

INFORME ETAPA 5

PROYECTO

ESTUDIO FUNDADO DE RIESGOS

ESTUDIO ACTUALIZACION PLAN REGULADOR DE IQUIQUE

CÓDIGO BIP 30077611-0

Ed 1 – Enero 2023



ILUSTRE MUNICIPALIDAD DE IQUIQUE
SECOPLAC
Tel 56 57 2514533

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'R. Plott', is centered on the page. The signature is fluid and cursive.

Rodrigo Rauld Plott, Geólogo
Profesional Responsable Estudio de Riesgos

EQUIPO TÉCNICO PERMANENTE

Profesional Responsable: Rodrigo Rauld Plott, Geólogo XTERRAE

EQUIPO APOYO:

Felipe García-Huidobro Covarrubias – Geólogo XTERRAE

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1	INTRODUCCIÓN	12
1.1	Ubicación del área de estudio	12
1.2	Objetivos	12
1.3	Alcance y limitaciones	13
1.4	Marco jurídico	13
2	METODOLOGÍA	15
2.1	Introducción	15
2.2	Definición del área de estudio y de la escala de trabajo	16
2.3	Línea de base	18
2.3.1	Geología y geomorfología	18
2.3.2	Hidrología	19
2.4	Catastro de peligros geológicos	19
2.4.1	Recopilación bibliográfica	19
2.4.2	Campañas de terreno	20
2.5	Diagnóstico de peligros geológicos	20
2.6	Zonificación de Susceptibilidad de Peligros Geológicos	22
2.7	Propuesta de criterios de zonificación urbana	22
3	LÍNEA DE BASE	23
3.1	Línea de base de geología y geomorfología	23
3.1.1	Marco geodinámico	23
3.1.2	Marco geomorfológico	23
3.1.3	Marco geológico	29
3.1.4	Marco estructural	35
3.2	Línea de base de hidrología	39
4	INUNDACIONES TERRESTRES	41
4.1	Antecedentes y catastro	41
4.2	Diagnóstico	42
5	INUNDACIONES LITORALES	44
5.1	Antecedentes y catastro	44
5.2	Diagnóstico	45
5.3	Susceptibilidad	45
6	REMOCIONES EN MASA	54
6.1	Flujos de barro y/o detritos	54
6.1.1	Antecedentes y catastro	54
6.1.2	Diagnóstico	57
6.1.3	Susceptibilidad	60
6.2	Procesos de ladera	61
6.2.1	Antecedentes y catastro	61
6.2.2	Diagnóstico	65
6.2.3	Susceptibilidad	70
7	SISMICIDAD	84
7.1	Antecedentes y catastro	84
7.1.1	Sismos reportados en antecedentes históricos (siglo XVII en adelante) que han afectado a la comuna de Iquique	84
7.1.2	Sismos registrados por la red sismológica mundial	86
7.1.3	Catastro de sismos	88
7.1.4	Fallas inactivas, potencialmente activas e inactivas	88
7.2	Diagnóstico	89
7.3	Resultados	90

8	VOLCANISMO	92
8.1	Antecedentes y catastro	92
8.2	Diagnóstico	94
8.2.1	Lluvia de tefra y proyectiles balísticos.....	94
8.2.2	Lavas y edificio volcánico.....	94
8.2.3	Remociones en masa	95
8.2.4	Otros	95
9	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	95
9.1	Zonificación de la susceptibilidad.....	95
9.2	Definición de áreas de riesgo y otros criterios de planificación	97
9.3	Recomendaciones específicas	99
10	REFERENCIAS	102
11	APÉNDICES	110
11.1	Definiciones de peligro y riesgo usadas en este estudio	110
11.2	Descripción de los peligros geológicos analizados	113
11.2.1	Procesos internos o endógenos de la Tierra	113
11.2.2	Procesos externos o exógenos de la Tierra	122
11.3	Metodologías consideradas para el análisis de la susceptibilidad de inundaciones y remociones en masa	133
11.3.1	Metodologías consideradas para el análisis de la susceptibilidad de inundación	133
11.3.2	Metodologías consideradas para el análisis de la susceptibilidad de remociones en masa	135
11.4	Antecedentes hidrológicos	137
11.4.1	Valores de precipitación diaria.....	137
11.4.2	Registro de las precipitaciones mensuales en la estación meteorológica Iquique	138
11.5	Catastro de peligros que han afectado a la comuna de Iquique	139
11.5.1	Catastro de maremotos	139
11.5.2	Catastro de remociones en masa	141
11.5.3	Catastro de sismos	146
11.6	Mapas de susceptibilidad de generación de procesos de laderas	149
11.7	Análisis geotécnico de canteras	156
11.7.1	Introducción	156
11.7.2	ANTECEDENTES GEOTECNICOS DEL AREA	157
11.7.3	ANÁLISIS DE ESTABILIDAD Y ALCANCES.....	177
11.7.4	Conclusiones y recomendaciones	205
11.7.5	Glosario	208
11.8	Antecedentes adicionales	209

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 2.1-1: Diagrama de flujo del trabajo realizado	15
Ilustración 3.1-1: Generación de deslizamientos en el borde costero por desarrollo de terrazas de abrasión marina.	24
Ilustración 7.1-1: Sismos de subducción históricos con magnitud estimada y calculada mayor a 7,2 y sus áreas de ruptura	85
Ilustración 11.1-1: Etapas de evaluación de un evento geológico peligroso.	112
Ilustración 11.2-1: Contexto geodinámico y margen de subducción de Chile.	114
Ilustración 11.2-2: Tipos de sismos que ocurren en un margen de subducción (explicación en el texto).	115
Ilustración 11.2-3: Tipos de falla y esfuerzos asociados	116
Ilustración 11.2-4: Tipos de ondas sísmicas	117
Ilustración 11.2-5: Amplificación de la vibración generada por un terremoto.	117
Ilustración 11.2-6: Peligros volcánicos asociados a la erupción de un volcán.	119
Ilustración 11.2-7: Clasificación de los tipos de inundación.	123
Ilustración 11.2-8: Mecanismo de formación de un maremoto asociado a un terremoto cuyo epicentro es submarino.	124
Ilustración 11.2-9: Comparación entre olas generadas por el viento y frente de olas de un maremoto.	124
Ilustración 11.2-10: Mecanismo de generación de maremotos por erupciones volcánicas submarinas.	125
Ilustración 11.2-11: Mecanismo de generación de maremotos asociados a deslizamientos.	125
Ilustración 11.2-12: Elementos básicos considerados en la escala de magnitud Inamura-lida, definida por Wiegel (1970).	127
Ilustración 11.2-13: Clasificación de tipos de remociones en masa con relación al movimiento que lo origina y el tipo de material constituyente de la dadera.	129
Ilustración 11.2-14: Ejemplos de deslizamientos. A Deslizamiento rotacional. B Deslizamiento traslacional.	132
Ilustración 11.3-1: Análisis de la peligrosidad de inundaciones o inundabilidad	134
Ilustración 11.3-2: Adaptación de la metodología propuesta por PMA-CGA (2007) para la evaluación de la susceptibilidad asociada a los movimientos en masa.	136

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1: Ubicación de los sectores de estudio y áreas de restitución en la comuna de Iquique.	17
Figura 2-2: Recorridos de terreno realizados durante las campañas de terreno en los sectores de estudio en marzo y en mayo de 2018.	21
Figura 3-1: Cartas de elevaciones en cada sector de estudio.	25
Figura 3-2: Cartas de pendientes en cada área de restitución.	26
Figura 3-3: Dominios geomorfológicos principales en el borde costero de la comuna de Iquique.	27
Figura 3-4: Mapa geológico de los sectores de estudio.	33
Figura 3-5: Leyenda extendida del mapa geológico de la Figura 3-4.	34
Figura 3-6: Fallas identificadas en la comuna de Iquique.	38
Figura 4-1: Catastro de afloramientos de agua en los sectores de estudio.	43
Figura 5-1: Mapa de susceptibilidad de inundación por maremoto en el sector N°1.	47
Figura 5-2: Mapa de susceptibilidad de inundación por maremoto en el sector N°2.	48
Figura 5-3: Mapa de susceptibilidad de inundación por maremoto en los sectores N°3 y 4.	49
Figura 5-4: Mapa de susceptibilidad de inundación por maremoto en el sector N°5.	50
Figura 5-5: Mapa de susceptibilidad de inundación por maremoto en el sector N°6.	51
Figura 5-6: Mapa de susceptibilidad de inundación por maremoto en el sector N°7.	52
Figura 5-7: Mapa de susceptibilidad de inundación por maremoto en el sector N°8.	53
Figura 6-1: Marca de antiguo flujo de detritos generado en quebrada Zofri y conducido por el Acantilado Costero, hacia Iquique.	56
Figura 6-2: Aluvión en caleta San Marcos	56

Figura 6-3: Conjunto Alto Playa Blanca, ubicado en un abanico aluvial.	57
Figura 6-4: Cuencas ubicadas en la vertiente occidental de la Cordillera de la Costa.	59
Figura 6-5: Grieta de tensión en talud sobre unidad no consolidada.	62
Figura 6-6: Mega avalancha en sector costero de Iquique.	63
Figura 6-7: Deslizamiento de roca y grietas de tensión en el Acantilado Costero.	63
Figura 6-8: Eventos de remociones en masa ocurridos en la comuna de Iquique, recopilados a partir de revisión bibliográfica.	64
Figura 6-9 Análisis geotécnico de canteras Sector Sur: Canteras 1 a 4	68
Figura 6-10 Análisis geotécnico de canteras Sector Norte: Canteras 5 a 8.	69
Figura 6-11 Frecuencia de deslizamientos en función de la pendiente del terreno.	70
Figura 6-12 Caída de rocas activa en sector industrial de Iquique.	74
Figura 6-13 Escarpe de Falla Zofri.	74
Figura 6-14 Viviendas sociales "Alto Playa Blanca".	75
Figura 6-15 Relictos de grandes avalanchas ocurridas en el escarpe costero.	75
Figura 6-16 Escarpes activos en ruta A-750 (camino de la Sal).	76
Figura 6-17: Mapa de susceptibilidad de remociones en masa en el sector N°1	77
Figura 6-18: Mapa de susceptibilidad de remociones en masa en el sector N°2	78
Figura 6-19: Mapa de susceptibilidad de remociones en masa en los sectores N°3 y 4.	79
Figura 6-20: Mapa de susceptibilidad de remociones en masa en el sector N°5.	80
Figura 6-21: Mapa de susceptibilidad de remociones en masa en el sector N°6	81
Figura 6-22: Mapa de susceptibilidad de remociones en masa en el sector N°7	82
Figura 6-23: Mapa de susceptibilidad de remociones en masa en el sector N°8.	83
Figura 7-1: Sismos registrados por la red sismológica mundial entre enero de 1973 y diciembre de 2017.	87
Figura 8-1: Ubicación de los centros y depósitos volcánicos recientes más próximos a la comuna de Iquique	93
Figura 11-1: Sismicidad mundial entre los años 1980 y 1990.	113
Figura 11-2: Zonas de inundación modeladas por el SHOA para la parte urbana de la ciudad de Iquique, basadas en el evento del año 1877.	140
Figura 11-3: Mapa de susceptibilidad de generación de procesos de ladera en el sector N°1.	149
Figura 11-4: Mapa de susceptibilidad de generación de procesos de ladera en el sector N°2.	150
Figura 11-5: Mapa de susceptibilidad de generación de procesos de ladera en los sectores N°3 y 4.	151
Figura 11-6: Mapa de susceptibilidad de generación de procesos de ladera en el sector N°5.	152
Figura 11-7: Mapa de susceptibilidad de generación de procesos de ladera en el sector N°6.	153
Figura 11-8: Mapa de susceptibilidad de generación de procesos de ladera en el sector N°7.	154
Figura 11-9: Mapa de susceptibilidad de generación de procesos de ladera en el sector N°8.	155
Figura 11-10: Ubicación de Canteras de extracción	156
Figura 11-11: Esquema Cantera 1	159
Figura 11-12: Fotografía tomada desde banco superior de la cantera. A la izquierda hacia la cresta del talud, y a la derecha hacia la pata.	159
Figura 11-13: Fotografía Cantera 2	160
Figura 11-14: Fotografía Cantera 3	161
Figura 11-15: Fotografía de sector descarga Cantera 3	161
Figura 11-16: Fotografía Cantera 4. A la izquierda imagen de frente a la cantera, a la derecha la fotografía apunta hacia el sur.	162
Figura 11-17: Material colgado en Cantera 4	162
Figura 11-18: Fotografía Cantera 5 - Sector Norte. A la izquierda el límite norte con las unidades expuestas, a la derecha un esquema de la potencia de las unidades.	163
Figura 11-19: Sección frontal de la Cantera 5-Norte. A la derecha fotografía mostrando disposición de quebrada en terreno. A la derecha un esquema de la disposición de unidades.	163
Figura 11-20: Fotografía Cantera 5 - Sur. Los recuadros blancos corresponden a sectores que quedaron fuera a de la panorámica.	164

