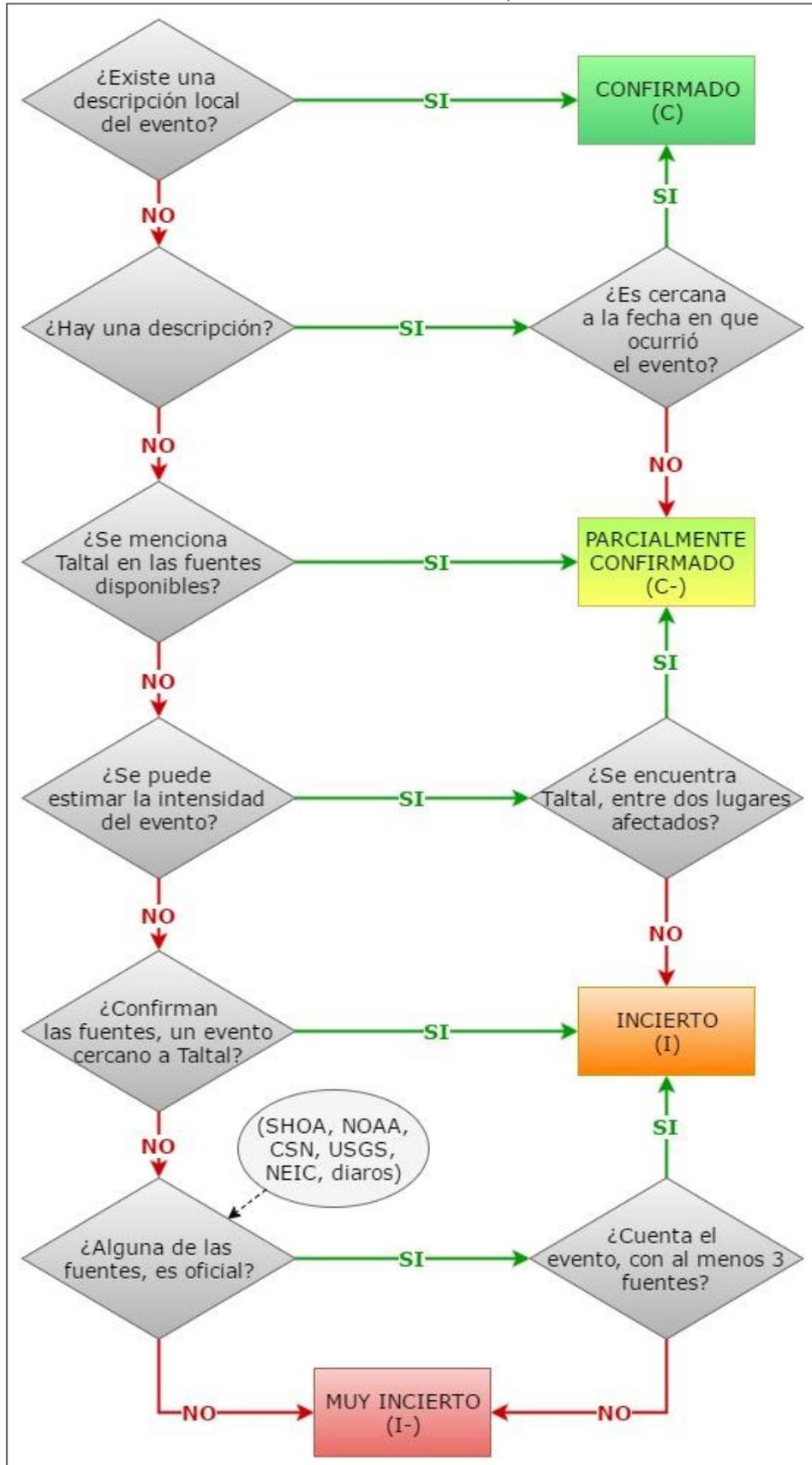
Para estimar el grado de certeza de los eventos gatillados por terremotos, se siguió el diagrama de flujo del Anexo D—1. Como se puede ver, se consideró que un evento se encuentra **confirmado (C)** cuando cuenta con una descripción de los eventos realizada por una fuente directa o por una fuente de primer orden, por ejemplo: un diario de Santiago publica la noticia cuando se comunica con alguna fuente directa de Taltal. Un evento se considera **parcialmente confirmado (C-)** cuando solo se hace mención a la ciudad en una fuente no local o cuando es mencionado de forma posterior, ya sea en el diario local o en otras fuentes.

Un evento se consideró **incierto (I)** cuando Taltal se encuentra entre dos ciudades afectadas por el mismo terremoto, o cuando las fuentes confirmaron un evento importante ocurrido cerca de la ciudad. Aun cuando se puede suponer que el terremoto fue sentido en Taltal, no es posible en estos casos, hacer una estimación del daño. Por ejemplo: han habido terremotos y tsunamis bien descritos que han afectado a Antofagasta y a Copiapó/Caldera, pero que en Taltal no han causado efectos importantes, como también el caso contrario, por lo que no se puede hacer una estimación certera del daño.

Un evento **muy incierto (I-)**, no cuenta con información suficiente para realizar una estimación. Puede ser porque no hay más fuentes que lo confirmen, o porque a pesar de ser una fuente oficial, el evento no cuenta con ninguna descripción.

Anexo D—1: Asignación del grado de certeza para terremotos y tsunamis.

Fuente: Elaboración Propia.



II. ESTIMACIÓN DE CERTEZA PARA EVENTOS METEOROLÓGICOS.

Para los eventos meteorológicos no es tan sencillo realizar un diagrama de flujo, ya que los criterios no son independientes como en el caso de los terremotos, por lo que se ha optado por realizar una asignación de puntajes a los recursos encontrados, dando mayor valor a los criterios que se consideran más valiosos como: registro de precipitaciones, descripciones directas o informes oficiales; puntajes intermedios a: las menciones o descripciones en otras fuentes, fecha de publicación o valor de la descripción; y puntajes bajos, pero que aportan a: las fuentes oficiales (ONEMI, Sernageomin, diarios, DGA, etc.), número de ciudades cercanas afectadas o número de fuentes. En el Anexo D—2 se detallan los criterios y los valores asignados para cada caso.

Anexo D—2: Puntajes para evaluar el grado de certeza de los eventos meteorológicos.

Fuente: Elaboración Propia.

Criterio	Calidad	Puntaje
Descripción	Local	10
	Regional o Nacional	8
	Mención	6
Información Oficial	Informe	10
	Registro de Precipitaciones	6
	Otras Bases de Datos	3
Fecha de la Descripción	Atingente	6
	Posterior	3
Estimación de Intensidad	Directa	6
	Indirecta	3
Entre Dos Localidades Afectadas		1
Localidades Cercanas Afectadas	(Entre Copiapó y Antofagasta)	1 c/u
Número de Fuentes		0,5 c/u

Para cada criterio de la tabla **solo se asignó uno de los puntajes**, según la calidad de la información disponible. **Si el criterio no cumple con ninguna de las cualidades mencionadas, no se asigna puntaje**, es decir, tiene valor cero. El valor mínimo que se puede asignar a un evento es de 2,5 puntos, dónde una sola fuente menciona un evento que afecta a dos localidades y una de ella es cercana a Taltal. El valor máximo que se puede asignar a un evento puede variar desde los 32,5 puntos, aumentando si hay varias localidades cercanas afectadas o según el número de fuentes.

Para crear los cuatro campos de certeza ya utilizados en el caso de los terremotos y tsunamis: confirmado (C), parcialmente confirmado (C-), incierto (I) y muy incierto (I-), se calculó el promedio (μ) y la desviación

estándar (σ) de los puntajes asignados, obteniendo de esta forma, los cuatro campos de una campana de Gauss (Anexo D—3), suponiendo que los puntajes asignados se aproximan a una distribución normal como en la Anexo D—4.

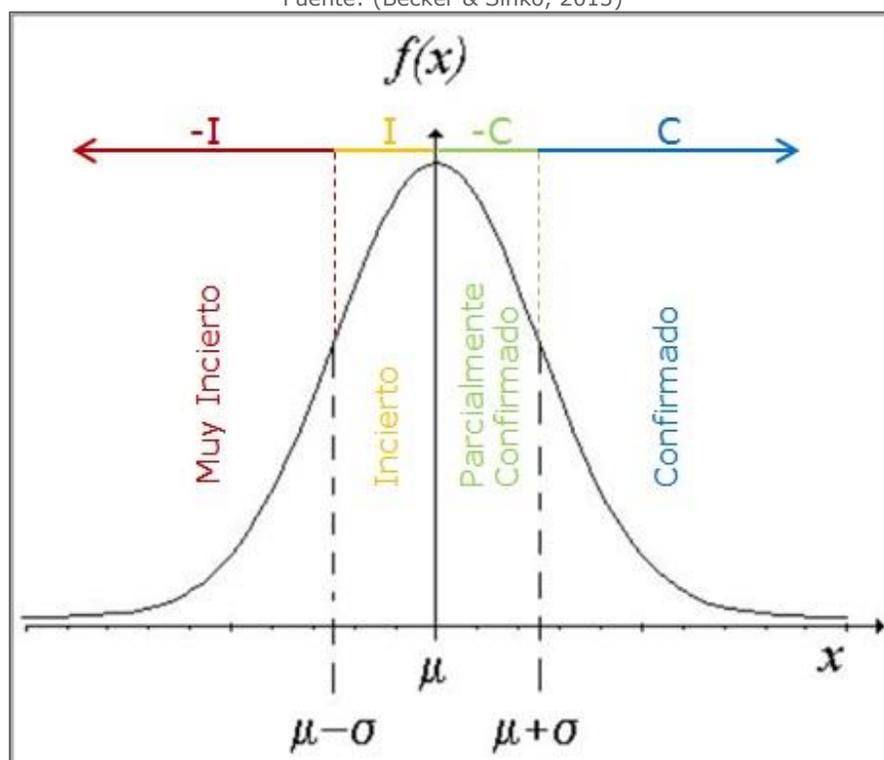
Anexo D—3: Asignación del grado de certeza para eventos meteorológicos.

Fuente: Elaboración Propia.

Clasificación	Sigla	Campo
Confirmado	C	$>\mu+\sigma$
Parcialmente Confirmado	C-	$[\mu, \mu+\sigma]$
Incierto	I	$[\mu-\sigma, \mu]$
Muy Incierto	I-	$<\mu-\sigma$

Anexo D—4: Distribución Normal clásica en forma de campana.

Fuente: (Becker & Sinko, 2013)



III. PUNTAJES ASIGNADOS

Con el fin de poder comparar la calidad de la información de los eventos con distintos tipos de relato se realiza la estimación de certeza descrita en el punto II, que para los 64 eventos meteorológicos registrados se clasificaron 12 eventos como muy inciertos, 14 eventos como inciertos, 30 eventos fueron parcialmente confirmados y 6 eventos fueron confirmados. La media del puntaje asignado fue de 26 y la desviación estándar de 12, por la que los

valores límite de cada clasificación corresponden a los que se presentan en el Anexo D—5. El puntaje máximo asignado fue de 47,5 para el evento de 1930 y el mínimo de 2,5 para los eventos de 1976 y 1827.

Anexo D—5: Asignación del grado de certeza para eventos meteorológicos.