Figura 11-21: Fotografía de grieta de tensión en sector de descarte de Depósitos Antrópicos.	164
Figura 11-22: Sectores geotécnicos identificados en Cantera 6	165
Figura 11-23: Fotografía Cantera 6 - Sector 1. A la izquierda fotografía del sector más norte, con Depósitos No Consolidados y Gravas de Alto Hospicio. A la derecha el contacto entre el Sector 1 y 2.	165
Figura 11-24: Fotografía de pared sobre se realiza línea geotécnica en Sector 2.	166
Figura 11-25: Fotografía de pared sobre se realiza línea geotécnica en Sector 3.	166
Figura 11-26: Fotografía Cantera 6 - Sector 4. A la izquierda el contacto Dique-Roca Caja. A la derecha sector alejado del Dique.	167
Figura 11-27: Fotografía Cantera 6 - Sector 4. Contacto Roca-Suelo.	167
Figura 11-28: Fotografía Cantera 6 - Sector 5.	168
Figura 11-29: Fotografía Satelital Cantera 7. A la izquierda estado a Agosto 2017 y a la derecha a Diciembre 2017 (Archivos Google Earth).	168
Figura 11-30: Fotografía Cantera 7. a la izquierda el sector sur y a la derecha el norte.	169
Figura 11-31: Fotografía Cantera 8.	169
Figura 11-32: Fotografía Macizo Rocosos Cantera 8.	170
Figura 11-33: Fotografía talud en corte de unidad de Gravas de Alto Hospicio	171
Figura 11-34: Contenido de sal y cementación de Halita en unidad Gravas de Alto Hospicio	172
Figura 11-35: Esquema con dirección de secciones cruzadas realizadas en área de estudio.	178
Figura 11-36: Sección geotécnica con superficies de deslizamiento - Cantera 1. Zona Achurada: Situación No sísmica. Zona café: Situación sísmica. Inicio de sección: A0. Fin de sección A1.	180
Figura 11-37: FS a lo largo de Cantera 1	181
Figura 11-38: Extensión deslizamientos Cantera 1	182
Figura 11-39: Sección geotécnica con superficies de deslizamiento - Cantera 2. Zona Achurada: Situación No sísmica. Zona café: Situación sísmica. Inicio de sección: B0. Fin de sección B1.	183
Figura 11-40: FS a lo largo de la Cantera 2	183
Figura 11-41: Extensión deslizamientos Cantera 2	184
Figura 11-42: Sección geotécnica con superficies de deslizamiento - Cantera 3. Zona Achurada: Situación No sísmica. Zona café: Situación sísmica. Inicio de sección: C0. Fin de sección C1.	185
Figura 11-43: FS a lo largo de la Cantera 3	185
Figura 11-44: Extensión deslizamientos Cantera 3	186
Figura 11-45: Sección geotécnica con superficies de deslizamiento - Cantera 4. Zona Achurada: Situación No sísmica. Zona café: Situación sísmica. Inicio de sección: D0. Fin de sección D1.	187
Figura 11-46: FS a lo largo de la Cantera 4	188
Figura 11-47: Extensión deslizamientos Cantera 4	189
Figura 11-48: Sección geotécnica con superficies de deslizamiento - Cantera 6Sx. Zona Achurada: Situación No sísmica. Zona café: Situación sísmica. Inicio de sección: H0. Fin de sección H1.	190
Figura 11-49: FS a lo largo de la Cantera 6Sx	190
Figura 11-50: Extensión deslizamientos Cantera 6Sx	191
Figura 11-51: Sección geotécnica con superficies de deslizamiento - Cantera 7. Zona Achurada: Situación No sísmica. Zona café: Situación sísmica. Inicio de sección: I0. Fin de sección I1.	192
Figura 11-52: FS a lo largo de la Cantera 7	192
Figura 11-53: Extensión deslizamientos Cantera 7	193
Figura 11-54: Proyección Estereográfica Cantera 5-Sur. A la izquierda red estereográfica y a la derecha roseta de rumbos.	194
Figura 11-55: Proyección Estereográfica Cantera 6-Rx. A la izquierda red estereográfica y a la derecha roseta de rumbos.	195
Figura 11-56: Proyección estereográfica Cantera 8. A la izquierda red estereográfica y a la derecha roseta de rumbos.	195
Figura 11-57: Sección geotécnica Cantera 5N. Depósitos No Consolidados: Enrejado Rojo. Depósitos Antrópicos: Achurado Negro. Gravas de Alto Hospicio: Achurado Naranja. Formación Punta Barranco: resto del área.	197

Figura 11-58: Valores de SF alrededor de estructuras en el talud para Cantera 5N.	197
Figura 11-59: Sección geotécnica Cantera 6Rx. Achurado verde corresponde a Formación Punta Barranco, achurado amarillo Gravas de Alto Hospicio. Se incorporan resultados de modelo sísmico, plateados con SF.	198
Figura 11-60: Valores de SF alrededor de estructuras en el talud para Cantera 6Rx.	198
Figura 11-61: Sección geotécnica Cantera 8. Achurado verde corresponde a Formación Punta Barranco, achurado amarillo Gravas de Alto Hospicio. Se incorporan resultados de modelo sísmico, plateados con SF.	199
Figura 11-62: Valores de SF alrededor de estructuras en el talud para Cantera 8.	199
Figura 11-63: Distancia de Caída de Rocas - Cantera 5	200
Figura 11-64: Extensión caída de rocas - Cantera 5	201
Figura 11-65: Distancia de Caída de Rocas - Cantera 6Rx	201
Figura 11-66: Extensión Caídas de Rocas - Cantera 6, incluye sector roca y suelo.	202
Figura 11-67: Distancia de Caída de Rocas – Cantera 8	202
Figura 11-68: Distribución de tamaño de caída de rocas en base a su peso – Cantera 8.	203
Figura 11-69: Extensión Caídas de Rocas - Cantera 8.	204
Figura 11-70 Inventario de remociones en masa de Opazo et al. (2018).	209

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1.4-1: Cuadro de homologación “áreas de riesgo” según el artículo 2.1.17 del OGUC.	14
Cuadro 2.2-1: Sectores de estudio y áreas de restitución en la comuna de Iquique.	16
Cuadro 3.1-1: Numeración de planos de los mapas de geología.	30
Cuadro 3.2-1: Estaciones meteorológicas utilizadas en el análisis.	39
Cuadro 3.2-2: Valores representativos de las precipitaciones mensuales en la estación Iquique.	39
Cuadro 3.2-3: Precipitaciones máximas en 24 horas asociadas a diferentes períodos de retorno en la estación Iquique, según una distribución Gamma.	40
Cuadro 5.3-1: Numeración de figuras de los mapas de susceptibilidad de inundación por maremoto.	46
Cuadro 5.3-2: Numeración de planos de los mapas de susceptibilidad de peligros geológicos.	46
Cuadro 6.1-1: Principales eventos de precipitaciones en Iquique.	55
Cuadro 6.1-2: Numeración de figuras de los mapas de susceptibilidad de remociones en masa por flujos de barro y/o detritos	61
Cuadro 6.2-1: Categorías de susceptibilidad de generación de procesos de ladera	71
Cuadro 6.2-2: Numeración de figuras de los mapas de susceptibilidad de remociones en masa por procesos de ladera	76
Cuadro 7.1-1: Sismos de subducción históricos con magnitud estimada y calculada mayor a 7,2.	85
Cuadro 8.1-1 Principales centros volcánicos geológicamente activos en sectores cercanos a la comuna de Iquique	94
Cuadro 9.1-1: Resumen de factores que condicionan y desencadenan cada peligro geológico y criterios de zonificación de la susceptibilidad	96
Cuadro 9.2-1: Criterios de zonificación para la susceptibilidad de cada peligro estudiado.	98
Cuadro 9.3-1: Recomendaciones específicas por cantera.	100
Cuadro 11.2-1: Peligros asociados al volcanismo.	121
Cuadro 11.2-2: Escala de grados de maremotos, según Inamura	126
Cuadro 11.2-3: Escala de grados de maremotos según lida	127
Cuadro 11.2-4: Escala de graos de maremoto según Inamura e lida, transcrita por Wiegel	127
Cuadro 11.5-1: Registro de eventos de maremotos que han afectado a las costas de Iquique desde 1868.	139
Cuadro 11.5-2: Registro de eventos de remociones en masa en la comuna de Iquique a partir de recopilación bibliográfica.	141
Cuadro 11.5-3: Registro de eventos de remociones en masa observados en terreno.	144
Cuadro 11.5-4: Registro de eventos de sismos que han afectado a la comuna de Iquique desde el s/XVII.	146

Cuadro 11.7-1: Resumen línea geotécnica Cantera 6 - Sector 2	166
Cuadro 11.7-2: Resumen línea geotécnica Cantera 6 - Sector 3	167
Cuadro 11.7-3: Parámetros geotécnicos Gravas de Alto Hospicio	172
Cuadro 11.7-4: Parámetros geotécnicos de la unidad de Depósitos No Consolidados	173
Cuadro 11.7-5: Parámetros geotécnicos Depósitos Antrópicos	173
Cuadro 11.7-6: Resumen características geotécnicas Formación Punta Barranco - Canteras 1, 2, 3 y 4.	174
Cuadro 11.7-7: Resumen características geotécnicas Formación Punta Barranco - Cantera 5- Norte	174
Cuadro 11.7-8: Resumen características geotécnicas Formación Punta Barranco - Cantera 5- Sur	174
Cuadro 11.7-9: Resumen características geotécnicas Formación Punta Barranco - Cantera 6	174
Cuadro 11.7-10: Resumen características geotécnicas Formación Punta Barranco - Cantera 8	175
Cuadro 11.7-11: Valores de Vs30 para unidades geotécnicas del área.	175
Cuadro 11.7-12: Extensión de deslizamientos Cantera 1	181
Cuadro 11.7-13: Extensión de deslizamientos Cantera 2	184
Cuadro 11.7-14: Extensión de deslizamientos Cantera 3	186
Cuadro 11.7-15: Extensión de deslizamientos Cantera 4	188
Cuadro 11.7-16: Extensión de deslizamientos Cantera 6Sx	191
Cuadro 11.7-17: Extensión de deslizamientos Cantera 7	193
Cuadro 11.7-18: Tamaño máximo bloque y mínimo de bloque (diámetro) para canteras con Formación Punta Barranco como unidad predominante.	196
Cuadro 11.7-19: Tamaños máximos de caída de rocas para Canteras 5, 6Rx y 8.	199
Cuadro 11.7-20: Recomendaciones finales por cantera	207

ÍNDICE DE GRAFICOS

Gráfico 3.2-1: Precipitaciones máximas en 24 horas para la estación Iquique.	40
--	----

1 INTRODUCCIÓN

Los resultados de este estudio corresponden a la identificación y zonificación de las áreas urbanas susceptibles a ser afectadas por un peligro natural según las definiciones expuestas en el Apéndice 11.1 “Definiciones de peligro y riesgo usadas en este estudio”. Los resultados se presentan en mapas de riesgos y cuadros de resumen, de acuerdo con la nomenclatura propuesta por la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones (OGUC)¹. La zonificación aquí presentada sirve de base para definir las zonas de riesgo y zonas no edificables para la formulación de los respectivos instrumentos de planificación territorial (IPT).

1.1 UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio corresponde a la comuna de Iquique, ubicada en la Provincia de Iquique, Región de Tarapacá. La Comuna de Iquique tiene una superficie de 2.242 km² y limita al norte con la Comuna de Huará, al este con las comunas de Alto Hospicio y Pozo Almonte, al sur con la Comuna de Tocopilla y al oeste con el Océano Pacífico (Figura 2-1). Las principales rutas que comunican a la comuna con el resto del país son la Ruta 1, que la conectan con la Región de Antofagasta, y la Ruta 16, que la conectan con las comunas de Alto Hospicio y Pozo Almonte y con la Ruta 5.

1.2 OBJETIVOS

El objetivo de este trabajo es la elaboración del Estudio Fundado de Riesgos, relativo a los peligros de origen natural, que acompañe y entregue criterios para el desarrollo del Plan Regulador Comunal de Iquique. Asociado al objetivo propuesto, es necesario reconocer y delimitar las áreas de riesgos, de acuerdo con los criterios y definiciones expuestos en el artículo 2.1.17 de la OGUC, que han de ser incorporadas y/o adecuadas en el desarrollo del Plan Regulador Comunal de Iquique. Los peligros naturales identificados por el artículo 2.1.17 de la OGUC son:

- Zonas inundables o potencialmente inundables, debido entre otras causas a maremotos o tsunamis, a la proximidad de lagos, ríos, esteros, quebradas, cursos de agua no canalizados, napas freáticas o pantanos.
- Zonas propensas a avalanchas, rodados, aluviones o erosiones acentuadas.
- Zonas con peligro de ser afectadas por actividad volcánica, ríos de lava o fallas geológicas.

¹ Versión 6 septiembre 2017.