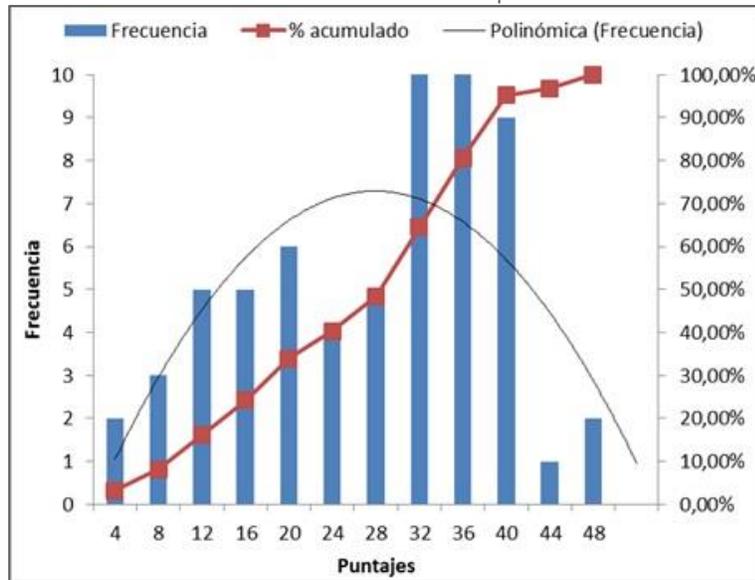
Fuente: Elaboración Propia.

Clasificación	Sigla	Campo	Valor	Número de eventos
Confirmado	C	$>\mu+\sigma$	>38	12
Parcialmente Confirmado	C-	$[\mu, \mu+\sigma]$	$[26,38]$	14
Incierto	I	$[\mu-\sigma, \mu]$	$[14,26]$	30
Muy Incierto	I-	$<\mu-\sigma$	<14	6

Para esta clasificación se consideró que la distribución normal de los datos forma una curva Gaussiana, lo que se ve reflejado en las distribuciones de frecuencia de los puntajes presentados en el Anexo D—6. Es importante notar que la cantidad de datos encontrados hará variar el promedio y la desviación estándar de los puntajes, por lo tanto, también la forma de la curva Gaussiana y los puntajes de corte que definen cada categoría.

Anexo D—6: Histograma de puntajes asignados para la estimación de certeza.

Fuente: Elaboración Propia.



En el caso de los terremotos, la clasificación se realizó con la metodología del punto I. De los 75 eventos reconocidos, se clasificaron 12 como muy inciertos, 23 como inciertos, 5 fueron parcialmente confirmados y 33 fueron confirmados.

E. Anexo E: Clasificación de Intensidades

I. Clasificación de Tsunamis

La definición de las intensidades para tsunamis se realiza según las descripciones de la escala modificada de Sieberg, que se encuentra en el Anexo E—1. La escala de Sieberg es una escala subjetiva que evalúa la percepción del sismo en un determinado lugar.

Anexo E—1: Escala modificada Sieberg de intensidades de Tsunamis.

Fuente: Sitio web del SHOA³.

Intensidad	Descripción de categoría de intensidad
I	Muy suave. La ola es tan débil, que solo es perceptible en los registros de las estaciones de marea.
II	Suave. La ola es percibida por aquellos que viven a lo largo de la costa y están familiarizados con el mar. Normalmente se percibe en costas muy planas.
III	Bastante fuerte. Generalmente es percibido. Inundación de costas de pendientes suaves. Las embarcaciones deportivas pequeñas son arrastradas a la costa. Daños leves a estructuras de material ligero situadas en las cercanías a la costa. En estuarios se invierten los flujos de los ríos hacia arriba.
IV	Fuerte. Inundación de la costa hasta determinada profundidad. Daños de erosión en rellenos construidos por el hombre. Embancamientos y diques dañados. Las estructuras de material ligero cercanas a la costa son dañadas. Las estructuras costeras sólidas sufren daños menores. Embarcaciones deportivas grandes y pequeños buques son derivados tierra adentro o mar afuera. Las costas se encuentran sucias con desechos flotantes.
V	Muy fuerte. Inundación general de la costa hasta determinada profundidad. Los muros de los embarcaderos y estructuras sólidas cercanas al mar son dañados. Las estructuras de material ligero son destruidas. Severa erosión de tierras cultivadas y la costa se encuentra sucia con desechos flotantes y animales marinos. Todo tipo de embarcaciones, a excepción de los buques grandes, son llevadas tierra adentro o mar afuera. Grandes subidas de agua en ríos estuarinos. Las obras portuarias resultan dañadas. Gente ahogada. La ola va acompañada de un fuerte rugido.
VI	Desastroso. Destrucción parcial o completa de estructuras hechas por el hombre a determinada distancia de la costa. Grandes inundaciones costeras. Buques grandes severamente dañados. Árboles arrancados de raíz o rotos. Muchas víctimas.

Las intensidades de los tsunamis para este estudio se definen en el Anexo E—2. Los daños medio y bajo se definen en base al grado III de la escala de Sieberg, que incluye el arrastre de embarcaciones ligeras y daños leves a estructuras de material ligero. Para este estudio se ha dividido este grado, ya que se considera el arrastre de embarcaciones con fuertes marejadas y el cierre de puertos y playas de forma preventiva como un **daño bajo**. Tanto los daños a las construcciones de temporada (como atracaderos para barcos de pedales o kayaks) o a las estructuras de material ligero situadas cerca de

³ <http://www.shoa.cl/servicios/tsunami/escalas.htm>

la playa (como quioscos, jardines, caletas o calles) son considerados como un nivel de deterioro mayor, por lo que se distingue como **daño medio**.

Anexo E—2: Definición de intensidades para tsunamis con respecto a la escala de Sieberg.

Fuente: Elaboración Propia.

Intensidad para este estudio			Intensidad según Escala modificada de Sieberg
0	SD	Sin Daños	I-II
1	B	Bajo	III
2	M	Medio	III ⁴
3	F	Fuerte	IV
4	MF	Muy fuerte	V-VI

II. Clasificación para sismos

La definición de las intensidades para sismos, se realizan según las descripciones de la escala modificada de Mercalli, que es una escala subjetiva, que evalúa la percepción del sismo en un determinado lugar, y las intensidades de los sismos para este estudio (con respecto a la escala de Mercalli) se definen en el Anexo E—3 y a continuación en el Anexo E—4 se recuerdan las definiciones de Mercalli.

Anexo E—3: Definición de intensidad para sismos, con respecto a la escala de Mercalli.

Fuente: Elaboración Propia.

Intensidad para este estudio			Intensidad según escala de Mercalli
0	SD	Sin Daños	I-IV
1	B	Bajo	V-VI
2	M	Medio	VII
3	F	Fuerte	VIII
4	MF	Muy Fuerte	IX-XII

Anexo E—4: Escala modificada de Mercalli de intensidades de sismos.

Fuente: Sitio web del SHOA⁵.

Intensidad	Descripción de categoría de intensidad
I	No se advierte sino por unas pocas personas y en condiciones de perceptibilidad especialmente favorables.
II	Se percibe sólo por algunas personas en reposo, particularmente las ubicadas en los pisos superiores de los edificios.

⁴ Explicación en el texto.

⁵ <http://www.shoa.cl/servicios/tsunami/escalas.htm>

Intensidad	Descripción de categoría de intensidad
III	Se percibe en los interiores de los edificios y casas. Sin embargo, muchas personas no distinguen claramente que la naturaleza del fenómeno es sísmica, por su semejanza con la vibración producida por el paso de un vehículo liviano. Es posible estimar la duración del sismo.
IV	Los objetos colgantes oscilan visiblemente. Muchas personas lo notan en el interior de los edificios aún durante el día. En el exterior, la percepción no es tan general. Se dejan oír las vibraciones de la vajilla, puertas y ventanas. Se sienten crujir algunos tabiques de madera. La sensación percibida es semejante a la que produciría el paso de un vehículo pesado. Los automóviles detenidos se mecen.
V	La mayoría de las personas lo percibe aún en el exterior. En los interiores, durante la noche, muchas despiertan. Los líquidos oscilan dentro de sus recipientes y aún pueden derramarse. Los objetos inestables se mueven o se vuelcan. Los péndulos de los relojes alteran su ritmo o se detienen. Es posible estimar la dirección principal del movimiento sísmico.
VI	La mayoría de las personas lo percibe aún en el exterior. En los interiores, durante la noche, muchas despiertan. Los líquidos oscilan dentro de sus recipientes y aún pueden derramarse. Los objetos inestables se mueven o se vuelcan. Los péndulos de los relojes alteran su ritmo o se detienen. Es posible estimar la dirección principal del movimiento sísmico.
VII	Los objetos colgantes se estremecen. Se experimenta dificultad para mantenerse en pie. El fenómeno es percibido por los conductores de automóviles en marcha. Se producen daños de consideración en estructuras de albañilería mal construidas o mal proyectadas. Sufren daños menores (grietas) las estructuras corrientes de albañilería bien construidas. Se dañan los muebles. Caen trozos de estucos, ladrillos, parapetos, cornisas y diversos elementos arquitectónicos. Las chimeneas débiles se quiebran al nivel de la techumbre. Se producen ondas en los lagos; el agua se enturbia. Los terraplenes y taludes de arena o grava experimentan pequeños deslizamientos o hundimientos. Se dañan los canales de hormigón para regadío. Tañen todas las campanas.
VIII	Se hace difícil e inseguro el manejo de vehículos. Se producen daños de consideración y aún el derrumbe parcial en estructuras de albañilería bien construidas. En estructuras de albañilería bien proyectadas y construidas sólo se producen daños leves. Caen murallas de albañilería. Caen chimeneas en casa e industrias; caen igualmente monumentos, columnas, torres y estanques elevados. Las casas de madera se desplazan y aún se salen totalmente de sus bases. Los tabiques se desprenden. Se quiebran las ramas de los árboles. Se producen cambios en las corrientes de agua y en la temperatura de vertientes y pozos. Aparecen grietas en el suelo húmedo, especialmente en la superficie de las pendientes escarpadas.
IX	Se produce pánico general. Las estructuras de albañilería mal proyectadas o mal construidas se destruyen. Las estructuras de albañilería bien construidas se dañan y a veces se derrumban totalmente. Las estructuras de albañilería bien proyectadas y bien construidas se dañan seriamente. Los cimientos se dañan. Las estructuras de madera son removidas de sus cimientos. Sufren daños considerables los depósitos de agua, gas, etc. Se quiebran las tuberías (cañerías) subterráneas. Aparecen grietas aún en suelos secos. En las regiones aluviales, pequeñas cantidades de lodo y arena son expelidas del suelo.
X	Se destruye gran parte de las estructuras de albañilería de toda especie. Se destruyen los cimientos de las estructuras de madera. Algunas estructuras de madera bien construidas, incluso puentes, se destruyen. Se producen daños en represas, diques y malecones. Se producen grandes desplazamientos del terreno en los taludes. El agua de canales, ríos, lagos, etc. sale proyectada a las riberas. Cantidades apreciables de lodo y arena se desplazan horizontalmente sobre las playas y terrenos planos. Los rieles de las vías férreas quedan ligeramente deformados.
XI	Muy pocas estructuras de albañilerías quedan en pie. Los rieles de las vías férreas quedan fuertemente deformados. Las tuberías (cañerías subterráneas) quedan totalmente fuera de servicio.
XII	El daño es casi total. Se desplazan grandes masas de roca. Los objetos saltan al aire. Los niveles y perspectivas quedan distorsionados.

III. Clasificación para marejadas por temporales

Los daños por marejadas debido a temporales se deben a frentes de mal tiempo. Con los datos recolectados hasta al momento no se observa que haya daños fuertes o muy fuertes provocados por este tipo de eventos y tampoco se cuenta con suficientes datos para poder realizar una clasificación. Por este motivo se les asignará a todos una categoría "Media", "Baja" o "Sin daños". Considerando una categoría "Baja" como la presencia de daños, como cortes de luz y caminos, y una categoría "Media" a cualquier daño mayor a ese. Para así tener intensidades comparables a los daños provocados por las marejadas de tsunami en 1877 en Chañaral.

Anexo E–5: Definición de intensidades para Marejadas.

Fuente: Elaboración Propia.

Intensidad			Descripción de categoría de intensidad
0	SD	Sin Daños	No se observan daños a estructuras ni a personas, se observan algas arrancadas de las rocas y moluscos desenterrados de la arena, las olas pueden mojar la calle al romper contra muros de contención o las rocas.
1	B	Bajo	Hay daños perceptibles en la línea de costa y en construcciones ligeras. El viento o las olas generan cortes de luz, es peligroso acercarse a la playa o la rompiente de las olas.
2	M	Medio	Daños leves a propiedades o personas dentro de la primera cuadra cercana a la costa. Construcciones ligeras cercanas a la línea de costa tienen daños mayores.

F. Anexo F: Eventos Históricos

Taltal, como la mayoría de las ciudades en Chile, no se encuentra exenta de episodios catastróficos que han causado daños severos. Entre los eventos más destacables para esta ciudad se encuentran: los terremotos de 1918, 1936 y 1966; el maremoto de 1877; las inundaciones de 1927, 1929 y 1930; y los aluviones de 1918, 1940, 1942, 1987 y 2015. A continuación se presenta una reseña sobre cada uno de estos eventos, para consultar mayores detalles u otros eventos, revisar los anexos del catastro (Anexo A—1 al Anexo A—14) y la carpeta del Anexo de Noticias.

I. Maremoto, 9 de Mayo de 1877

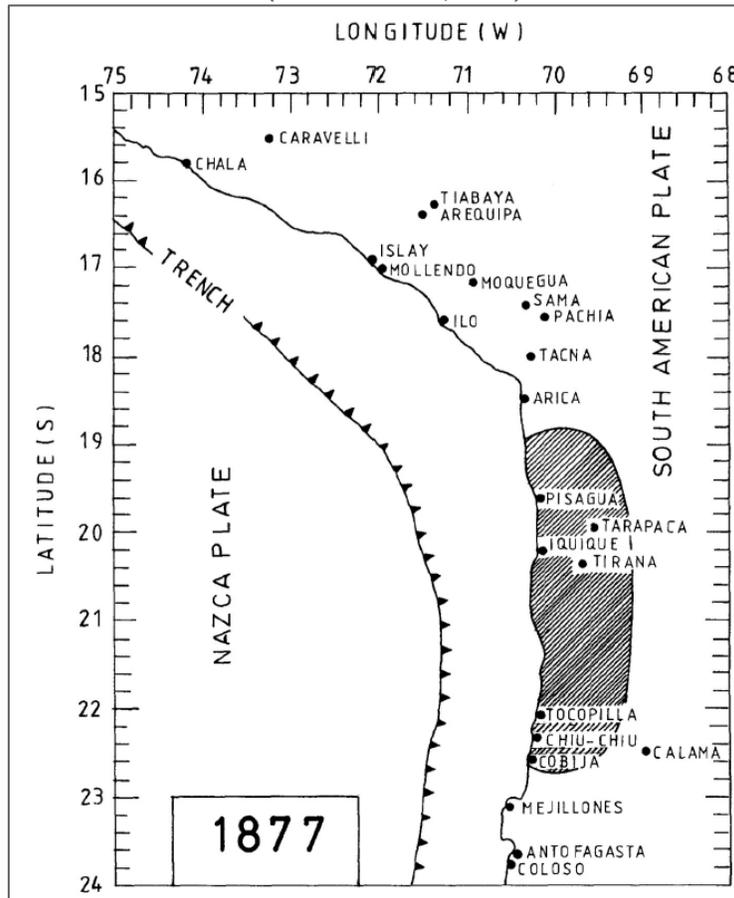
Gran terremoto generador de tsunami, según los datos recolectados por (Comte & Pardo , 1991), el epicentro se ubica cerca de la ciudad de Iquique, su máxima intensidad fue de XI, se estimó una magnitud $M_s=8,8$ y se destaca que el tsunami generado es uno de los más grandes observados desde la colonización española. Los autores indican que por esta razón, la profundidad del sismo es somera. El Anexo F—1, muestra una estimación de la zona afectada con grado XIII, considerada como daños Fuertes en este trabajo, Taltal se encuentra excluido de esta zona. El Mercurio de Valparaíso cubre la noticia sobre un gran terremoto e incendio en Iquique durante los días 10, 11 y 14 de Mayo, destacando los daños en las ciudades más importantes y los efectos del maremoto en el transporte marítimo, sin mencionar a Taltal. Sobre Taltal solo se cuenta con una descripción de (Rivera Marfán, 2014) que señala: “Como consecuencia del sismo hubo un gran incendio que destruyó una manzana casi completa y, debido a la salida del mar, hubo varias personas ahogadas”.

II. Terremotos y aluvión en 1918

Tres eventos ocurrieron durante este año, el primero ocurre el 20 de Mayo, un terremoto con epicentro cercano a Vallenar, causando daños en los valles de Huasco y Elqui. En Taltal, se sintió el sismo sin causar daños. Al día siguiente ocurre el segundo evento, 21 de Mayo, cuando llega un frente de mal tiempo con lluvias entre Copiapó y Antofagasta, generando la crecida del río Salado y corrientes de agua en la quebrada de Taltal, sin generar aluvión, pero dejando varias casas inundadas y daños en gran parte de la ciudad. El tercer evento de este año, corresponde a un terremoto, el 4 de Diciembre. Su epicentro se ubica en la costa entre Chañaral y Taltal, tuvo una magnitud $M_s=8,2$ y se estimó a 60 Km de profundidad (CSN, 2012). El diario local relata en detalle los daños, señalando la caída de un estanque de petróleo que dejó varios fallecidos, entre otros.

Anexo F—1: Zona isosísmica grado VIII en escala de Mercalli, para el terremoto de 1877.

Fuente: (Comte & Pardo , 1991)



III. Aluviones de 1927, 1929 y 1930

Tres aluviones importantes ocurrieron en un período de 4 años. El primero y menos grave, ocurrió el 3 y 4 de junio de 1927, precipitaron 40,3 mm (Almeyda, 1948) en un período de 6 horas durante el primer día y 25,8 mm con mayor intensidad, el segundo día. Dejando un total de agua caída de 67 mm (Almeyda, 1948). Hubo varias casas inundadas, calles cubiertas de lodo, cortes en el ferrocarril y se realizaron refuerzos para canalizar el agua hacia el mar. También nevó en el interior de la quebrada hasta Aguas Verdes. Entre el 20 y el 21 de Junio de 1929, un frente de mal tiempo genera precipitaciones en varios poblados de Atacama, en Taltal se registraron 29 mm de agua caída. Varias calles y casas fueron inundadas, incluyendo escuelas, la imprenta y varios negocios. También hubo cortes en el ferrocarril, que fue movido de su terraplén cortando la vía férrea. Relatos del periódico local.

El tercer evento, corresponde a una serie de frentes de mal tiempo desarrollados en Agosto de 1930 (Urrutia & Lanza, 1993), solo el último alcanza la ciudad de Taltal los días 20 y 21 de Agosto, junto con Antofagasta, Calama y Chañaral. Se registraron 67 mm de agua caída en un lapso de 10 horas, un torrente de agua y barro bajó por la quebrada de Taltal inundando varias casas con 60 cm de barro y arrasó con otras 20 casas. También causó un socavón con forma de zanja en un tramo de 2 cuadras, con 5 m de ancho y 3 m de profundidad (Anexo F—2), entre muchos otros daños.

Anexo F—2: Zanja formada por aluvión de 1930 en calle Atacama.

Fuente: Museo Augusto Capdeville Rojas.



IV. Terremoto, 13 de Julio de 1936

Terremoto con epicentro estimado cerca de la costa entre Antofagasta y Taltal, magnitud $M_s=7,3$ y profundidad de 60 Km (CSN, 2012). La ciudad más afectada por este sismo fue Taltal, también hubo daños en las oficinas salitreras en la pampa. El 80% de las casas en la ciudad sufrieron daños, se rompieron estanques y cañerías de agua potable y gran parte de los edificios públicos sufrieron serios destrozos. Existen relatos de la catástrofe en periódicos nacionales y locales.

V. Aluviones de 1940 y 1942

Una serie de frentes de mal tiempo entre Mayo y Junio de 1940 generan inundaciones en varias ciudades de la zona central de Chile (Urrutia & Lanza, 1993). Uno de estos frentes se desplaza hacia el norte generando lluvias, fuertes marejadas y un aluvión en Taltal entre los días 12 y 13 de Junio.

No se cuenta con un registro del agua caída para este evento. El aluvión ocurrió durante la noche, dejando dos muertos y varios heridos y desaparecidos. Las casas fueron arrastradas por completo, destruidas o llenadas con escombros y barro, al igual que las calles y algunos establecimientos comerciales. El diario El Mercurio realiza un completo reportaje sobre los daños. El 14 de Junio de 1942 un aguacero causó desperfectos menores en casas mal construidas, acumulación de barro en las calles, daños leves en la planta eléctrica y cortes en el camino a Las Breas. Relatos del diario local.

VI. Terremoto, 28 de Diciembre de 1966

Terremoto con epicentro en la costa a unos 20 Km al SW de Taltal, 23 km de profundidad y magnitud $M_s=7,8$ (CSN, 2012). Fue sentido con una intensidad grado VIII en Taltal (Anexo F—3), se contabilizaron tres personas fallecidas, muchos heridos, cientos de familias damnificadas, unas 50 viviendas destruidas y 42 debieron ser derrumbadas por su estado. También hubo daños graves en la red de alcantarillado. Las máquinas de la imprenta fueron destruidas y el diario local recién pudo realizar un tiraje el día 6 de Enero de 1967. Este terremoto, sus réplicas (Pitt & Ellis, 1968) y sus efectos geológicos (Lemke, et al., 1968) fueron ampliamente estudiados, para conocer su relación y efectos en las estructuras de la zona (Arabasz, 1968).

VII. Temporal de 1987

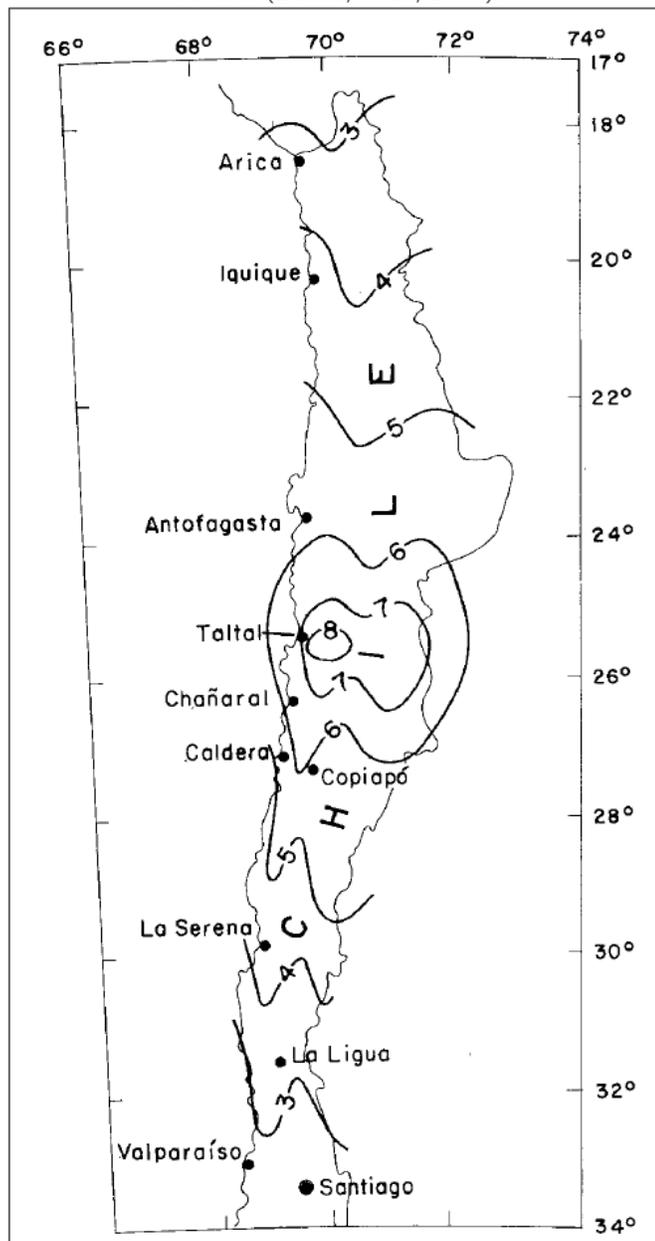
Violento temporal se desarrolla el 25 de Julio de 1987, dejando más de 7 mil personas damnificadas y 500 casas dañadas en Antofagasta, Taltal, Chañaral y Coquimbo. El temporal generó fuertes lluvias acompañado de viento y marejadas, que en Taltal hicieron dejaron aisladas a 12 embarcaciones en el mar, 4 desaparecidas y 2 zozobraron. La lluvia y el viento causaron daños a 300 casas, correspondientes a un 40% de la ciudad. No hubo aluvión.