1.3 ALCANCE Y LIMITACIONES

Este trabajo corresponde al estudio fundado de riesgos y forma parte de “Estudios de Actualización Plan Regulador Comunal de Iquique”, que tiene por objetivo definir “áreas de riesgo” según lo establecido en el artículo 2.1.17 de la OGUC. Para ello, se recopiló la información bibliográfica y de antecedentes históricos disponibles en la literatura (libros, publicaciones científicas y prensa) que se utilizó para desarrollar una línea de base del territorio de la comuna considerando geología y geomorfología con el fin de poder identificar las condiciones del territorio que pueden relacionarse con los diversos peligros geológicos que se presentan en la comuna. Adicionalmente, estos antecedentes se analizaron para recopilar información sobre eventos de peligros geológicos ocurridos en la comuna, información que se sistematizó y clasificó según los tipos de peligros, con lo cual se generó un catastro de peligros que han afectado a la comuna y que permiten delimitar las áreas de generación, magnitudes y alcances de los diversos fenómenos, junto con permitir la identificación de los factores que condicionaron su ocurrencia. A partir del registro de eventos históricos y la identificación de condicionantes se generó un diagnóstico y zonificación para cada uno de los peligros, donde se indica cuán susceptibles son algunos sectores en ser afectados por los peligros geológicos estudiados en las áreas de restitución. Con base en lo anterior, se propusieron recomendaciones y restricciones a los criterios de zonificación urbana para el área estudiada.

El reconocimiento y la delimitación de las áreas de riesgos en este estudio se restringen a los sectores que cuentan con los insumos topográficos adecuados para analizar el territorio a una escala de detalle adecuada para este Plan Regulador Comunal (1:1.000 y 1:5.000 en este caso). Por consiguiente, los análisis de detalle se limitan a las “áreas de restitución” que disponen de información topográfica y ortofotos digitales generados como base para el presente estudio; complementariamente, se analizó el entorno de las áreas de restitución, con el fin caracterizar el contexto en que se desarrollan los procesos que pudiesen originarse en estos y afectar las áreas de detalle. El análisis del entorno de las áreas de restitución no son parte de los alcances de este estudio y por lo tanto no se presentan los resultados de este.

Por otro lado, debido a las limitaciones de los catastros elaborados, no se llevó a cabo un análisis de períodos de retorno (es decir, de peligrosidad o amenaza). En consecuencia, los mapas entregados corresponden a mapas de susceptibilidad y de factores condicionantes (ver las definiciones presentadas en el Apéndice 11.1 “Definiciones de peligro y riesgo usadas en este estudio”).

Se debe destacar que los resultados de este trabajo no deberían utilizarse a una escala más detallada que la de referencia (1:5.000 o 1:1.000, según corresponda), ya que esto puede llevar a errores en la planificación territorial.

1.4 MARCO JURÍDICO

La Ordenanza General de Urbanismo y Construcción (OGUC), en su apartado 2.1.17 “Disposiciones complementarias” indica lo siguiente:

En los planes reguladores podrán definirse áreas restringidas al desarrollo urbano, por constituir un riesgo potencial para los asentamientos humanos. Dichas áreas, se denominarán “zonas no edificables” o bien, “áreas de riesgo”, según sea el caso, como se indica a continuación:

Por “zonas no edificables”, se entenderán aquéllas que por su especial naturaleza y ubicación no son susceptibles de edificación, en virtud de lo preceptuado en el inciso primero del artículo 60° de la Ley General de Urbanismo y Construcciones. En estas áreas sólo se aceptará la ubicación de actividades transitorias.

Por “áreas de riesgo”, se entenderán aquellos territorios en los cuales, previo estudio fundado, se limite determinado tipo de construcciones por razones de seguridad contra desastres naturales u otros semejantes, que requieran para su utilización la incorporación de obras de ingeniería o de otra índole, suficientes para subsanar o mitigar tales efectos.

En el marco de este informe, las “áreas de riesgo” son definidas como las zonas susceptibles a ser afectadas por un peligro geológico, puesto que la zonificación se realizó a partir de mapas de susceptibilidad y de factores condicionantes (ver las definiciones presentadas en el Apéndice 11.1 “Definiciones de peligro y riesgo usadas en este estudio”).

En el Cuadro 1.4-1 se presentan los peligros naturales definidos en el artículo 2.1.17 de la OGUC y la homologación con la nomenclatura internacional utilizada por este informe, así como la definición de estos peligros geológicos y los criterios de zonificación a utilizar.

Cuadro 1.4-1: Cuadro de homologación “áreas de riesgo” según el artículo 2.1.17 del OGUC.

“Áreas de riesgo” según artículo 2.1.17 de la OGUC	Peligros Geológicos estudiados en este informe		Descripción conceptual	Análisis del peligro
1. Zonas inundables o potencialmente inundables, debido entre otras causas a maremotos o tsunamis, a la proximidad de lagos, ríos, esteros, quebradas, cursos de agua no canalizados, napas freáticas o pantanos	Inundaciones terrestres	Por desborde de cauce	Apéndice 11.2. a)	Capítulo 4
		Anegamiento		Capítulo 5
	Inundaciones litorales	Maremoto		
2. Zonas propensas a avalanchas, rodados, aluviones o erosiones acentuadas	Remociones en masa	Flujos de barro y/o detritos.	Apéndice 11.2.b)	Capítulo 6
		Procesos de ladera		
3. Zonas con peligro de ser afectadas por actividad volcánica, ríos de lava o fallas geológicas	Sismicidad		Apéndice 11.2.a)	Capítulo 7
	Volcanismo	Peligros asociados al volcanismo, como flujos de piroclastos, caída de piroclastos, coladas de lava o lahares, entre otros.	Apéndice 11.2.b)	Capítulo 8

Fuente: Elaboración propia en base a lo establecido en art. 2.1.17 OGUC

2 METODOLOGÍA

2.1 INTRODUCCIÓN

El objetivo del Estudio de Riesgos de Iquique es generar mapas de susceptibilidad para las áreas urbanas de la comuna, para dar cumplimiento al Artículo 2.1.17 de la OGUC. Como parte del proceso para generar los mapas de susceptibilidad, la metodología general del estudio contempla realizar las siguientes tareas, las que se encuentran resumidas en la Ilustración 2.1-1.

1. Definición del estudio
2. Elaboración de una línea de base geológica y geomorfológica
3. Catastro de peligros geológicos
4. Zonificación de susceptibilidad de peligros geológicos
5. Propuesta de criterios de zonificación urbana

Ilustración 2.1-1: Diagrama de flujo del trabajo realizado



2.2 DEFINICIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO Y DE LA ESCALA DE TRABAJO

El área de estudio corresponde a la comuna de Iquique, con énfasis en seis “áreas de restitución” (como se referirán a lo largo de este documento) comprendidas en ocho sectores de estudio (Cuadro 2.2-1 y Figura 2-1).

Adicionalmente, para cada sector de estudio, se definió un “área de influencia” (como se referirá a lo largo de este documento), cuyo límite corresponde a la divisoria de agua de las cuencas hidrográficas aportantes a las áreas de restitución; esto con el fin de estudiar los sectores aledaños al límite del área de restitución que pueden influir en la ocurrencia de peligros geológicos.

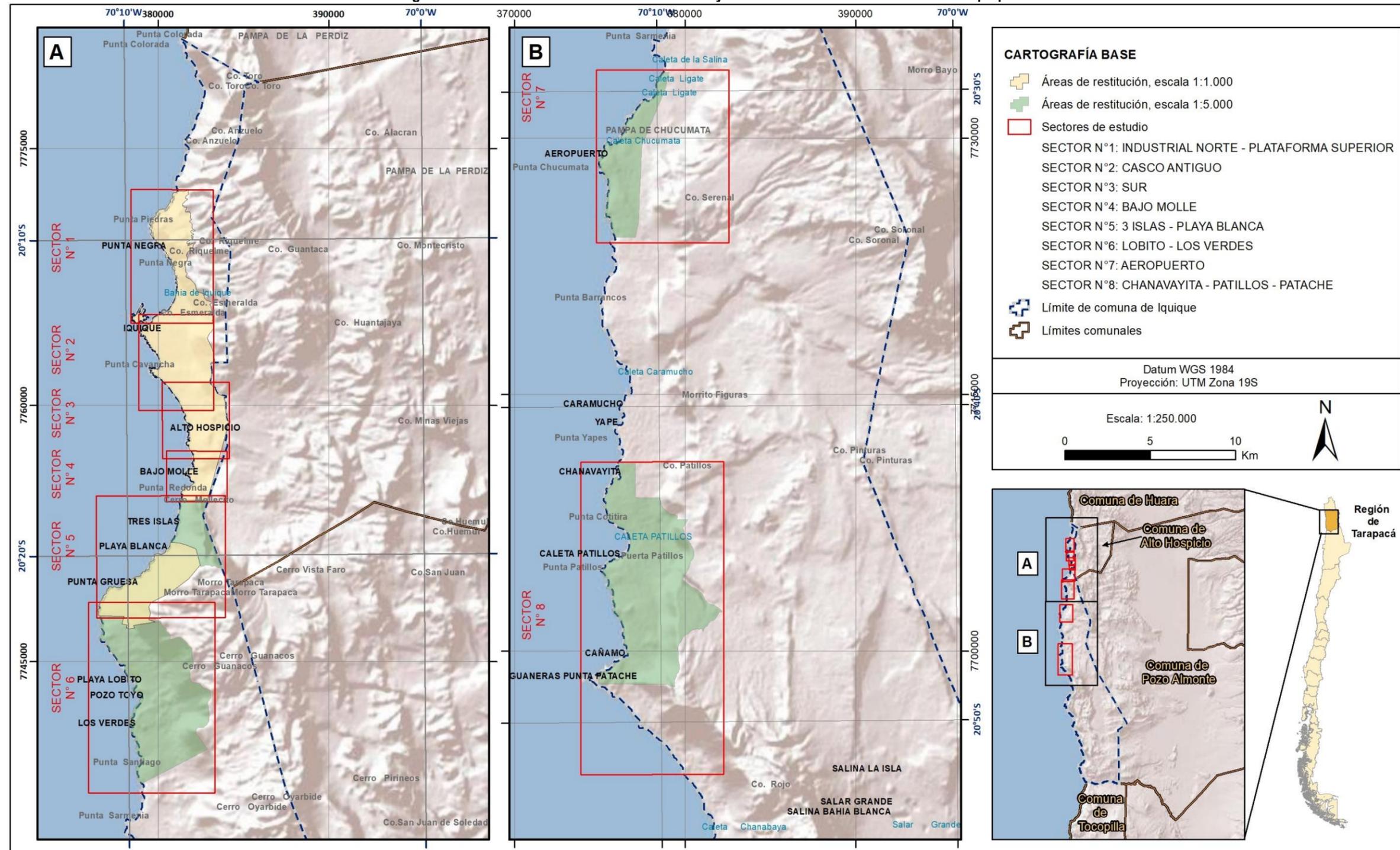
La escala de trabajo elegida para el desarrollo del estudio corresponde a la escala 1:50.000 para el área de influencia y 1:5.000 y 1:1.000 para las áreas de restitución, según corresponda (Cuadro 2.2-1).

Cuadro 2.2-1: Sectores de estudio y áreas de restitución en la comuna de Iquique.

N° Sector	Nombre Sector	Nombre área de estudio	Escala de trabajo
1	Sector Industrial Norte - Plataforma Superior	Área Iquique	1:1.000
2	Sector Casco Antiguo		
3	Sector Sur		
4	Sector Bajo Molle		
5	Sector Tres Islas - Playa Blanca	Área Tres Islas, Lobito y Los Verdes	1:5.000
		Área Playa Blanca	1:1.000
6	Sector Lobito - Los Verdes	Área Tres Islas, Lobito y Los Verdes	1:5.000
7	Sector Aeropuerto	Área Chucumata	1:5.000
8	Sector Chanavayita - Patillos - Patache	Área Chanavayita, Patillos, Patache	1:5.000

Fuente: Elaboración propia

Figura 2-1: Ubicación de los sectores de estudio y áreas de restitución en la comuna de Iquique.



Fuente: Elaboración propia

2.3 LÍNEA DE BASE

2.3.1 Geología y geomorfología

La caracterización de la geología y la geomorfología tiene como objetivo caracterizar las unidades de rocas, los depósitos, las estructuras geológicas y las formas presentes en la comuna (área de estudio general), y particularmente en el área de estudio específica, para identificar las zonas que han sido afectadas por los distintos peligros de origen geológico y reconocer las zonas que presentan condiciones favorables para la ocurrencia de estos.

En este contexto, se construyeron las líneas de base de geología y geomorfología a partir de los siguientes antecedentes bibliográficos²:

- Cartas Iquique y Pozo Almonte, Región de Tarapacá., escala 1:100.000 (Vásquez & Sepúlveda, 2013).
- Cartas Patillos y Oficina Victoria, Región de Tarapacá, escala 1:100.000 (Sepúlveda, Vásquez, & Quezada, 2014).
- Base Geológica (Mapa 1) de Geología para el Ordenamiento Territorial y la Gestión Ambiental en el área de Iquique-Alto Hospicio, Región de Tarapacá, escala 1:50.000 (SERNAGEOMIN, 2013).
- Carta geológica de Iquique y Alto Hospicio, escala 1:25.000. (Marquardt, Marinovic, & Muñoz, 2008).
- Mapa geológico de Chile, escala 1:1.000.000 (SERNAGEOMIN, 2003).
- Cuadrángulos Iquique y Caleta Molle, Provincia Tarapacá, escala 1:50.000 (Thomas, 1970).

Los estudios antes mencionados presentan algunos problemas que dificultan su utilización de manera directa. En este sentido, los dos estudios de mayor escala no tienen un nivel de detalle suficiente para los objetivos propuestos, ni cubren la totalidad del área de la comuna de Iquique. Por otra parte, el “Mapa geológico de Chile”, cubre la totalidad del área estudiada, pero el nivel de detalle es insuficiente. Otro problema que dificulta la aplicación directa de estos trabajos es que no se hace una diferenciación de los tipos de depósitos que hay en ella, lo que constituye un antecedente fundamental para el análisis de los peligros.

Para adecuar esta información a la escala de trabajo, se utilizó información proveniente del levantamiento topográfico que se realizó en las áreas de restitución con motivo de este estudio, como un Modelo Digital de Terreno³ (DTM por sus siglas en inglés), curvas de nivel⁴ y ortofotos digitales⁵. Con esta información, se construyeron cartas de parámetros morfométricos (como pendientes y relieve sombreado) que se utilizaron como apoyo para la identificación de los principales depósitos no consolidados y son considerados un factor condicionante para la elaboración de mapas de susceptibilidad.

Complementariamente, se realizaron dos visitas a terreno (ver sección 2.4.2), cuyos resultados se integraron con la interpretación de fotografías aéreas⁶ e imágenes satélites⁷, lo cual permitió delimitar los principales contactos entre los distintos depósitos no consolidados, tales como depósitos aluviales, depósitos litorales,

² Durante las etapas de observaciones de este estudio, fue publicado el trabajo del Sernageomin “Peligros geológicos del área de Iquique-Alto Hospicio, Región de Tarapacá, 1:20.000”, de Opazo et al. (2018). Dicho estudio, por solicitud del Sernageomin establecida en el oficio ORD N° 1154/2022, con fecha 14/09/2022, fue debidamente analizado, y se incorporaron a este informe los antecedentes que fueron considerados relevantes. Las observaciones planteadas en dicho oficio, fueron respondidas y presentadas en reunión virtual con el Director (S) del Sernageomin Tarapacá, Christian Ibáñez, y el geólogo del Sernageomin Tarapacá Enrique Opazo, el día 14/11/2022.

³ DTM con un tamaño de celda de 0,5x0,5 m (para la escala 1:1.000) y de 3x3 m (para la escala 1:5.000).

⁴ Curvas de nivel separadas cada 1 m (para la escala 1:1.000) y cada 5 m (para la escala 1:5.000).

⁵ Ortofotos digitales con tamaño de celda de 0,2x0,2 m (para la escala 1:1.000) y de 0,4x0,4 m (para la escala 1:5.000).

⁶ Fotos aéreas a escala 1:4.000 (para escala de trabajo 1:1.000) y 1:20.000 (para escala de trabajo 1:5.000). Además, se consideró en los análisis una fotografía del año 1968 de la ciudad de Iquique (fuente: USGS).

⁷ Catálogo de imágenes satelitales disponibles en la plataforma Google Earth y Bing Maps ©

depósitos fluviales, depósitos eólicos, entre otros. Además, se identificaron los principales cauces y sus llanuras de inundación.

2.3.2 Hidrología

Como parte de la caracterización de la hidrología, se recopilaron antecedentes de precipitaciones en la zona costera y la depresión intermedia, incluyendo estaciones ubicadas fuera de la Región de Tarapacá. Posteriormente, se seleccionaron estaciones representativas de las precipitaciones en la zona y se analizaron los valores del registro. De manera complementaria, se caracterizó el clima de la comuna.

2.4 CATASTRO DE PELIGROS GEOLÓGICOS

La identificación y catastro de peligros geológicos se realizó diferenciando los procesos endógenos, que se asocian a procesos que se originan en el interior de la Tierra (sismicidad y volcanismo), de los exógenos, que se relacionan con procesos que ocurren en el exterior de la tierra, como inundaciones y remociones en masa.

El hecho que un sector en particular haya sido afectado en el pasado por algún peligro geológico en particular es un indicativo de que dicho sector puede ser afectado por una situación similar. Por esta razón se construyó un catastro que tiene como objetivo recopilar antecedentes relativos a peligros geológicos que han afectado al área de estudio, con la finalidad de identificarlos, ubicarlos espacialmente y ordenarlos cronológicamente, si esto último es posible.

Los peligros geológicos catastrados corresponden a aquellos contenidos dentro del artículo 2.1.17 de la OGUC, y se trataron con los nombres explicados en la sección 1.4 “Marco jurídico”, resumidos en el Cuadro 1.4-1.

2.4.1 Recopilación bibliográfica

Parte importante de los antecedentes relativos a peligros que han afectado al área de estudio se encuentran en antecedentes bibliográficos (recopilaciones históricas, archivos de prensa, publicaciones científicas, catastros de eventos peligrosos, catastro de eventos sísmicos, etc.). Se recogió información contenida en estos documentos y se sistematizó, identificando, en la medida que fuera posible, la fecha de ocurrencia y los sectores afectados.

Las fuentes utilizadas para la construcción del catastro fueron:

- Publicaciones científicas, estudios técnicos y trabajos de recopilación histórica (como Urrutia y Lanza (1993), González-Ferrán (1995), ONEMI (2009a; 2009b), Lara *et al.* (2011), entre otros.
- Artículos periodísticos de diarios de la zona (como La estrella de Iquique)
- Páginas web (como CSN, SHOA, USGS, entre otros).
- Material entregado por la Contraparte Técnica, incluyendo estudios realizados por la ONEMI (2017a; 2017b; ONEMI, 2017c), por la DOH (ARCADIS-MOP, 2012) y por el SERNAGEOMIN (2013).

El catastro recopila, para cada evento, información acerca de la fecha de ocurrencia, tipo de peligro, descripción del evento, intensidad y zonas afectadas. En nivel de detalle de la información depende del grado de información existente y, por lo general, para los eventos más recientes se tienen descripciones más detalladas y exactas. De esta manera, los peligros catastrados son:

1. Inundaciones terrestres: se consideraron los eventos generados por temporales que tuvieron efectos directos en las comunidades.

2. Inundaciones litorales: se consideraron los registros de eventos de tsunamis que han afectado a la comuna de Iquique.
3. Remociones en masa: se consideraron los eventos generados por temporales y eventos sísmicos que originaron algún tipo de remoción en masa dentro de la misma comuna de Iquique y/o sus alrededores y que tuvieron efectos directos en las comunidades.
4. Sismos históricos: se consideraron los sismos, obtenidos a partir de información bibliográfica, cuyos epicentros se ubicaron ya sea en la comuna de Iquique, o bien, en la misma región, o cuyos efectos afectaron directamente la zona.

2.4.2 Campañas de terreno

Como parte de este estudio, se realizaron dos campañas de terreno con diferentes objetivos:

- La primera campaña de terreno, llevada a cabo entre los días 19 al 21 de marzo de 2018, consistió en realizar un reconocimiento general de los 8 sectores a estudiar, con énfasis en la identificación de depósitos no consolidados y de zonas afectadas o propensas a ser afectadas por peligros geológicos. Además, el martes 20 de marzo, el equipo en terreno de Xterrae participó en el "I Taller de Diagnóstico de Amenazas" realizado en el marco del estudio "Diagnóstico Área Metropolitana en la Región de Tarapacá", contratado por el Departamento de Planificación y Ordenamiento Territorial de la División de Planificación y Desarrollo Regional del Gobierno Regional de la Región de Tarapacá. En este taller se intercambió información con una mesa técnica interinstitucional integrada por diversos grupos de actores, e instituciones con diferentes intereses, que permitieron priorizar los peligros geológicos que afectan a la ciudad de Iquique. Por otra parte, el miércoles 21 de marzo, el equipo en terreno se reunió con algunos actores relevantes, entre ellos el Gobierno Regional de Tarapacá, la ONEMI de Tarapacá, la Dirección de Obras Hidráulicas y el SERNAGEOMIN, con el fin de aclarar y disponer de fuentes de información útiles para el estudio de riesgos.
- La segunda campaña de terreno se realizó desde el lunes 30 de abril al miércoles 2 de mayo de 2018, con el objetivo de recolectar datos locales, complementar el catastro realizado, realizar observaciones directas de las condiciones geológicas y geomorfológicas del área estudiada, validar metodologías para el análisis de susceptibilidad de los peligros a estudiar y dimensionar la escala de los procesos que ocurren dentro del área del PRC de Iquique.

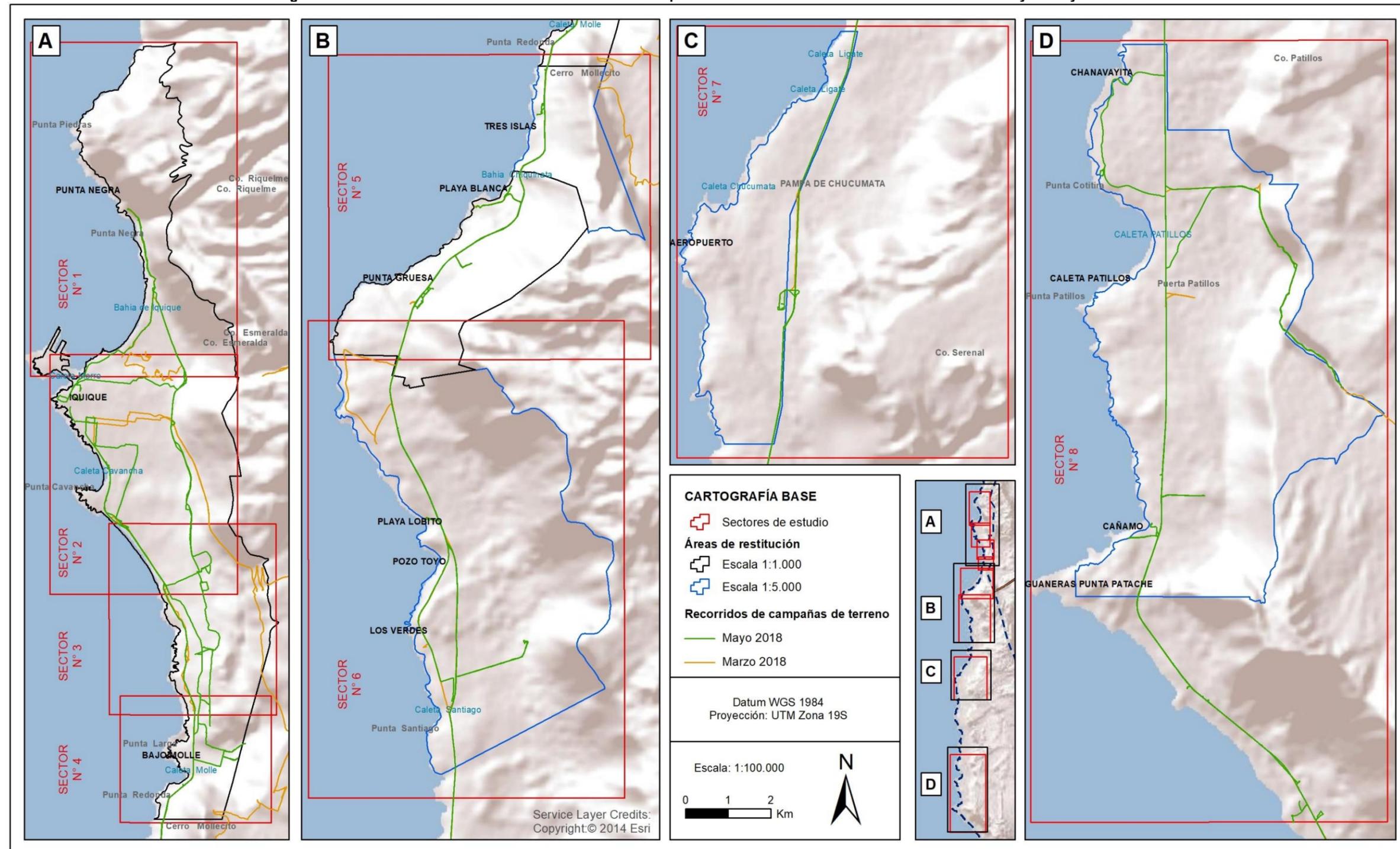
Los recorridos realizados en las dos campañas de terreno se muestran en la Figura 2-2. A lo largo del recorrido, se realizaron observaciones de detalle que se registraron mediante fotografías y en planos.