VIII. Aluvión de Marzo del 2015

Entre el 24 y el 26 de Marzo, a consecuencia del desarrollo de un núcleo frío en altura, se desarrollaron precipitaciones y en consecuencia, reactivación, crecida y desborde de varios ríos y quebradas en el norte del país: Quebrada Taltal, río Salado, río Copiapó, río Huasco y río Elqui. Las ciudades aledañas a estos cauces fueron seriamente afectadas por inundaciones y flujos de barro (ONEMI, 2015).

Anexo F—3: Mapa isosísmico del terremoto de 1966.

Fuente: (Lemke, et al., 1968).



Según el informe de la ONEMI, en Taltal las precipitaciones se concentraron en los días 24 y 25, y gracias a las piscinas de control aluvional el impacto de los flujos en la ciudad se vio retrasado a los días 25 y 26, pero esta contención no fue suficiente para controlar el gran volumen de agua y lodo. El flujo sobrepasó las piscinas y avanzó por el camino alcanzando la ciudad. En el Anexo F—4 se observan las zonas afectadas, según el informe elaborado por el SERNAGEOMIN (Alfaro, et al., 2015) para la emergencia. Los daños causados, dividieron la ciudad en 2 partes, cortaron las carreteras que conectan Taltal con el aeropuerto de Las Breas y Paposó, dejando la ciudad aislada por varios días y varias familias damnificadas.

Anexo F—4: Zonas afectadas por aluvión en Marzo de 2015, Taltal.

Fuente: (Alfaro, et al., 2015)



G. Anexo G: Marco Geológico Regional

El mapa geológico de la cuenca de la Quebrada Taltal que se observa en la Anexo G—1 se construyó con software SIG como una simplificación de la Hoja Taltal y Chañaral elaborada por (Naranjo & Puig, 1984). Las definiciones de las unidades litológicas fueron tomadas del informe que acompaña la carta mencionada y actualizadas, si es posible, en base a la publicación de (Amilibia, et al., 2008), desarrollada en la Cordillera de Domeyko. También se han actualizado las edades de algunas unidades según la Carta Cronoestratigráfica Internacional (Cohen, et al., 2015), cuando corresponde.

Para una mejor comprensión de la zona y de las unidades, se mantuvo la agrupación por unidades geomorfológicas realizada por Naranjo & Puig, 1984, agregando la Cordillera Occidental tal como la define Amilibia, et al., 2008. Las unidades fueron agrupadas de a 3 a 4 en épocas, períodos o eras, y sus características fueron presentadas como columnas en tablas, para una descripción más resumida. En las filas superiores se presenta el nombre de cada unidad, su ubicación o unidad geomorfológica a la que pertenece, su abreviación, su edad y quién la definió. En las filas principales se presenta la litología, espesor, contactos, distribución en el área de estudio, correlaciones y ambiente de formación.

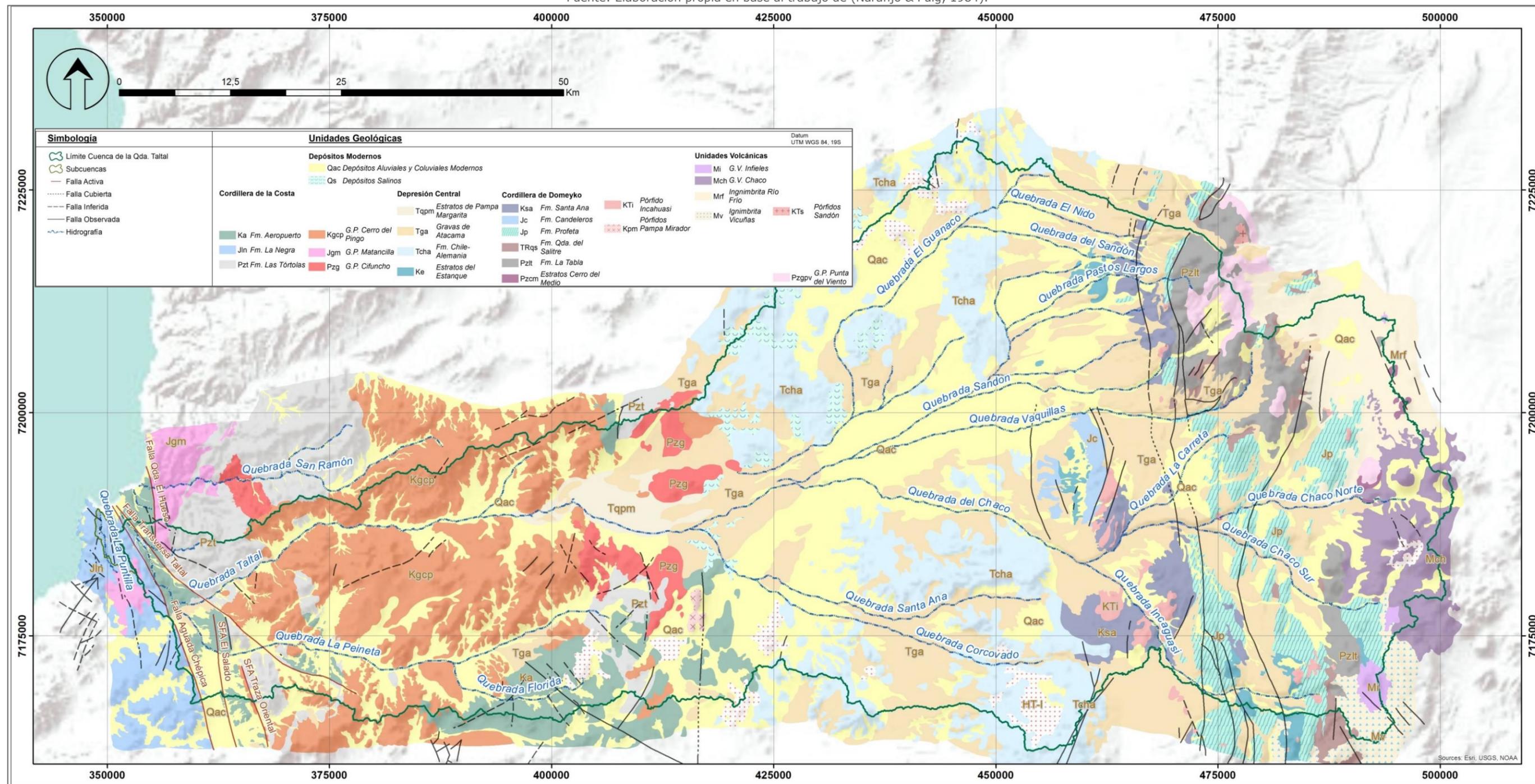
I. Unidades Estratificadas

Unidades Paleozoicas

Se observan tres unidades de edad paleozoica distribuidas en dentro de la cuenca de la Quebrada de Taltal, de oeste a este, estas son la **Fm. Las Tórtolas [PZt]**, la **Fm. La Tabla [PZIt]** y los **Estratos Cerro del Medio [PZcm]**, definidas en detalle dentro del Anexo G—2. Estas tres unidades constituyen el basamento ígneo-metamórfico en esta región, junto con los cuerpos intrusivos de la misma edad. La Fm. Las Tórtolas se emplaza en la Cordillera de la Costa, principalmente al NE de Taltal y las otras dos formaciones se emplazan en la Cordillera de Domeyko, en especial la Fm. La Tabla, como su principal constituyente en esta zona.

Anexo G—1: Unidades geológicas en la cuenca de la Quebrada Taltal y aledañas a la ciudad de Taltal.

Fuente: Elaboración propia en base al trabajo de (Naranjo & Puig, 1984).



Anexo G—2: Unidades estratificadas Paleozoicas.

Fuente: Elaboración en base a los datos de (Naranjo & Puig, 1984) y (Ferrando, et al., 2013).

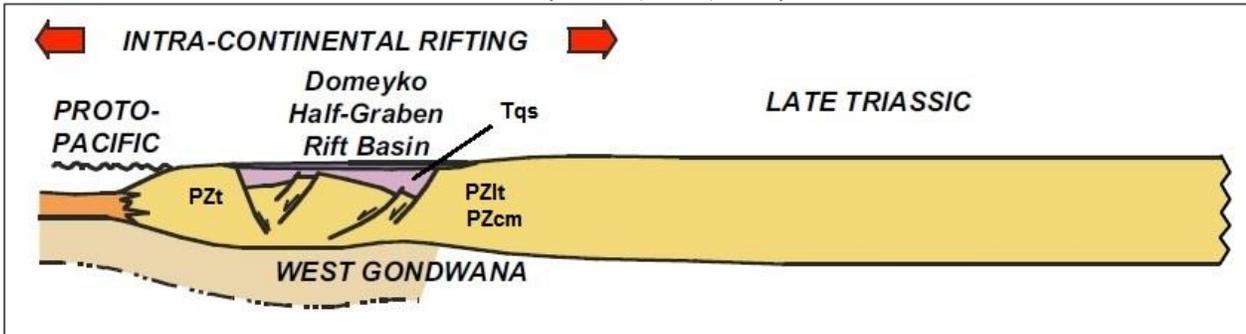
Unidad	Formación Las Tórtolas	Estratos Cerro del Medio	Formación La Tabla
Ubicación	C. de la Costa	C. de Domeyko	
Abreviación	[PZt]	7. [PZcm]	8. [PZIt]
Edad	Ordovícico – Devónico	Paleozoico (¿Devónico?)	Carbonífero Superior
Definición	Ulriksen, 1979.	Naranjo & Puig, 1984. Unidad informal.	García, 1967. En el Salar de Pedernales.
Litología	Areniscas y lutitas interestratificadas con metamorfismo de bajo grado.	Metacuarcitas interestratificadas con filitas micáceas.	Lavas riolíticas amigdaloidales, con brechas, tobas y lavas andesíticas subordinadas.
Espesor	Desconocido.	Desconocido.	1000–1700 m, base desconocida.
Contactos	Base desconocida. Techo: Fm. Aeropuerto y Fm. Chile – Alemania, en discordancia angular. Intruída por los plutones Cifuncho, Matancillas y Cerro del Pingo.	Base desconocida. Techo: parcialmente cubiertos por las Ignimbritas miocenas. Intruidos el Grupo Punta del Viento	Base desconocida. Techo: Fm. Quebrada del Salitre, discordancia erosiva. Intruída por el Grupo Punta del Viento.
Distribución en el área de estudio	CC: al NE de Taltal, franja continua de orientación NNE. Afloramientos al E del SFA.	CD: extremo NE de la cuenca, en varios cerros isla.	CD: extremo NE de la cuenca, es el principal constituyente de la Cordillera de Domeyko en este lugar.
Datación	Fósiles, edad Paleozoica Inferior (Ordovícico – Devónico).	Relaciones de contacto, Pre-Triásico.	Relaciones de contacto, Pre-Triásico Superior. U-Pb, Carbonífero Superior.
Correlaciones	Fm. Cerro del Medio	Fm. Zorritas y Fm. Lila, de edad devónica. Fm. Las Tórtolas.	Al N, Fm. Peine y Cas, Fm. Collahuasi y Fm. Quipisca. Al S, Fm. Pantanoso.
Ambiente	Cuenca oceánica profunda, con fuente continental. Metamorfismo se asocia a un prisma de acreción en un complejo de subducción paleozoico		Episodio volcanomagmático, de composición ácida, continental. Parte del cinturón magmático del Paleozoico Superior.