2.5 DIAGNÓSTICO DE PELIGROS GEOLÓGICOS

El diagnóstico tiene como objetivo sistematizar la información disponible para determinar los factores que condicionan la ocurrencia de los peligros reconocidos, para que se pueda definir, con el mayor grado de certeza posible, los sectores que se encuentran expuestos a los peligros analizados en la zona estudiada.

Para cumplir con lo anterior, se integró la información contenida en la caracterización del área de estudio (líneas de base de geología y geomorfología y estudio hidrológico) con el catastro de peligros geológicos, considerando las características físicas de cada uno de los peligros estudiados y metodologías reconocidas que se puedan aplicar a cada uno de ellos, dadas las condiciones de la zona estudiada.

Figura 2-2: Recorridos de terreno realizados durante las campañas de terreno en los sectores de estudio en marzo y en mayo de 2018.



Fuente: Elaboración propia

2.6 ZONIFICACIÓN DE SUSCEPTIBILIDAD DE PELIGROS GEOLÓGICOS

En consideración de la escala de trabajo elegida para el desarrollo del estudio, para la zonificación de susceptibilidad se agruparon los peligros geológicos de acuerdo con los siguientes criterios:

- **Peligros No Zonificables a escala urbana:** Corresponde a los peligros geológicos de Volcanismo y Sismicidad. Dada la magnitud de estos peligros, las áreas afectadas no son representables y/o diferenciables a una escala urbana (mayor a 1:10.000), y solo pueden analizarse en un contexto regional (escala 1:100.000 o menor).
- **Peligros Zonificables a escala urbana:** Corresponde a los peligros de Remociones en Masa e Inundaciones Litorales y Terrestres. Estos peligros son representables a una escala urbana, pudiendo diferenciarse claramente, dada la escala de trabajo, que áreas son más susceptibles a la ocurrencia de un peligro geológico dado. Por ejemplo, las zonas de mayor pendiente son más favorables a la ocurrencia de deslizamientos que las áreas planas.

Dentro de las metodologías para la zonificación de susceptibilidad de peligros geológicos no se elaboraron modelos numéricos, porque no se consideraron adecuados para modelar las amenazas que existen en la comuna.

Considerando lo anterior, en el Apéndice 11.3, se presentan las distintas metodologías utilizadas para la zonificación de los peligros geológicos considerados zonificables a la escala de trabajo elegida.

2.7 PROPUESTA DE CRITERIOS DE ZONIFICACIÓN URBANA

Con base en los resultados de la zonificación de la susceptibilidad, se proponen criterios que restringen la utilización del área urbana según cada uno de los peligros analizados. Esto ha considerado, simultáneamente, la exposición a los peligros, es decir, que existan condiciones para que las localidades se desarrollen de manera segura, y el requerimiento de espacio para que las localidades de la comuna puedan desarrollarse.

En consecuencia, existen zonas que, pese a estar expuestas a alguno de los peligros que se analizan en este trabajo, se ha recomendado que se puedan utilizar, pero con ciertas restricciones. Lo anterior aplica para aquellos peligros que tienen un potencial menor para generar daños o que pueden afectar una porción muy grande de las localidades.

3 LÍNEA DE BASE

3.1 LÍNEA DE BASE DE GEOLOGÍA Y GEOMORFOLOGÍA⁸

3.1.1 Marco geodinámico

Chile se ubica en un margen convergente de placas tipo océano-continente, donde la Placa Oceánica de Nazca subducta a la placa Continental Sudamericana bajo su margen occidental (Uyeda & Kanamori, 1979). Esta subducción, cuya tasa actual de convergencia se estima en 8 cm/año (DeMets, Gordon, Argus, & Stein, 1994), se reconoce activa desde, al menos, el Jurásico (Mpodozis & Ramos, 1989) y ha tenido variaciones en la tasa de convergencia durante el Eoceno – Mioceno que van desde 5 a 15 cm/año (Somoza, 1998).

El área de estudio se encuentra alrededor de los 20° S, por lo que se considera una zona de subducción normal. Ya que, de acuerdo con el esquema de segmentación andina de Mpodozis y Ramos (1989), la zona ubicada al norte de los 27° S se identifica como una zona de subducción normal con un ángulo de subducción de aproximadamente 30°. El margen oeste de la placa Sudamericana tiene un rumbo aproximado NS a lo largo de toda la región, desde los 18,5°S, en la zona del denominada “codo de Arica”, hacia el sur.

La acumulación y posterior relajación de los esfuerzos producto del régimen de subducción es la causa de que todo Chile, al norte de la península de Taitao, sea afectado frecuentemente por terremotos, como se explicará en el Capítulo 3.1.1 “Sismicidad”.

3.1.2 Marco geomorfológico

a) Unidades morfoestructurales

El segmento andino chileno comprendido entre los 19° S y los 22° S se caracteriza por la presencia de cuatro unidades fisiográficas principales dispuestas en franjas subparalelas orientadas norte – sur que, de oeste a este, son: Planicie Litoral, Cordillera de la Costa, Depresión Central, Precordillera y Cordillera de Los Andes (ej. Tosdal et al. (1984)). El límite entre la Cordillera de la Costa y la Depresión Intermedia es difuso y ocurre aproximadamente a la cota de 1.000 m. En cambio, la vertiente occidental está formada por el gran Acantilado Costero que limita a dicha cordillera con la Planicie Litoral en algunos segmentos, y con el Océano Pacífico en otros segmentos. A continuación, se describen brevemente los tres dominios geomorfológicos principales sobre los cuales se emplaza la comuna de Iquique:

i) Planicie Litoral

Corresponde a una terraza de abrasión marina, formada por transgresiones y regresiones del mar, cubierta por depósitos marino-litorales, aluviales, coluviales, eólicos y de remociones en masa (Marquardt, Marinovic, & Muñoz, 2008). Se extiende discontinuamente a través de la costa de la comuna de Iquique, con un ancho que varía entre 2 y 4 km y con una suave pendiente (entre 0 y 15°, Figura 3-2) que asciende paulatinamente hacia el este, llegando a altitudes que sobrepasan los 100 m s. n. m. aproximadamente en el contacto con el Acantilado Costero (Figura 3-1). Según Veloso y Sánchez (1991), la Planicie Litoral no es considerada como una superficie plana absoluta, pues se presenta seccionada y levemente escalonada en sentido norte-sur, debido al fuerte control de las estructuras E-W (ver sección 3.1.4). La diferencia más abrupta de esta unidad coincide con la traza de la Falla Zofri (ver sección 3.1.4), donde se observa una diferencia de altura de hasta

⁸ Durante las etapas de observaciones de este estudio, fue publicado el trabajo del Semageomin “Peligros geológicos del área de Iquique-Alto Hospicio, Región de Tarapacá, 1:20.000”, de Opazo et al. (2018). Dicho estudio, por solicitud del Semageomin establecida en el oficio ORD N° 1154/2022, con fecha 14/09/2022, fue debidamente analizado, y se incorporaron a este informe los antecedentes que fueron considerados relevantes. Para más informaciones de la línea de base de geología y geomorfología, se sugiere al lector dirigirse directamente al trabajo de Opazo et al. (2018).

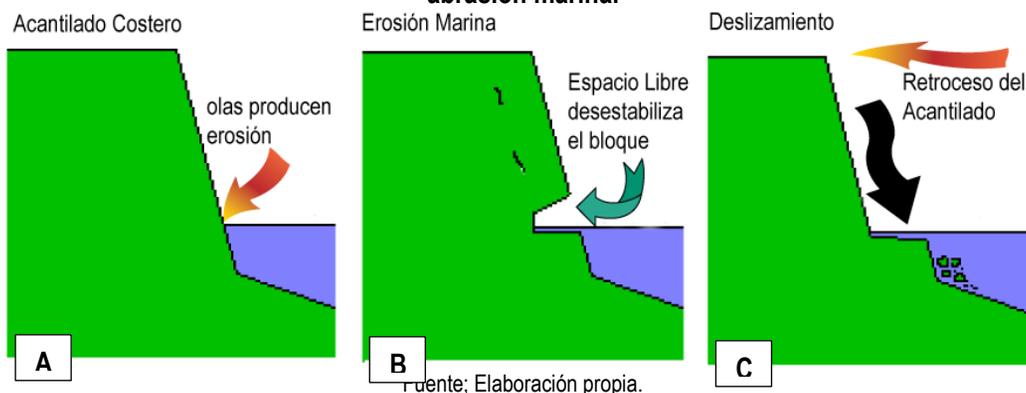
30 m entre el bloque norte y el bloque sur. La mayoría de los centros poblados, como Iquique y las caletas de la zona, están contruidos sobre estas planicies (Figura 3-3).

ii) Acantilado costero

Este rasgo morfológico corresponde a un acantilado costero que se extiende en dirección norte-sur de manera paralela a la línea de costa, al occidente de la Cordillera de la Costa, por más de 1.000 km desde el sur Arica hasta La Serena (Brüggen, 1950) y alcanza altitudes de hasta 2.000 m s. n. m. (Quezada, Cerda, & Jensen, 2010). Presenta una altura entre 350 y 500 m s. n. m. aproximadamente (superando los 850 m en el sector N°6 Lobito Los Verdes, Figura 3-1) y pendientes que van desde 15° hasta superar los 35° (Figura 3-2).

El Acantilado Costero presenta segmentos activos (Figura 3-3) en donde la erosión marina afecta la erosión del talud (en contacto directo con el mar) y otros segmentos inactivos (Figura 3-3) que se encuentran aislados de la abrasión marina debido a la presencia de la plataforma de abrasión marina emergida (Quezada, Cerda, & Jensen, 2010) correspondientes a las planicies litorales anteriormente descritas. A escala local, presenta sinuosidades que corresponderían a escarpes de mega remociones en masa dirigidas hacia la costa (Mather, Hartley, & Griffiths, 2014). En consecuencia, a partir de los procesos erosivos a los que está sometido este rasgo morfológico (Ilustración 3.1-1A), se genera una desestabilización del bloque expuesto a erosión (Ilustración 3.1-1B), ocasionando un retroceso del acantilado a raíz de la generación de deslizamientos (Ilustración 3.1-1C) que afectan directamente a la comuna de Iquique (Figura 3-3).

Ilustración 3.1-1: Generación de deslizamientos en el borde costero por desarrollo de terrazas de abrasión marina.

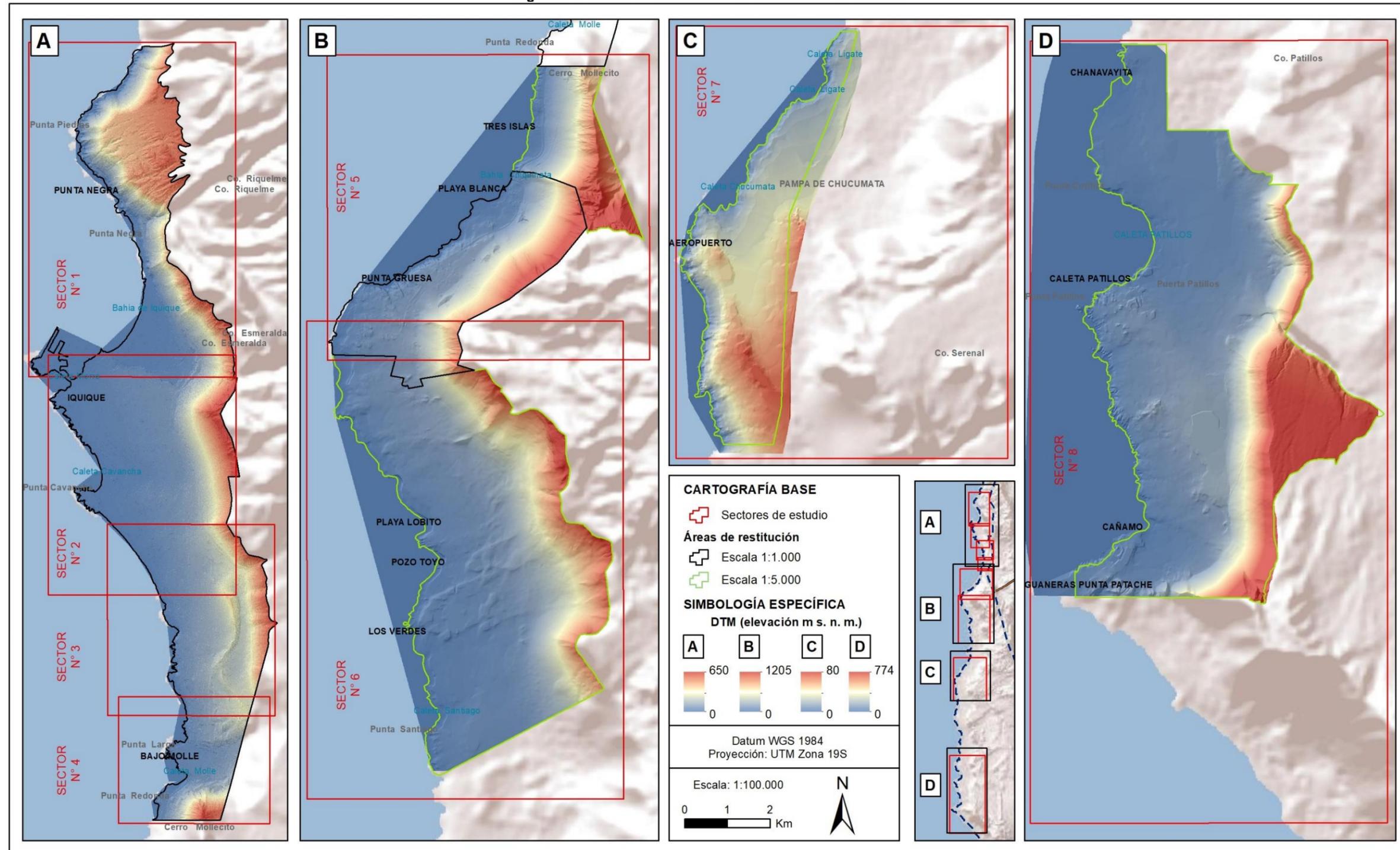


iii) Cordillera de la Costa

Corresponde a la cadena montañosa más próxima al mar. Posee un relieve de suaves lomajes con pendientes que, en general, no superan los 15°, baja altura (800 a 2.000 m s. n. m., Figura 3-1) y es relativamente angosta (su ancho promedio es de unos 40 a 45 km). Su límite occidental corresponde al Acantilado Costero. Hacia el este, disminuye gradualmente su elevación, hasta ponerse en contacto con la Depresión Central, que corresponde a un *plateau* ubicado entre 1.000 y 1.500 m s. n. m., donde se desarrollan cuencas endorreicas que permiten la acumulación de depósitos evaporíticos (salares). La comuna de Iquique se ubica sólo en el flanco occidental de la Cordillera de la Costa (Figura 3-3).