Unidades Triásicas

Consiste solamente en la **Fm. Quebrada del Salitre [Tqs]**, del Triásico Superior – Jurásico Inferior, constituida principalmente por unidades sedimentarias marinas y continentales, pertenecientes a una cuenca extensional. El triásico se encuentra mínimamente representado dentro de la cuenca de la Qda. Taltal, donde esta unidad aflora dentro de la Cordillera de Domeyko, como una franja NNW en las zonas más altas de las quebradas Incaguasi, en el sur y Vaquillas en el centro-norte. Las características de esta formación se detallan en el Anexo G—4. En el Anexo G—3 se puede observar la relación de esta unidad con el basamento Paleozoico.

Anexo G—3: Representación del contexto tectónico Triásico Tardío.

PZt: Fm. Las Tórtolas; PZlt: Fm. Las Tazas; PZcm: Fm. Estratos Cerro del Medio; Tqs: Fm. Quebrada del Salitre.
Fuente: (Amilibia, et al., 2008).



Anexo G—4: Unidades estratificadas Triásicas.

Fuente: Elaboración en base a los datos de (Naranjo & Puig, 1984) y (Amilibia, et al., 2008).

Unidad	Formación Quebrada del Salitre
Ubicación	Cordillera de Domeyko
Abreviación	[Tqs]
Edad	Triásico Superior-Jurásico Inferior
Definición	Naranjo & Puig, 1984.
Litología	Rocas sedimentarias marinas y continentales. Conglomerados y areniscas con intercalaciones de andesitas y cherts, en los niveles superiores.
Espesor	700 a 1000 m
Contactos	Base: Fm. La Tabla, discordancia erosiva. Techo: Fm. El Profeta, contacto concordante y transgresivo. Intruida por el Pórfido Sandón e Incahuasi
Distribución en el área de estudio	CD: franja de 7 Km de ancho con orientación NNW, que aflora en el sur de la cuenca y se dispersa hacia el norte.
Datación	Fósiles, Triásico Superior. Techo Hettangiano – Sinemuriano.
Correlaciones	Al N, con Fm. Alto de Varas. Al S, con Fm. La Ternera. En la CC, con la Fm. Cifuncho.
Ambiente	Miembro inferior de un ambiente marino, sublitoral a litoral, pero no se descarta que exista una gradación vertical y lateral hacia ambientes continentales o mixtos.

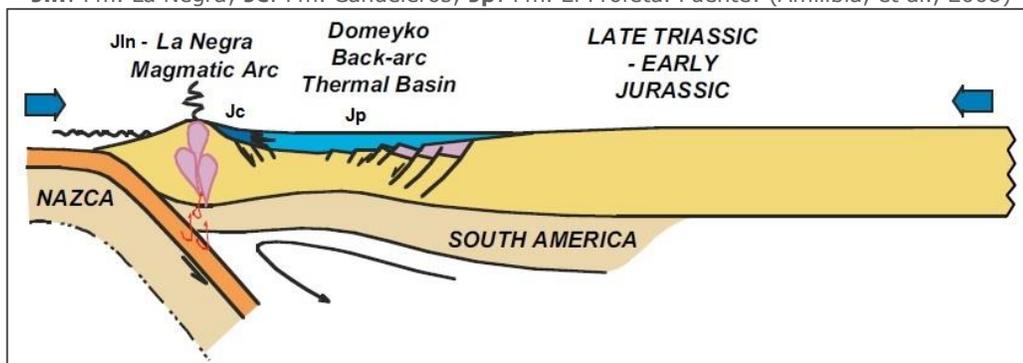
Unidades Jurásicas

Son tres unidades distribuidas en la Cordilleras de la Costa y de Domeyko. En la Cordillera de la Costa se encuentra la **Fm. La Negra [Jln]** y en la Cordillera de Domeyko se encuentran la **Fm. Candeleros [Jc]** y la **Fm. El Profeta [Jp]**, detalladas en el Anexo G—6. A pesar de que, en nuevos trabajos, la base de la Fm. La Negra se asigna al Triásico Superior (Charrier, et al., 2007, Amilibia, et al., 2008), se ha mantenido su agrupación con las unidades jurásicas por su correlación dentro de un mismo contexto tectónico extensional, como se observa en el Anexo G—5. Este contexto es representado por un arco magmático constituido por la Fm. La Negra y por una cuenca de trasarco representada por las formaciones El Profeta y Candeleros. Estas unidades representan facies distales (Fm. El Profeta) y

proximales (Fm. Candeleros) del arco en desarrollo, con intercalaciones de depósitos marinos y lavas continentales.

Anexo G—5: Representación del contexto tectónico Jurásico.

Jln: Fm. La Negra; Jc: Fm. Candeleros; Jp: Fm. El Profeta. Fuente: (Amilibia, et al., 2008)



Anexo G—6: Unidades estratificadas Jurásicas.

Fuente: Elaboración en base a los datos de (Naranjo & Puig, 1984), (Amilibia, et al., 2008) y (Ferrando, et al., 2013).

Unidad	Formación La Negra	Formación Candeleros	Formación El Profeta
Ubicación	C. de la Costa	C. de Domeyko	
Abreviación	[Jln]	9. [Jc]	10. [Jp]
Edad	Jurásico Medio	Jurásico Medio – Superior	Triásico Superior – Jurásico Superior
Definición	García, 1967	Naranjo & Puig, 1984	Chong, 1973.
Litología	Lavas con intercalaciones de brechas y rocas sedimentarias.	M1: Lavas andesíticas en almohadillas, tobas y calizas. M2: Calizas fosilíferas, con lavas andesíticas. M3: Lavas andesíticas, con fósiles.	Alternancia de areniscas, conglomerados y calizas, con intercalaciones de tobas y niveles evaporíticos en la parte superior.
Espesor	Más de 5000 m.	M1: 2000 m. M2: 900 m. M3: 600 m.	Más de 1200 m.
Contactos	Base: Fm. Pan de Azúcar y Fm. Posada de Hidalgo, discordancia erosiva. Techo: Fm. Aeropuerto por el SFA. Intruida por Grupo Plutónico Matancillas.	Base: Desconocida. M1-M2: Concordante. M2-M3: Concordante. Techo: Fm. Santa Ana, concordante. Intruida por el Pórfido Sandón e Incahuasi.	Base: Fm. Quebrada del Salitre y Fm. La Tabla, concordantes. Techo: Fm. Santa Ana, concordante. Intruida por el Pórfido Sandón e Incahuasi.
Distribución en el área de estudio	CC: límite SW de la cuenca, franja NS de 14 Km de ancho. Cerros directamente al sur de la ciudad de Taltal.	CD: franja discontinua, de hasta 4 Km de ancho, con orientación NNE.	CD: Forma dos franjas de orientación NS, de 8 Km de ancho cada una, al S de la Cordillera de Domeyko.
Datación	Fósiles, edad máxima Jurásica Inferior, edad mínima Jurásico Superior. U-Pb: Bajociano, Jurásico Medio.	Fósiles, Bajociano – Kimmerigdiano.	Registro fósil: Hettangiano al Oxfordiano, niveles evaporíticos permiten inferir la presencia del Kimmerigdiano.

Unidad	Formación La Negra	Formación Candeleros	Formación El Profeta
Correlaciones	Al N, con la Fm. Oficina Viz. Al E, Fm. Candeleros y Fm. El Profeta.	Al E, con la Fm. El Profeta.	Al E, Fm. Pan de Azúcar y Fm. La Negra. Al W, Fm. Candeleros. Al S, Fm. La Ternera.
Ambiente	Corresponde a un arco volcánico, con origen en debate: margen continental, arco de isla, cuenca abortada, sistema extensional o sistema transtensional.	Ambiente de deposición marino, transicional, con productos volcánicos de un arco y la cuenca formada por la Fm. El Profeta Su geoquímica evidencia adelgazamiento de la corteza.	Niveles inferiores, plataforma marina somera. Niveles superiores, depósitos marinos de tras arco, con intercalaciones del arco volcánico de la Fm. La Negra

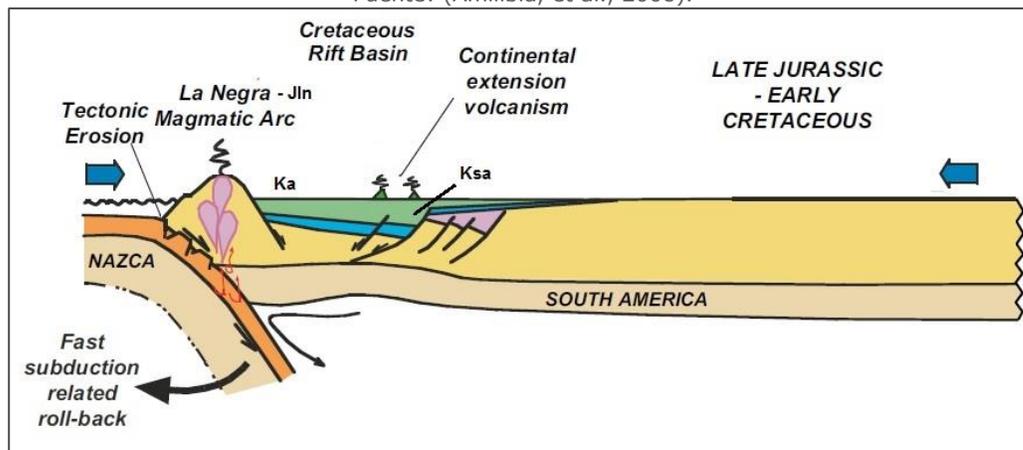
Unidades Cretácicas

En la zona de estudio se observan dos unidades cretácicas principales, una en la Cordillera de la Costa y una en la Cordillera de Domeyko. La primera, corresponde a los depósitos sedimentarios y volcánicos de la **Fm. Aeropuerto [Ka]** y la segunda, corresponde a los depósitos marinos transicionales de la **Fm. Santa Ana [Ksa]**, detalladas en la Anexo G—8. Estas unidades representan un episodio tectónico extensional durante la mayor parte del cretácico, como se observa en la Anexo G—7.

Anexo G—7: Representación del contexto tectónico Cretácico.

Jln: Fm. La Negra; Ka: Fm. Aeropuerto; Ksa: Fm. Santa Ana.

Fuente: (Amilibia, et al., 2008).



Dentro de la Fm. Santa Ana, se han agrupado, por varias razones los Estratos del Estanque, unidad informal definida por Naranjo & Puig, 1984. Esto se debe, en primer lugar, porque en el trabajo de Amilibia, et al., 2008, partes de esta unidad han sido reasignadas tanto a la Fm. Chile-Alemania, como a la Fm. Santa Ana; en segundo lugar, porque las partes no reasignadas, no eran relevantes para la escala de estudio, por lo que no se

justifica su agrupación como una unidad independiente; y en tercer lugar, porque las partes no reasignadas, se encontraban adyacentes a la Fm. Santa Ana, sugiriendo que pueden considerarse parte de una misma unidad para esta escala de estudio. De todas formas, se han incorporado las descripciones de los Estratos del Estanque, refiriéndose a ellos como los 'niveles superiores' de la formación Santa Ana, en consistencia con su ubicación estratigráfica.

Anexo G—8: Unidades estratificadas Cretácicas.

Fuente: Elaboración en base a los datos de (Naranjo & Puig, 1984) y (Amilibia, et al., 2008).

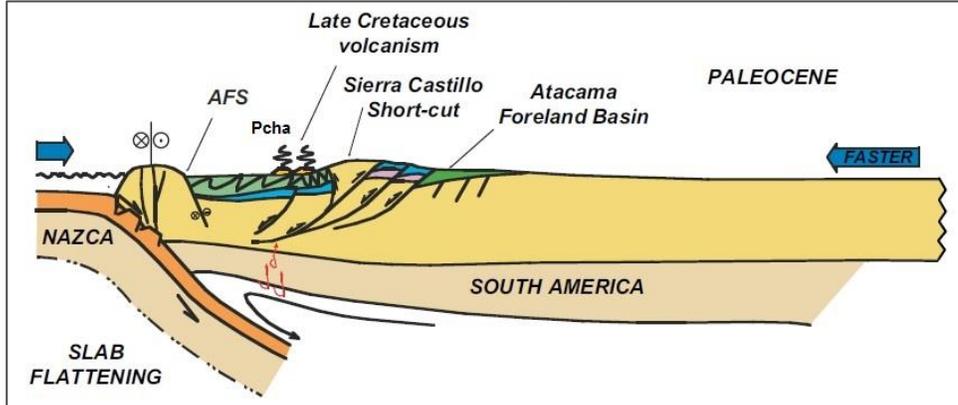
Unidad	Formación Aeropuerto	Formación Santa Ana
Ubicación	Cordillera de la Costa	Cordillera de Domeyko
Abreviación	[Ka]	[Ksa]
Edad	Cretácico Inferior	Cretácico Inferior – Superior
Definición	Ulriksen, 1979.	Naranjo & Puig, 1984.
Litología	Rocas sedimentarias clásticas con intercalaciones de lavas andesíticas y calizas marinas.	Secuencia de lutitas y areniscas fosilíferas, con intercalaciones de andesitas, brechas y tobas.
Espesor	1000 – 3000 m.	>1000 m.
Contactos	Base: Al W, Fm. La Negra por SFA. Al E, Fm. Las Tórtolas en discordancia angular. Techo: Fm. Chile – Alemania, en discordancia erosiva. Intruida por el Grupo Cerro del Pingo.	Base: Fm. Profeta y Fm. Candeleros, concordancia aparente. Techo: Fm. Chile – Alemania, discordancia angular. Intruida por el Pórfido Sandón e Incahuasi.
Distribución en el área de estudio	CC: franja de orientación NNW de 4-5 Km, entre Taltal y Las Breas. También aflora al centro-sur de la cuenca.	CD: Forma el flanco occidental de la Cordillera de Domeyko, como una franja sinuosa y discontinua.
Datación	Fósiles, edad Cretácica Inferior.	Fósiles, edad Cretácica Inferior en los niveles inferiores. K-Ar, edad Cretácica Superior a los niveles superiores.
Correlaciones	Al E, Fm. Santa Ana [Ksa].	Al W, Fm. Aeropuerto. Al S, Fm. Pedernales y Grupo Chañarcillo. Al N, Fm. Llanura Colorada.
Ambiente	Principalmente continental, con transgresiones marinas esporádicas. Representa los productos del arco magmático que originó la Fm. La Negra y continuó su actividad hasta el Cretácico Inferior.	Ambiente de deposición marino, que primero, grada a un ambiente transicional marino-continental con aportes volcánicos, y luego grada a continental subaéreo.

Unidades Paleógenas

Consiste únicamente en la **Fm. Chile-Alemania [Pcha]**, conformada por la unión de la formación homónima con la Fm. Cerro Avestruz, ambas descritas por Chong, 1973. Esta unidad conformada por productos volcánicos, se encuentra en la Depreción Central y es la más ampliamente distribuida en la zona de estudio, su descripción se detalla en el Anexo G—10. Corresponde a una migración al este del arco magmático, previa a la formación de la Cordillera de Domeyko, como se puede observar en el Anexo G—9.

Anexo G—9: Representación del contexto Paleógeno.

Pcha: Fm. Chile-Alemania. Fuente: (Amilibia, et al., 2008).



Anexo G—10: Unidades estratificadas Paleógenas.

Fuente: Elaboración en base a datos de (Naranjo & Puig, 1984) y (Ferrando, et al., 2013).

Unidad	Formación Chile-Alemania
Ubicación	Depresión Central
Abreviación	[Pcha]
Edad	Paleoceno – Eoceno
Definición	Chong, 1973.
Litología	Conjunto de rocas volcánicas (lavas y piroclastos) de composición andesítico dacítica, con basaltos y riolitas subordinadas.
Espesor	700 – 1000 m.
Contactos	Base: Fm. Santa Ana, discordancia angular. Discordancias erosivas con unidades paleozoicas, intrusivos cretácicos y Fm. Aeropuerto. Techo: Gravas de Atacama, discordancia erosiva.
Distribución en el área de estudio	DC: Aflora en los alrededores, y hacia el E, de la Oficina Flor de Chile, y se distribuye una franja NS de 35-40 Km de ancho, en el centro de la cuenca.
Datación	Dataciones de K-Ar en biotitas: 66±5 y 47±2 Ma, la ubican en el Paleoceno – Eoceno Medio.
Correlaciones	Al N, Fm. Cinchado y base de la Fm. Icanche. Al S, con la Fm. El Salvador, el Complejo Volcánico Pampa del Carrizo, Fm. Venado y con Secuencias y Complejos Volcánicos del Paleoceno – Eoceno.
Ambiente	Continental, subaéreo y asociado al desarrollo de centros volcánicos de amplio espectro composicional y eruptivo. Se encuentra relacionado a un proceso de subducción activo durante el Cenozoico.

Unidades Miocenas

Este grupo de unidades es constituido por cinco unidades definidas en el trabajo de Naranjo & Puig, 1984, que por simplificación han sido reagrupadas en tres unidades para este trabajo:

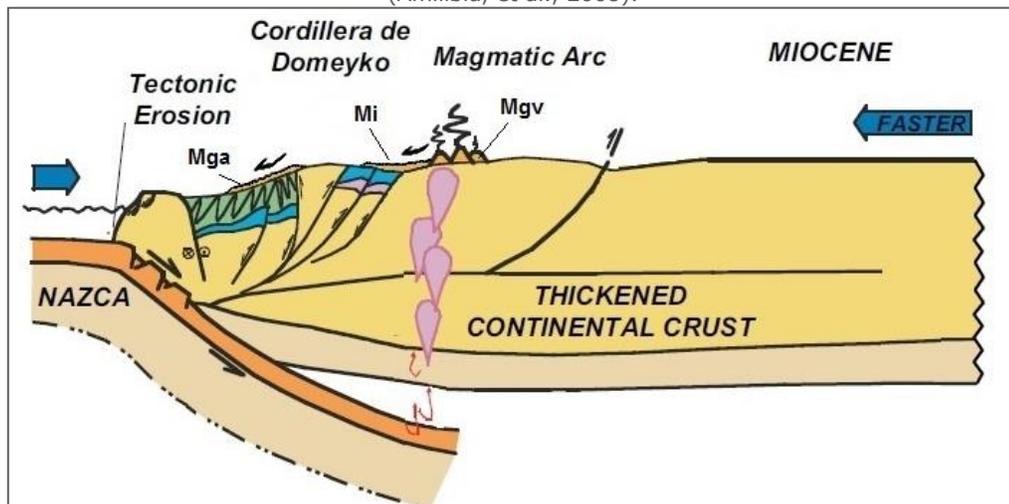
- La primera unidad, corresponde a las **Gravas de Atacama [Mga]**, que se mantiene sin cambios.
- La segunda unidad consiste en la unión de la Ignimbrita Río Frío y la Ignimbrita Vicuña, en las **Ignimbritas Miocenas [Mi]**.

- La tercera unidad, consiste en el Grupo Volcánico Chaco y por el Grupo Volcánico Infieles, que se han unido como el **Grupo Volcánico Mioceno [Mgv]**.

Las características de estas unidades son detalladas en el Anexo G—12. Las ignimbritas y los grupos volcánicos evidencian la importante actividad magmática desarrollada al este de la cuenca, como se observa en la Anexo G—11. Esta actividad guarda estrecha relación con el proceso que dio origen a las Gravas de Atacama, relacionado con el alzamiento y acortamiento de la Cordillera de Domeyko, y el movimiento hacia el Este del arco magmático, debido a un cambio en las condiciones tectónicas y cinemáticas de la subducción, de un régimen de subducción más rápido que la tasa de convergencia a un régimen de subducción más lento que la tasa de convergencia (Amilibia, et al., 2008).

Anexo G—11: Representación del contexto Mioceno.

Mga: Gravas de Atacama; **Mi:** Ignimbritas Miocenas; **Mgv:** Grupos Volcánicos Miocenos. Fuente: Adaptación de (Amilibia, et al., 2008).



Anexo G—12: Unidades estratificadas Miocenas.

Fuente: Elaboración en base a los datos de (Naranjo & Puig, 1984).

Unidad	Gravas de Atacama	Ignimbritas Miocenas	Grupos Volcánicos Miocenos
Ubicación	D. Central	C. de Domeyko	C. de Domeyko
Abreviación	[Mga]	11. [Mi]	12. [Mgv]
Edad	Oligoceno – Mioceno	Mioceno	Mioceno
Definición	'Mantling Gravels', Willis, 1929.	Modificado de Naranjo & Puig, 1984	Modificado de Naranjo & Puig, 1984
Litología	Depósitos polimícticos de gravas no consolidadas. Intercaladas por flujos ignimbríticos con mayor desarrollo hacia el E.	Flujo ignimbrítico sub horizontal, compuesto por aglomerados y tobas de variada composición, intercalados con las gravas de Atacama.	Varios edificios volcánicos (volcanes compuestos, estrato volcanes, domos, conos) y coladas de lava. Principalmente andesíticos y dacíticos.

Unidad	Gravas de Atacama	Ignimbritas Miocenas	Grupos Volcánicos Miocenos
Espesor	5 – 150 m.	55 m.	Edificios volcánicos de 600 a 1000 m desde su base.
Contactos	Base: Fm. Chile – Alemania y unidades anteriores, discordancia angular y erosiva. Techo: cubiertas por depósitos aluviales, coluviales y salinos modernos.	Base: Intercaladas o cubriendo las Gravas de Atacama. Techo: Los niveles superiores engranan lateralmente con los Grupos Volcánicos Miocenos.	Base: cubren en discordancia los Estratos de Cerro del Medio, al Grupo Punta del Viento y parcialmente a las Ignimbritas Miocenas.
Distribución en el área de estudio	DC: depresión central, en parte de la C. de la Costa y en los valles y llanos de la C. de Domeyko.	CO: Forman un llano sub horizontal, en el extremo oriental de la cuenca.	CO: en el extremo E de la cuenca, forma el límite oriental de la cuenca.
Datación	Contemporánea a las ignimbritas.	K-Ar, edad Miocena Inferior.	K-Ar, edad Miocena Media, posterior a las Ignimbritas Miocenas.
Correlaciones	Al N, Fm. Altos de Pica y Fm. Pampa de Mulas. Al E, con Ignimbritas Miocenas.	Al W, con las Gravas de Atacama. Al E, Grupos Volcánicos Miocenos.	Al W, con la Gravas de Atacama y con las Ignimbritas Miocenas.
Ambiente	Acumulaciones de flujos de detritos, como producto de la denudación de los terrenos andinos alzados durante el Mioceno.	Actividad volcánica ignimbritica de fuentes localizadas al este del área de estudio, ligada al desarrollo de las Gravas de Atacama.	Pertenece al arco magmático Neógeno que conforma la Cordillera Occidental.