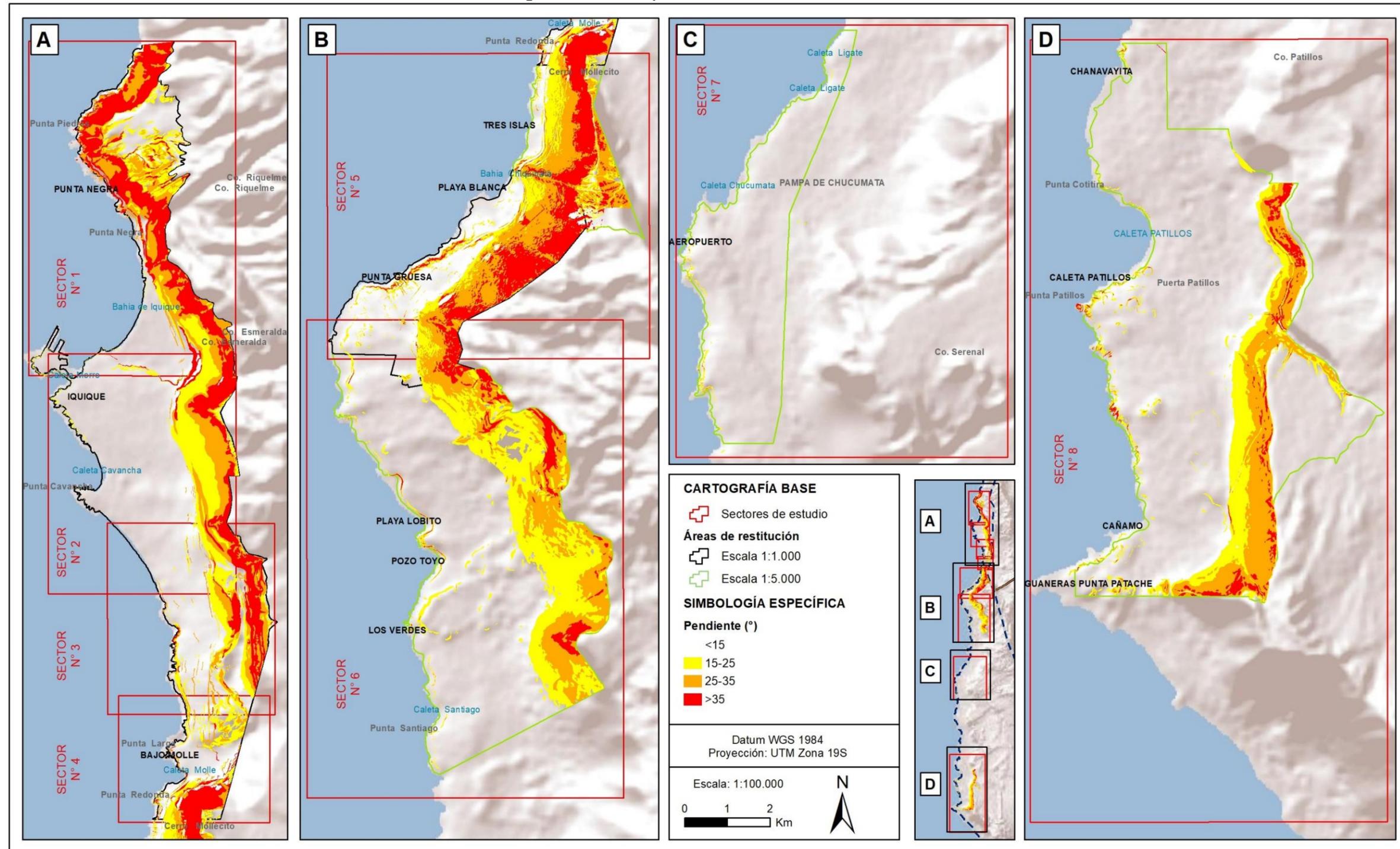
Los procesos superficiales (exógenos) que tienen relación con las formas del terreno actuales han sido poco eficientes en la degradación del relieve, debido al régimen climático de aridez (Quezada, Cerda, & Jensen, 2010). Estos procesos son de tipo litoral, fluvial, eólico y gravitacional.

Figura 3-1: Cartas de elevaciones en cada sector de estudio.



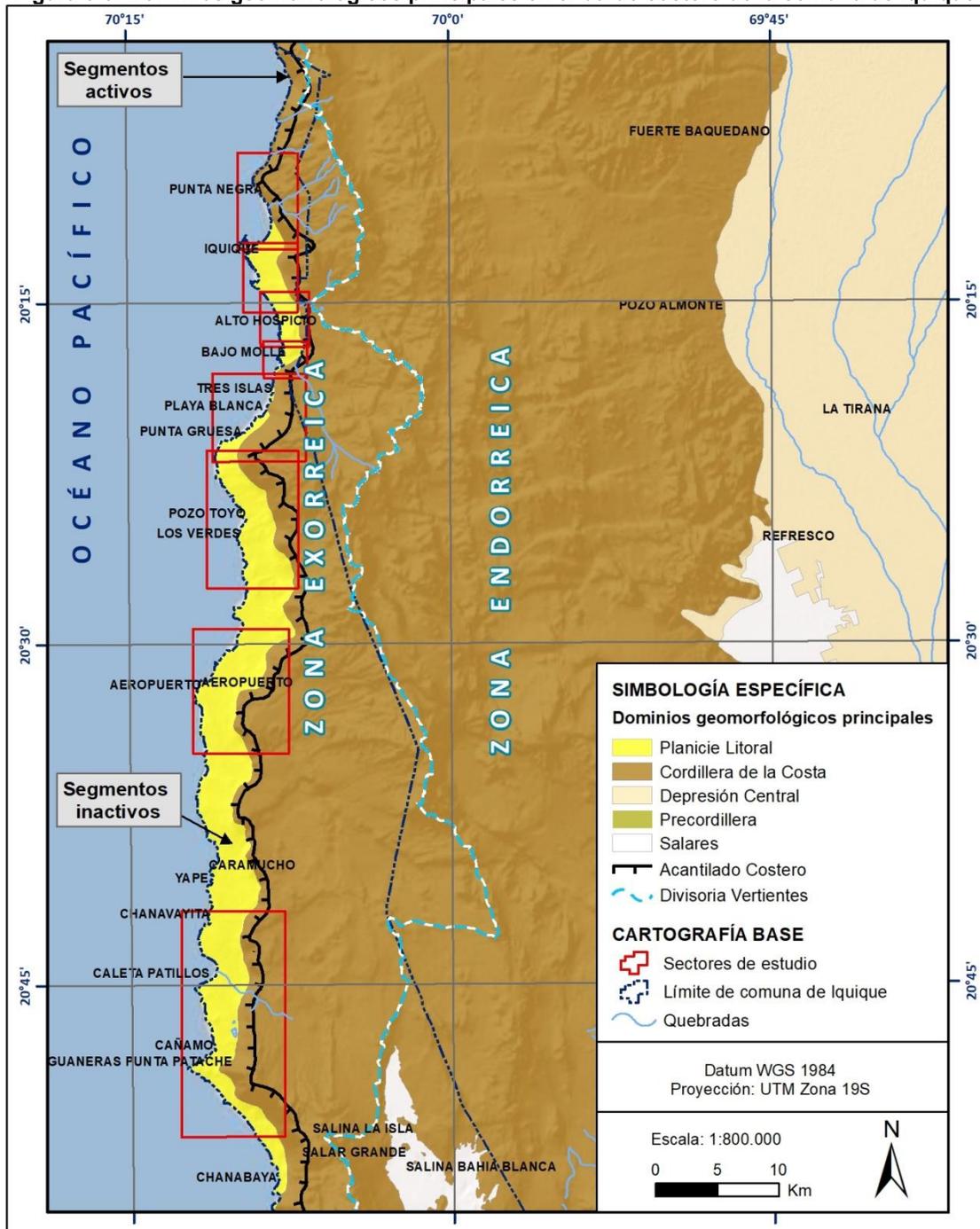
Fuente: Elaboración propia a partir de DTM entregado por GEOCEN. Se destaca que las cartas de elevaciones se restringen exclusivamente al área de restitución.

Figura 3-2: Cartas de pendientes en cada área de restitución.



Fuente: Elaboración propia a partir de DTM entregado por GEOCEN. Se destaca que las cartas de pendientes se restringen exclusivamente al área de restitución.

Figura 3-3: Dominios geomorfológicos principales en el borde costero de la comuna de Iquique.



Fuente: Elaboración propia.

b) Aspectos geomorfológicos relevantes

A continuación, se describen varios rasgos morfológicos de alcance local, que representan aspectos geomorfológicos importantes.

i) Duna del Cerro Dragón

En el área de estudio se reconoce una amplia zona de campos dunarios que se extiende intermitentemente desde Punta Cavancha hacia el sur. Estos campos dunarios corresponden a grandes acumulaciones de arenas litorales que son transportadas por el viento, y se encuentran activas debido a la removilización de sus sedimentos (SERNAGEOMIN, 2013), por lo que al removilizarse pueden cubrir depósitos antrópicos y obras civiles. En el área de estudio prevalecen procesos eólicos tanto activos como relictos.

Un rasgo singular y característico de la ciudad de Iquique es la Gran Duna del Cerro Dragón (Castro, 2004), ubicada sobre la Planicie Litoral donde se alberga la ciudad. La duna Dragón es de tipo longitudinal, con 4 km de largo, un ancho variable entre 150 y 550 m y la altura alcanza los 250 m (Sepúlveda N. , 2014); presenta una cresta aguda y sinuosa, la que es modelada por los vientos actuales, predominantemente del suroeste (Castro, 2004). La duna exhibe pendientes que van desde los 15 a los 35° en el frente occidental, y pendientes que superan los 35° en su flanco este.

Otros campos dunarios más restringidos y de menor extensión se sitúan hacia el este de la comuna de Iquique, en depresiones intermontanas en la Cordillera de la Costa (Sepúlveda N. , 2014). Es importante mencionar que el sector sur de Iquique se encuentra mayoritariamente sobre un campo dunario.

ii) Redes de drenaje

Las redes de drenajes en el borde costero en estudio están más desarrolladas y activas en el flanco occidental de la Cordillera de la Costa, cerca del Acantilado Costero (Carrizo, González, & Dunai, 2008), con tendencia en la dirección EW (Figura 3-3).

En el norte de Chile, entre los 18° a 20° S, de norte a sur, ocurre una transición en el sistema de drenaje (e.g. Mortimer (1980)). Hasta los 19°30'S aproximadamente (a la latitud de Pisagua), las cuencas son de carácter exorreico, donde existe comunicación directa entre los cauces y el mar; mientras que entre los 19°30'S hasta 26°30'S, los ríos son endorreicos (exceptuando el Río Loa, Figura 3-3) y terminan en la Depresión Central o en el sector este de la Cordillera de la Costa (Figura 3-3).

Debido a que el clima de esta región es del tipo desértico de extrema aridez (Hartley & Chong, 2002; Dunai, González, & Juez-Larré, 2005), los cauces existentes son de escorrentía esporádica, que son activados en periodos intermitentes, dejando marcas intensas en el relieve. Algunos autores sugieren que estas condiciones han prevalecido desde al menos el Mioceno medio (Dunai, González, & Juez-Larré, 2005; Carrizo, González, & Dunai, 2006), favoreciendo a las formas heredadas a ser bien preservadas.

iii) Abanicos aluviales

Los abanicos aluviales son formas que se asocian a una abrupta reducción de la pendiente de un cauce, que se traduce en una reducción de la velocidad de escurrimiento y en la consiguiente pérdida de capacidad para transportar material, lo que favorece, localmente, la depositación de sedimentos. Como el lugar en donde está ubicado el abanico aluvial se encuentra periódicamente sometido a depositación de material, las zonas más propensas al escurrimiento varían a lo largo del tiempo, lo que genera las condiciones para que el abanico

ocupe un área más ancha que el cauce que lo alimenta. En general, los abanicos aluviales presentan materiales más gruesos en la parte más alta o proximal y más fino en la parte más baja o distal.

Debido a la condición de extrema aridez local, los cauces que alimentan a los abanicos ubicados en el área de estudio presentan escurrimiento muy esporádico y acumulación de material detrítico entre eventos de precipitación, lo que favorece que los flujos que transportan material hacia ellos tengan una importante componente detrítica. Por otra parte, estos abanicos se encuentran a los pies del acantilado costero, por lo que frecuentemente caen bloques sobre ellos, que pueden ser de grandes dimensiones. En consecuencia, los flujos que escurren sobre estos abanicos pueden, eventualmente, transportar estos bloques.

Otra característica de los abanicos presentes en el área de estudio es que su extensión no es muy grande, aunque existen algunas excepciones, como los dos abanicos ubicados en Patillos y, en menor medida, el abanico asociado a las quebradas Zofri y Esmeralda.

iv) Escarpes de falla

Corresponden a notorios escarpes que dislocan el relieve, asociados a fallas activas con orientaciones preferenciales N-S y E-W (ver sección 3.1.4), rejuveneciendo el paisaje (SERNAGEOMIN, 2013). Estos escarpes que se distinguen principalmente al este del farellón costero alcanzan alturas de hasta 450 m, el desarrollo estos elementos se asocian a los procesos tectónicos de la región, con mayor actividad entre el Mioceno y el Plioceno, han perdurado gracias a la hiperaridez del desierto. Estos escapes rara vez afectan la planicie litoral, con la excepción en la comuna del escarpe de la falla Zofri (ver sección 3.1.4).

3.1.3 Marco geológico

El área comprendida por la comuna de Iquique exhibe una geología que registra un amplio período del tiempo geológico, desde el Jurásico al Holoceno, y que presenta los tipos litológicos mayores: rocas sedimentarias, volcánicas e intrusivas. Predominan los afloramientos de rocas estratificadas Cenozoicas y Mesozoicas, en menor medida afloran cuerpos intrusivos del Mesozoico. La geología de la comuna se encuentra descrita en detalle en las cartas geológicas Iquique y Pozo Almonte (Vásquez & Sepúlveda, 2013) y Patillos y Oficina Victoria (Sepúlveda, Vásquez, & Quezada, 2014). Complementariamente se consideraron las cartas geológicas de Iquique y Alto Hospicio (Marquardt, Marinovic, & Muñoz, 2008) e Iquique y Caleta Molle (Thomas, 1970), y la base geológica de Geología para el Ordenamiento Territorial y la Gestión Ambiental en el área de Iquique-Alto Hospicio (SERNAGEOMIN, 2013).

Para establecer un contexto geológico para el análisis de detalle de este estudio, inicialmente se definieron unidades geológicas a una escala 1:50.000 en los sectores de estudio, mediante el ajuste de los límites de las unidades geológicas presentadas en las publicaciones mencionadas anteriormente y observaciones de terreno. Esta geología se detalla en la sección 3.1.3a).

Posteriormente, esas unidades geológicas ajustadas a escala 1:50.000 fueron afinadas (y definidas algunas nuevas unidades también) a escala 1:1.000 y 1:5.000 (según corresponda), considerando información topográfica de detalle y de cartas morfométricas, fotointerpretación de imágenes satelitales y fotografías aéreas y observaciones de terreno. Las unidades geológicas de las áreas de restitución de detallan en la sección 3.1.3b).

La geología de los sectores elaborada a escala 1:50.000 se presenta en la Figura 3-4 (a escala 1:100.000), y la descripción de su leyenda se presenta en la Figura 3-5. Fuera de texto, las unidades geológicas reconocidas a escala 1:1.000 y a escala 1:5.000 en las áreas de restitución (según corresponda) se presentan, a escala 1:10.000, desde el Plano N°1-A al Plano N°8-A, como se indica en el Cuadro 3.1-1:

Cuadro 3.1-1: Numeración de planos de los mapas de geología.

Numeración de planos	Sectores incluidos
Plano N°1-A	Sectores N°1 y N°2
Plano N°2-A	Sectores N°3, N°4 y N°5
Plano N°3-A	Sector N°6 - Oeste
Plano N°4-A	Sector N°6 - Este
Plano N°5-A	Sector N°7
Plano N°6-A	Sector N°8 - Norte
Plano N°7-A	Sector N°8 - Sur
Plano N°8-A	Sector N°8 - Este

Fuente: Elaboración propia

a) Marco geológico comunal

En la comuna de Iquique, las rocas (que afloran en las unidades de Planicie Litoral y Cordillera de la Costa) están constituidas por secuencias volcano-sedimentarias jurásicas y cretácicas (de hace unos 200 a 100 millones de años), intruidas por granitoides del mismo período. A partir del Mioceno⁹, luego de un hiato¹⁰ de varios millones de años, se depositaron secuencias de sedimentos, como las Gravas de Alto Hospicio, que rellenan cuencas intramontanas o están colgados en las laderas de valles, evidenciando varios episodios de alzamiento relativo de la Cordillera de la Costa e incisión de estas unidades. Al mismo tiempo, se produjo un alzamiento costero que inició la formación del Escarpe Costero¹¹, el cual fue retrocediendo producto de la abrasión marina¹², y alcanzó su actual posición (hace unos 3 o 2 millones de años, aproximadamente).

En los últimos 2,5 millones de años, se formaron los depósitos gravitacionales (Dep. Coluviales *PIHc*) y depósitos asociados a la interacción entre el Acantilado Costero y el mar (Dep. Litorales *PIHl*). Estos últimos se encuentran tanto aterrazados (como reflejo del alzamiento del frente costero) como dispuestos en las playas actuales. Se encuentran también depósitos relacionados a la actividad de la fauna costera en diversos lugares (Dep. de guano *PIHg*) y depósitos producto de procesos gravitacionales de remociones en masa de diversos tamaños (*PIHrm*).

Posteriormente, se produce la erosión de las unidades más antiguas, lo que generó el material que conforma los depósitos aluviales (*PIHa*) ubicados en el fondo de las quebradas y que conforman los abanicos aluviales. En la Cordillera de la Costa y en la Depresión Central se ubican depósitos salinos de diversa extensión (*PIHs*) y que fueron originados por el ascenso capilar de aguas subterráneas mineralizadas.

En el área de estudio se localiza una serie de depósitos eólicos (*PIHe*) que provienen del retrabajo de los depósitos litorales y que conforman dunas y mantos de arena. Una serie de depósitos antrópicos (*Han*) de diverso origen se encuentran ubicados en la comuna.

b) Marco geológico local

En el área comprendida por los sectores de estudio en la comuna de Iquique predominan los afloramientos de rocas estratificadas del Cretácico y Jurásico, en menor medida afloran cuerpos intrusivos del mismo período. Además, existe una serie de depósitos sedimentarios no consolidados de edad Miocena – Holocena. Las

⁹ Época geológica que se extiende desde hace unos 25 millones de años hasta hace unos 5 millones de años.

¹⁰ Se denomina hiato a un intervalo de tiempo que no está representado por estratos en un lugar determinado. Su existencia puede deberse a la erosión o a la ausencia de sedimentación.

¹¹ Este Escarpe Costero se habría formado por la inversión de régimen tectónico, pasando a un régimen compresivo representado por fallamiento inverso en las unidades geológicas más jóvenes.

¹² La abrasión marina es el desgaste causado a una roca provocado por el oleaje.

distintas unidades presentes en los sectores de estudio se detallan a continuación (cronológicamente, de más recientes a más antiguas), dando un mayor énfasis a los depósitos no consolidados pues son los de mayor interés para este estudio.

i) Depósitos sedimentarios no consolidados

Depósitos antrópicos, Han (Holoceno): Corresponden a depósitos originados por la acción humana y se han diferenciado en Residuos inorgánicos de obras civiles (Han(b)) y Residuos inorgánicos de labores mineras (Han(c)). El Sector Industrial norte, junto con el Sector Casco Antiguo, Sur y aeropuerto, poseen solo depósitos relacionados a obras civiles (Han(b)), El Sector Bajo Molle y Chanavayita – Patillos – Patache presentan solo depósitos relacionados a minería (Han(b)), mientras que los Sectores de Tres Islas-Playa Blanca y Lobito-Los verdes contienen estos dos tipos de depósitos. La morfología actual del litoral de Iquique ha sido alterada por la acción antrópica. Ejemplo de esto es la unión artificial realizada entre de la isla Serrano y el continente para efectuar trabajos portuarios, siendo actualmente el Puerto de Iquique (Sepúlveda N. , 2014).

Depósitos aluviales activos, Ha (Holoceno): Bloques, gravas, arenas y limos recientes que se acumulan en el fondo de las quebradas, abanicos aluviales y laderas de los cerros. Estos depósitos se ubican al sur de la comuna, específicamente en el Sector de Chanavayita – Patillos – Patache.

Depósitos aluviales, PIHa (Pleistoceno – Holoceno): Bloques, gravas, arenas y limos con intercalaciones de ceniza que se acumulan en el fondo de los cauces de quebradas, en abanicos aluviales y laderas de cerros. Estos depósitos se encuentran en casi todos los sectores de la comuna, cubren parcialmente las unidades en zonas donde el relieve permite el transporte derivado de episodios esporádicos de escorrentía superficial y además presentan intercalaciones con depósitos de origen coluvial y eólicos.

Depósitos eólicos, PIHe (Pleistoceno – Holoceno): Arenas no consolidadas y bien seleccionadas transportadas por el viento ubicadas prácticamente en toda la comuna, excepto en el sector aeropuerto (Chucumata). Se pueden diferenciar en dos tipos: arenas formadoras de dunas longitudinales (PIHe(l)) como por ejemplo las de Cerro Dragón cercanas a la ciudad de Iquique y mantos de arena (PIHe(m)) intercalados o que cubren depósitos aluviales y coluviales en el sector del acantilado costero.

Depósitos coluviales, PIHc (Pleistoceno – Holoceno): Bloques, gravas y arenas polimícticas no consolidadas, depositados hacia el pie de las laderas de alta pendiente principalmente en el Acantilado Costero. En los sectores más bajos se encuentran sobre o intercalados con depósitos eólicos y en algunas zonas con depósitos de origen aluvial. Se encuentra en todos los sectores menos en el área cercana al aeropuerto.

Depósitos de remoción en masa, PIHrm (Pleistoceno – Holoceno): Bloques métricos mal seleccionados depositados al pie del acantilado costero generado por procesos gravitacionales. Este tipo de depósito se encuentra presente en el sector de Lobito – Los Verdes y Chanavayita – Patillos – Patache.

Depósitos litorales, PIHI (Pleistoceno – Holoceno): Conglomerados, areniscas calcáreas y coquinas preservadas en una sucesión de terrazas de abrasión marina y cordones litorales. Incluyen también arenas de bioclásticos calcáreas, de tamaño medio a grueso, de origen litoral que se acumular a lo largo de las playas actuales. Se encuentran en todos los sectores, donde es posible distinguir principalmente dos niveles de terrazas e incluso tres en el sector sur de la comuna, donde las que se encuentran a mayor altura y a mayor distancia de la línea de costa corresponderían a las más antiguas. (PIHI2, PIHI3)

Depósitos de guano, PIHg (Pleistoceno – Holoceno): Estos depósitos consisten en fosfatos de calcio depositados como material fecal de aves. Constituyen niveles puros o cemento en depósitos marinos a lo largo de la línea de costa actual. Este tipo de depósito se posee un volumen considerablemente menos a los otros

depósitos recién mencionados y se encuentra en los sectores de Bajo Molle, Tres Islas - Playa Blanca y Chanavayita – Patillos – Patache.

Gravas de Alto Hospicio, OPah (Mioceno – Plioceno): Consiste en bloques, gravas, arenas, limos y arcillas semiconsolidados de origen aluvial con intercalaciones de ceniza volcánica. Yace en discordancia angular y erosiva sobre las formaciones jurásicas y cretácicas del área en prácticamente todos los sectores menos el área cercana al aeropuerto.

ii) Rocas estratificadas del Cretácico y Jurásico

Formación Punta Barranco, Kipb (Barresiano – Albiano): Secuencia volcanosedimentaria continental que se encuentra formada por dos miembros. Miembro superior volcánico (Kipb(a)) compuesto por brechas volcánicas y andesitas traquíticas. Miembro basal clástico (Kipb(b)) compuesto por areniscas y conglomerados con clastos de calizas y andesita traquítica intercalada. Esta formación se encuentra prácticamente en todos los sectores menos al sur de la comuna, principalmente en la zona del Acantilado costero y en algunas áreas cercanas a la línea de costa. En algunos afloramientos se observan evidentes efectos de meteorización sobre sus rocas.