Unidades Modernas

Se agrupan bajo este nombre las unidades que se han formado posteriormente a la las Gravas de Atacama y las unidades volcánicas asociadas. Conformada por los **Estratos de Pampa Margarita [Qpm]**, que forman depósitos lacustres someros; los **Depósitos aluviales y coluviales modernos [Qac]**, que rellenan las quebradas y cubren los faldeos y laderas; y los **Depósitos Salinos [Qs]**, principalmente de nitratos que cementan detritos y rellenan fracturas en la depresión central, principalmente asociados a la Unidades Volcánicas Paleógenas (Chong, et al., 2007). Estas unidades son detalladas en el Anexo G—13.

Anexo G—13: Unidades estratificadas Modernas.

Fuente: Elaboración en base a los datos de (Naranjo & Puig, 1984) y (Chong, et al., 2007).

Unidad	Estratos de Pampa Margarita	Depósitos aluviales y coluviales modernos	Depósitos Salinos
Ubicación	D. Central	Toda la Cuenca	D. Central
Abreviación	[Qpm]	[Qac]	[Qs]
Edad	Neógeno Superior – Cuaternario	Cuaternario	Cuaternario
Definición	Naranjo & Puig, 1984	Naranjo & Puig, 1984	Naranjo & Puig, 1984

Unidad	Estratos de Pampa Margarita	Depósitos aluviales y coluviales modernos	Depósitos Salinos
Litología	Calizas estratificadas micro esparíticas con niveles de limos y dolomitas, y con clastos andesíticos.	Conjunto de gravas, arenas y limos, rellenando quebradas.	Principalmente nitratos, cementando el material aluvial y coluvial.
Espesor	45 m.	2 – 50m	50 – 250 cm.
Contactos	Base: Gravas de Atacama, contacto no observado. Techo: depósitos modernos.	Base: Unidades pre-existent, discordancia erosiva.	Forma el cemento de material detrítico desprendido de las unidades anteriores.
Distribución en el área de estudio	DC: alrededores de Aguas Verdes.	A través de toda la cuenca, en faldeos de los cerros y rellenando las quebradas.	DC: Se acumulan en superficies topográficamente elevadas y en cuencas deprimidas.
Datación	Relaciones estratigráficas, edad post-Mioceno Medio.	Cuaternarios, por cubrir parcialmente todas las unidades anteriores.	Cuaternarios, ya que las sales contienen detritos de todas las unidades anteriores.
Correlaciones	Al N, Fm. Loa.		Al NE, Cloruros en el Salar de Infiel. Cinturón de nitratos en el norte de Chile.
Ambiente	Ambiente de depositación lacustre somero, con fuerte evaporación y con aportes piroclásticos.	Se originan por corrientes de barro, procesos aluviales o procesos gravitacionales.	Estos depósitos se pueden desarrollar en una gran variedad de ambientes sedimentarios, pero con condiciones de aridez extrema.

II. Rocas Intrusivas

Intrusivos Paleozoicos

Los Intrusivos Paleozoicos conforman el basamento de la zona de estudio, junto con las Unidades Paleozoicas Estratificadas. Estos intrusivos son conformados por el **Grupo Plutónico Cifuncho [PZgc]**, en la Cordillera de la Costa y el **Grupo Plutónico Punta del Viento [PZgpv]**, en la Cordillera de Domeyko, detalladas en el Anexo G—14. Ambos intruyen a rocas Paleozoicas sedimentarias o volcano sedimentarias con algún grado de metamorfismo y se encuentran en contacto erosivo con unidades triásicas, por lo que representan actividad magmática previa a la formación de la cuenca triásica representada en el Anexo G—3.

Anexo G—14: Intrusivos Paleozoicos.

Fuente: Elaboración en base a los datos de (Naranjo & Puig, 1984) y (Cohen, et al., 2015).

Unidad	Grupo Plutónico Cifuncho	Grupo Plutónico Punta del Viento
Ubicación	C. de la Costa	C. de Domeyko
Abreviación	[PZgc]	[PZgpv]

Unidad	Grupo Plutónico Cifuncho	Grupo Plutónico Punta del Viento
Edad	Pérmico Superior	Carbonífero Superior – Pérmico Superior
Definición	Naranjo & Puig, 1984	Naranjo & Puig, 1984
Litología	Rocas plutónicas, de grano grueso, leucocráticas, tipo sieno y mozogranito.	Cuerpos intrusivos, constituidos por granodioritas y sienogranitos.
Distribución en el área de estudio	CC: Cord. de la Costa, en la Qda. San Ramón y entre Aguas Verdes y la Oficina Flor de Chile.	CD: Cord. de Domeyko, siendo uno de sus constituyentes principales.
Contactos	Intruyen a la Fm. Las Tórtolas en contacto tajante y bien definido. Clastos de este plutón se pueden encontrar en la Fm. Cifuncho. Intruido por el Grupo Cerro El Pingo.	Intruyen a los Estratos Cerro del Medio y presentan un contacto gradual con las volcánicas de la Fm. La Tabla. Infrayace en discordancia erosiva a la Fm. Quebrada del Salitre.
Petrografía	Gran homogeneidad petrográfica y textural, rocas de grano grueso, de tipo monzogranito y sienogranito. Sus altas razones iniciales de Sr^{87}/Sr^{86} , permiten señalar que son granitoides tipo S.	Incluye principalmente sienogranitos, monzogranitos y granodioritas.
Edad de la Intrusión	Relaciones estratigráficas, Pérmico. K-Ar en biotita, 259 ± 8 , 273 ± 8 y 244 ± 4 Ma, y Rb/Sr similares, edad Pérmica Superior.	Relaciones de contacto, previa al Triásico Superior. Rb-Sr, fuera de la zona de estudio, 308 y 268 Ma, Carbonífero Superior (Pennsylvaniano) al el Pérmico Superior (Guadalupiano).

Intrusivos Jurásicos

Representados únicamente por el **Grupo Plutónico Matancilla [Jgm]**, que aflora en las cercanías de Taltal, en el extremo E de la cuenca. Esta unidad se detalla en el Anexo G—15, intruye a las formaciones Las Tórtolas y La Negra, por lo que se relaciona a estos plutones con el volcanismo del arco magmático representado por La Negra.

Anexo G—15: Intrusivos Jurásicos.

Fuente: Elaboración en base a los datos de (Naranjo & Puig, 1984).

Unidad	Grupo Plutónico Matancilla
Ubicación	C. de la Costa
Abreviación	[Jgm]
Edad	Jurásico Superior
Definición	Naranjo & Puig, 1984
Litología	Granodioritas y tonalitas, con algunas variaciones monzodioríticas y graníticas.
Distribución en el área de estudio	CC: Afloran al este de la cuenca, al NE y al S de Taltal, en la desembocadura de la Qda. San Ramón y al Norte de la Qda. Los Zanjones.
Contactos	Intruye a la Fm. Las Tórtolas y a la Fm. La Negra. Se encuentra cubierto por las Gravas de Atacama y Depósitos Modernos, en discordancia erosiva.
Petrografía	Se distinguen diversos grupos petrográficos, que incluyen granodioritas, granodioritas de piroxeno, de biotita y hornblenda y cuarzo monzonitas. Estas rocas se encuentran fuertemente cloritizadas y epidotizadas.
Edad de la Intrusión	Relaciones de contacto, posterior al Jurásico Medio. K-Ar, al norte de la zona de estudio, 159 ± 3 Ma, Jurásico Superior, consistente con Rb-Sr.

Intrusivos Cretácicos

Son los más ampliamente distribuidos en la cuenca, afloramientos en todas las unidades geomorfológicas presentes. En la Cordillera de la Costa se encuentra el **Grupo Plutónico Cerro el Pingo [Kgcp]**, en la Depresión Central se encuentran los **Pórfidos Pampa Mirador [Kpm]** y en la Cordillera de Domeyko se encuentran los **Pórfidos Sandón e Incahuasi [KCSI]**. Estas unidades se detallan en el Anexo G—16. El Grupo Cerro del Pingo, se considera una extensión de la actividad plutónica y magmática del arco Jurásico formado por La Negra. En tanto, los pórfidos Pampa Mirador, Sandón e Incahuasi se asocian a una migración hacia el este de las grandes franjas de plutones, junto con la migración del arco magmático, como se explicó previamente con la evolución de las unidades estratificadas.

Anexo G—16: Intrusivos Cretácicos.

Fuente: Elaboración en base a los datos de (Naranjo & Puig, 1984).

Unidad	Grupo Plutónico Cerro del Pingo	Pórfidos Pampa Mirador	Pórfidos Sandón e Incahuasi
Ubicación	C. de la Costa	Depresión Central	C. de Domeyko
Abreviación	[Kgcp]	[Kpm]	[KCSI]
Edad	Albiano – Aptiano	Campaniano	Cretácico Superior-Eoceno
Definición	Ulriksen, 1979	Naranjo & Puig, 1984	Naranjo & Puig, 1984
Litología	Incluye dioritas, grano-dioritas y cuarzo monzonitas.	Pórfidos riolíticos de color gris claro.	Conjunto formado por pórfidos andesíticos a dioríticos, con variaciones granodioríticas y gabroicas.
Distribución en el área de estudio	CC: franja de 20-40 Km de ancho, con orientación NS en el centro de la Cord. de la Costa.	DC: en el centro de la cuenca, donde termina la Qda. La Peineta.	CD: varios cuerpos intrusivos diseminados en el flanco occidental de la Cord. de Domeyko.
Contactos	Intruye a la Fm. Las Tórtolas, al Grupo Cifuncho y a la Fm. Aeropuerto. Es cubierto por la Fm. Chile – Alemania, en discordancia erosiva.	Intruyen al Grupo Cifuncho y a la Fm. Aeropuerto. Son cubiertos por las Gravas de Atacama en discordancia erosiva.	Intruyen a las unidades triásicas, jurásicas y cretácicas de la Cord. de Domeyko. Infrayacen a las unidades miocenas, en discordancia erosiva.
Petrografía	Gran variedad de facies petrográficas: dioritas, monzodioritas, tonalitas, monzogranitos y afloramientos restringidos de gabroides y anortositas.	Rocas rosadas a gris claro de textura porfírica y masa fundamental félsica, con cristales de cuarzo, plagioclasa, biotita y anfíbola.	Dioritas porfíricas de color verde grisáceo o rosado, con fenocristales de plagioclasa. Con alteración a calcita o silisificados.
Edad de la Intrusión	Relaciones estratigráficas, edad Cretácico Inferior al Paleoceno. K-Ar y Ar ³⁹ -Ar ⁴⁰ , edades de 124-109 Ma, Albiano – Aptiano.	Relaciones estratigráficas, edad entre el Cretácico Inferior y el Oligoceno. K-Ar, 78±5 y 75±2 Ma, edad Campaniana.	Relaciones estratigráficas, edad posterior al Cretácico Superior y previa al Oligoceno Superior.

H. Anexo H: Ajuste Metodológico

I. Ajuste Metodológico

Para ajustar los índices y pesos a la zona de estudio se realizó una primera aproximación de este método usando los índices y pesos propuestos por los autores para la ciudad de Hong Kong, para lo que se buscó la base de datos utilizada para dicho trabajo: Evans *et al.*, (1997). Además se usaron índices y pesos de prueba para cada proceso a estudiar, exagerando cada una de las capas, de esta forma es posible observar su comportamiento e influencia en la suma final de susceptibilidad. En la tabla del Anexo H—1 se observan los índices designados para cada prueba: las capas de aspecto, acumulación de flujos y distancia a la falla, también tienen índices de prueba, ya que éstas no son utilizadas por Chau *et al.*, (2004) y se quiere observar su influencia en el resultado final. La prueba designada como "**Prueba 1**", sigue los índices y pesos recomendados por los autores para remociones en masa, de manera general. Para la "**Prueba 2**" se asignaron los valores con la intención de modelar los procesos de inundaciones y flujos de la Quebrada Taltal o principal y para la "**Prueba 3**" se hizo con la intención de modelar los procesos de caídas, aunque el análisis posterior de los resultados genere recomendaciones para los tres casos a partir de los 3 modelos realizados, que serán discutidos en el siguiente punto.

Anexo H—1: Índices de Peligro asignados para prueba de ajuste.

Fuente: Elaboración Propia.

Capa	Clases	Obs.	Índices (H _i)		
			Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3
Geología	Coluvios	[col]	10	100	10
	Terrazas marinas	[pl-terr]	11	100	100
	Depósitos de playa	[pl-act]	11	100	100
	Canales de transporte	[al-act]	10	100	100
		[c-terr]	10	90	90
		[al-qp]	11	100	100
	Formas Aluviales	[al-Mio]	11	80	80
		[al-pro]	11	100	100
		[al-dis]	11	90	90
	Metaareniscas, pizarras y filitas	[Dcchb]	27	27	27
	Lavas andesíticas- basálticas	[Jilna]	23	23	30
	Lavas en almohadilla, brechas	[Jilnd]	39	39	60
	Tobas, areniscas y brechas volcanoclásticas	[Jilnf]	38	38	60
	Granodioritas-Monzogranitos	[Jmmgd]	15	15	25
Intrusivos riolíticos	[Jmhr]	14	14	25	
Tonalitas y granodioritas	[Kilt]	15	15	25	

Capa	Clases	Obs.	Índices (H _i)		
			Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3
	Antrópico	[hum]	(20)	(20)	(20)
Pendiente (°)	<8		2	1	1
	8-15		10	10	2
	15-22		10	10	5
	22-27		80	80	5
	27-39		100	100	30
	39-45		80	80	80
	>45		30	30	100
Aspecto (°)	337,5-22,5	N	1	--	5
	22,5-67,5	NE	1	--	15
	67,5-112,5	E	3	--	15
	112,5-157,5	SE	50	--	10
	157,5-202,5	S	100	--	70
	202,5-247,5	SW	50	--	100
	257,5-292,5	W	3	--	70
	292,5-337,5	NW	1	--	10
Elevación (m)	0-50		2	100	50
	50-200		50	10	80
	>200		100	1	100
Acumulación de flujos (píxeles 30x30m)	1-2,5·10 ⁴		--	10	--
	2,5·10 ⁴ -7,5·10 ⁴		--	50	--
	7,5·10 ⁴ -2·10 ⁵		--	90	--
	2·10 ⁵ -6,75·10 ⁵		--	100	--
	6,75·10 ⁵ -6,5·10 ⁶		--	100	--
Distancia a las fallas (m)	0-50		100	--	100
	50-150		30	--	80
	150-300		1	--	50
	>300		0	--	0
Zona Potencial	Generación		--	--	100
	Alcance		100	100	50
	No		0	0	0

En el Anexo H—2 se muestran las combinaciones de pesos utilizadas para cada prueba. En las tres pruebas se utilizó la combinación de pesos recomendada por Chau *et al.*, (2004), una distribución igual para cada capa y una combinación de pesos para exagerar cada capa y observar su comportamiento por separado. Los índices de peligro y los pesos de cada capa se integraron mediante la fórmula:

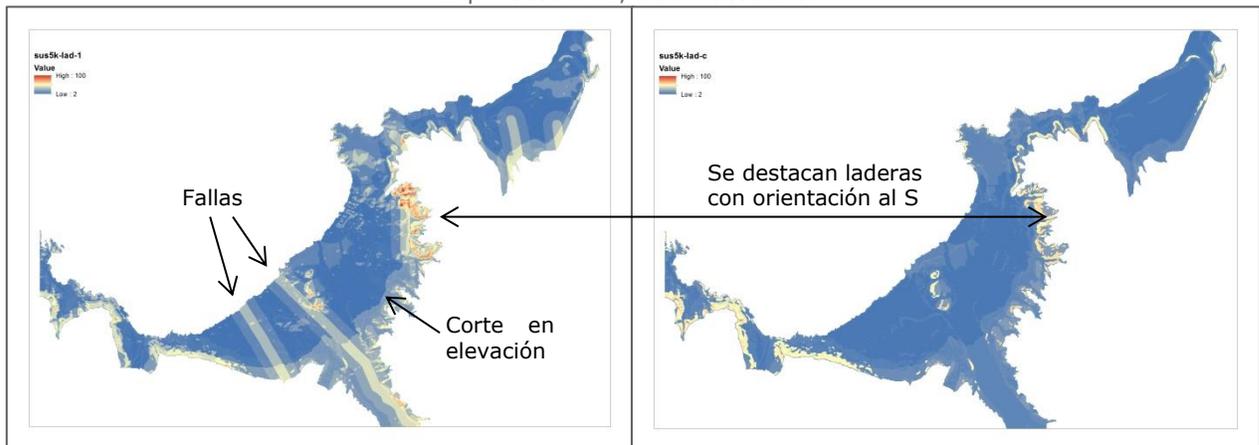
$$Susceptibilidad(x) = \frac{\sum_{j=1}^n W_j \cdot H_{ij}(x)}{\sum_{j=1}^n W_j}$$

Dónde **x** corresponde al valor de cada píxel en cada capa, **n** corresponde al número de capas sumadas en cada caso, **W_j** son los pesos de cada capa y

de la capa de distancia a las fallas a la mitad (150 m) y añadirla sobre áreas de elevación mayores a 60 m, ya que para el área de baja pendiente de la ciudad, esta capa destaca burdamente sin aportar información. También se observa un corte drástico de la elevación a los 50 m, por lo que se decide generar más clases para la zona con resolución de 5 m. Por último, se observa que el aspecto, condiciona desfavorablemente las laderas orientadas hacia el S, no tiene una buena correlación las áreas de interés, por lo que se descarta su utilización.

Anexo H—3: Comparación entre resultados de la Prueba 1.

Fuente: Elaboración Propia.
Izq. Prueba 1-DI; Der. Prueba 1-C.



Prueba 2

En esta prueba se observa nuevamente el corte drástico de la elevación a los 50 m, además a la izquierda del Anexo H—4, se destacan fuertemente las diferencias entre las unidades geológicas aluviales y coluviales (en tonos naranjos) y las de roca (en tonos azules) por lo que se decide revisar los índices asignados. Esta diferencia aún se destaca a la derecha del Anexo H—4, aunque se ve atenuada por los pesos indicados por (Chau, et al., 2004); en la misma figura resaltan bien las laderas con pendientes de interés, aunque hay un sector al SE que se destaca por sus índices bajos, debido al bajo valor asignado en la geología, que atenua los otros indicadores, por lo que deben ser normalizados.

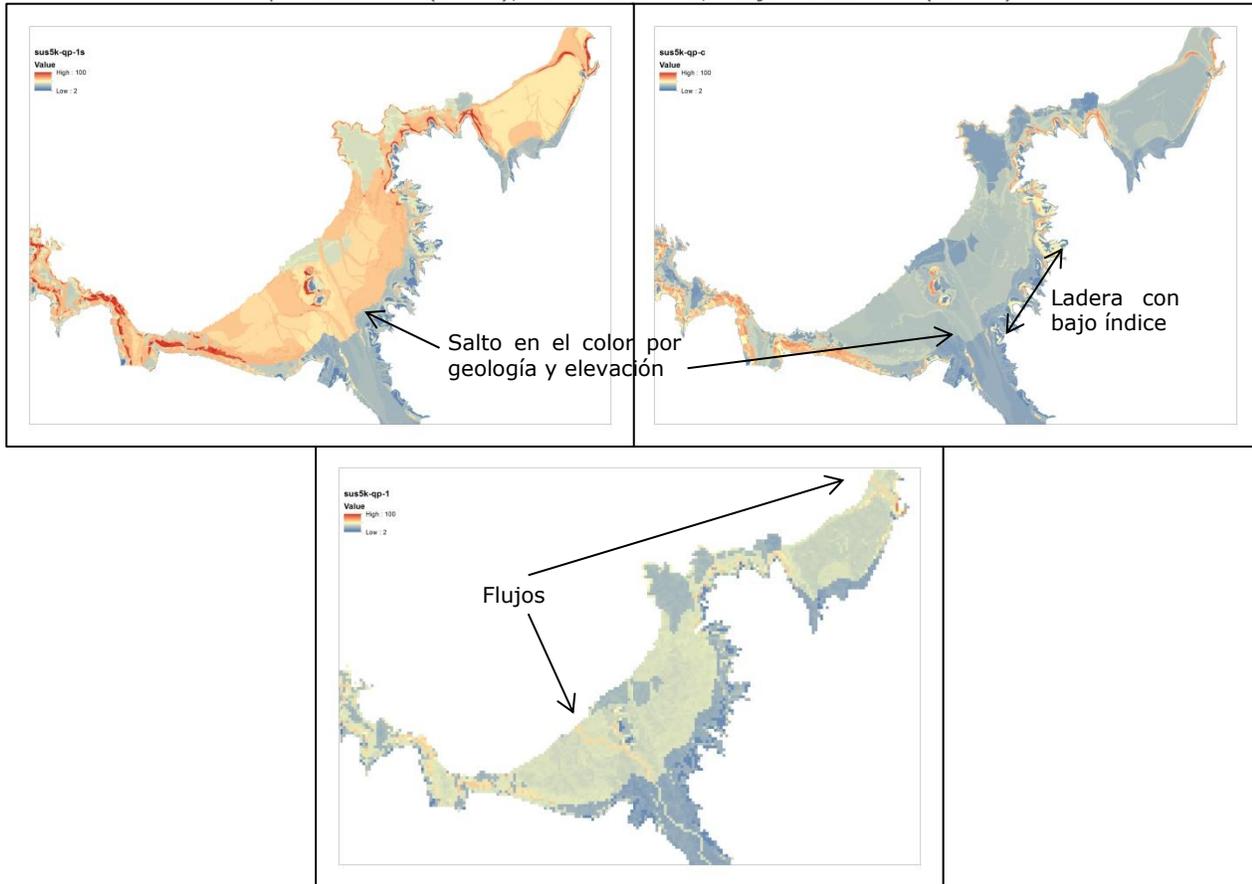
Para la imagen abajo en el Anexo H—4, se incluyó la capa de acumulación de flujos con resolución de 30 m, ya que esta capa se hace a partir del DEM de 30 m que cubre toda la cuenca. En esta imagen se destacan en tonos naranjos los recorridos que tendrían los cuerpos de agua de la quebrada San Ramón y la Quebrada Taltal si fueran continuos, pero no se destacan las áreas inundables por un posible flujo, por lo que se decide que para este

proceso, se deben condicionar desfavorablemente las clases de menor elevación y pendiente y las que tengan una geología asociada a estas clases, tales como los canales de transporte, las formas aluviales distales y las formas marinas. De todas maneras, se decide dejar fuera el uso de esta capa ya que no aporta más información.

Anexo H—4: Comparación entre resultados de la Prueba 2.

Fuente: Elaboración Propia.

Izq. Prueba 2-DI (sin AF); Der. Prueba 2-C; Abajo Prueba 2-DI (con AF)



Prueba 3

Para la Prueba 3, se pudo observar que no se logró coincidir de manera efectiva los factores favorables a los procesos de caída, ya que vagamente se destaca alguna zona en las imágenes resultantes (Anexo H—5). Usar índices bajos o intermedios atenúa la influencia de otras capas, por lo que es mejor dar valores altos a los índices de las clases que más influyen en el proceso o normalizarlos. Para poder crear una mejor asignación de estos valores se revisó las imágenes de las otras pruebas, además de consultar otras fuentes bibliográficas. Al igual que en la primera prueba, se pudo distinguir que el aspecto, que condiciona negativamente las laderas orientadas hacia el SW,

no tiene una buena correlación con las laderas cubiertas por depósitos no consolidados, por lo que se descarta su utilización.

Anexo H—5: Comparación entre resultados de la Prueba 3.

Fuente: Elaboración Propia.
Izq. Prueba 3-A; Der. Prueba 3-DI.