Formación El Godo, Jmseg (Bajociano – Oxfordiano): Secuencia sedimentaria marina fosilífera, compuesta por lutitas calcáreas (Jmseg(a)) con intercalaciones de volcanitas submarinas (Jmseg(b)), principalmente basaltos almohadillados intruidos y diques. Se encuentran principalmente en los sectores centro y sur de la comuna tanto en la zona del Acantilado costero como cercano a la línea de costa.

Formación Caleta Ligate, Jmcl (Bajociano): Secuencia sedimentaria marina fosilífera, constituida por areniscas calcáreas (Jmcl(a)) intercalada con un miembro volcánico compuesto por brechas, tobas, lavas basálticas y basaltos almohadillados (Jmcl(b)). Se encuentran en los sectores centro y sur de la comuna principalmente cercana a la línea de costa y en menor medida en la zona del Acantilado Costero.

Formación Ofinica Viz, Jimov (Sinemuriano – Bajociano): Secuencia volcánica continental constituida por andesitas basálticas amigdaloidales. Esta formación se encuentra en el sector Lobito – Los Verdes y al sur de la Comuna

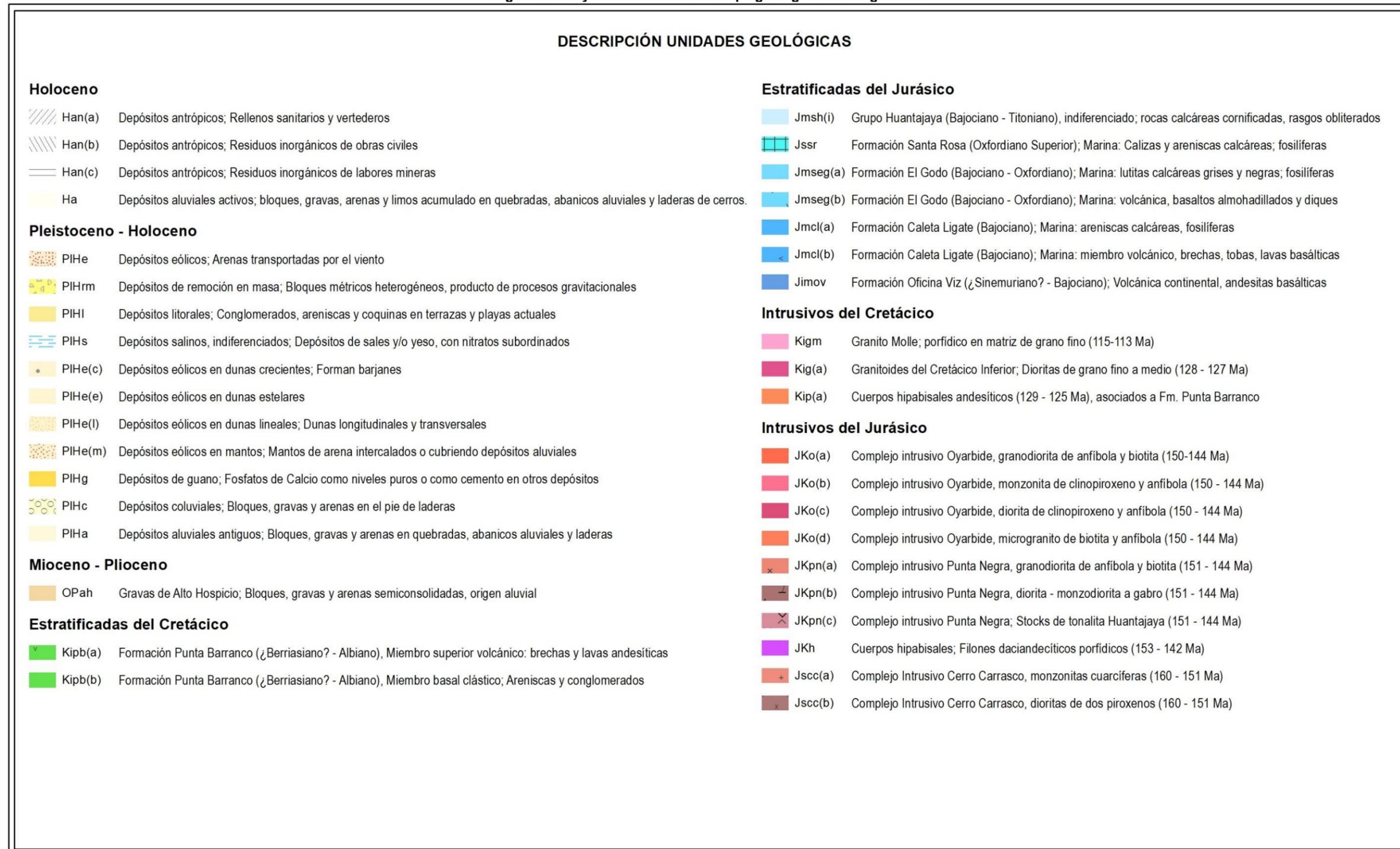
iii) Intrusivos del Cretácico y Jurásico

Granitoides del Cretácico Inferior, Kig(a) (128 – 127 Ma): Dioritas de grano fino a medio de clinopiroxeno. Ubicado en el sector Tres Islas – Playa Blanca en la zona del Acantilado Costero.

Complejo intrusivo Punta Negra, JKpn (151 – 144 Ma): Granodiorita de anfíbola y biotita (JKpn(a)) y diorita y monzodiorita a gabro (JKpn(b)). Ubicado en el sector Industrial norte, Casco antiguo y Chanavayita – Patillos – Patache. Tanto en la zona del acantilado como cercano a la línea de costa.

Complejo Intrusivo Cerro Carrasco, Jsc(b) (160 – 151 Ma): Dioritas de dos piroxenos y dioritas de anfíbola y biotita. Ubicado únicamente en el sector de Chanavayita – Patillos – Patache

Figura 3-5: Leyenda extendida del mapa geológico de la Figura 3-4.



Fuente: Elaboración propia en base a Vásquez & Sepúlveda (2013) y Sepúlveda et al. (2014).

3.1.4 Marco estructural

El margen continental donde se encuentra ubicado Chile es un margen activo, caracterizado por la convergencia entre las placas de Nazca y Sudamericana donde los registros geológicos evidencian una larga historia de deformación de la corteza continental. Diversas estructuras geológicas como fallas, pliegues y fracturas afectan a prácticamente todas las unidades de roca presentes en la zona y son responsables en gran parte de la creación y evolución del relieve.

Las fallas en la corteza continental son producto de los campos de esfuerzos predominantes en esta, que están principalmente modulados por la subducción activa. Cuando los esfuerzos acumulados superan la resistencia de la roca, estos se liberan como deformación frágil por medio de propagación de una ruptura con desplazamiento en el plano de falla, generando así ondas sísmicas; en consecuencia, es posible considerar a estas estructuras como fuentes sísmicas.

En las inmediaciones de la comuna de Iquique, la Cordillera de la Costa está caracterizada por un tipo de estructuras cenozoicas que han tenido una cinemática inversa desde al menos el Mioceno temprano-medio, entre los 23 Ma a 13 Ma, aproximadamente, y que según algunos autores presentan evidencias que sugerirían actividad durante el Holoceno (e.g. Allmendinger y González (2010)).

La actividad cuaternaria que modifica el relieve en el que se emplaza la comuna de Iquique se expresa en la forma de escarpes de falla, algunas con exposición en superficie y otras no. Dichas estructuras deforman a las diversas unidades geológicas de la cordillera de la costa (Marquardt, Marinovic, & Muñoz, 2008) (ver sección 0). Según Carrizo et al. (2008), se observa en terreno como evidencias de estas deformaciones el desarrollo de grietas extensionales en la cresta del escarpe, oblicuas a la orientación de la traza principal, relacionadas con la propagación del bloque colgante hacia superficie.

En la comuna de Iquique, diversos autores (e.g., Vásquez y Sepúlveda (2013), Allmendinger et al. (2005), González et al. (2003)) reconocen 3 grupos de sistemas de fallas con actividad cuaternaria (fallas activas o potencialmente activas) con base en la orientación general de sus trazas que afectan el borde costero de la Región de Tarapacá (Figura 3-6) (1) un sistema de orientación principal este – oeste (E-W), (2) un sistema de orientación principal norte – sur (N-S), y (3) un sistema de orientación principal noroeste – sureste (NW-SE). Los dos primeros grupos afectan a la comuna de Iquique.

Las trazas de las fallas E-W afectan las trazas de las fallas N-S y del sistema NNO-SSE lo que indica que las primeras son estructuras más recientes. El talud del Acantilado Costero corta las trazas de los tres grupos de sistemas de fallas indicando que los procesos de erosión más recientes que afectan al Acantilado Costero son posteriores a la actividad de las fallas. No obstante, la actividad de estas fallas puede condicionar la erosión del Acantilado Costero y su segmentación longitudinal. Actividad más reciente de algunas fallas inversas E-O se evidencia en la plataforma de abrasión marina emergida en la base del Acantilado Costero, provocando desniveles topográficos locales y basculamientos. De este modo la actividad de algunas de estas fallas ocurrió antes, durante y después de la formación del Acantilado Costero

En la cartografía geológica (Sepúlveda, Vásquez, & Quezada, 2014; Vásquez & Sepúlveda, 2013) se caracteriza el trazado de estas fallas como observadas, cubiertas o inferidas en función de las evidencias o elementos que permiten darle certeza a la delimitación del trazado de cada una de las fallas. En su gran mayoría parte del trazado de las fallas se caracterizan como inferido dado que existen evidencias de deformación que se atribuye a un origen tectónico, y que se asociaría a una falla, pero que no es posible delimitar en forma precisa a la escala del trabajo el trazado de esta. Esta consideración es particularmente importante en las fallas con evidencia de actividad durante el Cuaternario, dado que cualquier tipo de restricción que se plantee establecer depende en la identificación precisa de la traza de las fallas a escala adecuada. La caracterización

de las fallas como cubiertas implica que se delimita aproximadamente bien su trazado, pero este se encuentra cubierto por materiales de alguna unidad geológica que no ha sido afectada por la actividad de la falla, lo que permite restringir la data de la actividad de la falla. Una falla observada es aquella que la delimitación de la traza puede hacerse dentro de un rango de precisión equivalente a la escala de análisis de la cartografía geológica.

a) Estructuras E-W

El sistema de fallas inversas de orientación este-oeste se extiende desde la quebrada Camarones (19°S) hasta el sur del río Loa (21,6°S) (e.g. Allmendinger et al. (2005), González et al. (2003)) han estado activas desde hace aproximadamente 6 Millones de Años (Ma) y presentarían evidencias de algún grado de actividad en el Holoceno (Allmendinger & González, 2009). Estas fallas se restringen exclusivamente a la Cordillera de la Costa y están compuestas por varias trazas paralelas, formando notorios escarpes morfológicos (Sepúlveda & Quezada, 2015), que tienen una pendiente hacia el norte o sur con un predominio hacia el norte (Quezada, Cerda, & Jensen, 2010).

En la comuna de Iquique, las principales fallas EW están descritas como una serie de estructuras en varias ramas. De norte a sur, las fallas más relevantes son las siguientes: Falla Zofri, Falla Cavancha, Falla Molle y Falla Tarapacá.

- La **Falla Zofri** se extiende a lo largo de la Cordillera de la Costa (Figura 3-6) por 20,2 km y se presenta como un escarpe de 50 m de altura, cuya cara se expone hacia el norte (SERNAGEOMIN, 2013), separando al centro de la ciudad con el Barrio Industrial de Iquique, conocido como "Zofri". Corresponde a un conjunto de estructuras subparalelas al plano principal que, aparentemente, no afectan depósitos recientes (Marquardt, Marinovic, & Muñoz, 2008); las unidades afectadas más jóvenes corresponden a las Gravas de Alto Hospicio de edad Oligoceno-Mioceno y a Depósitos eólicos del Pleistoceno-Holoceno, en las inmediaciones de quebrada Seca. El plano principal tiene una orientación general N85°E y un manteo aproximado de 57°SE (Sepúlveda & Quezada, 2015). Esta es la única falla en la que se reconoce un escarpe morfológico claro en la planicie costera.
- La **Falla Cavancha** presenta un escarpe cuya cara se dispone hacia el norte, este una altura de 1,8 m. Afecta a material asociado a la unidad geológica de Gravas de Alto Hospicio (OPah) sobre la estructura, y bajo ella se encuentran depósitos aluviales del Pleistoceno-Holoceno (Sepúlveda & Quezada, 2015). En la Cordillera de la Costa cercano a cerro Aldea se visualiza el plano con una orientación N83°E y manteo 65°SE (Sepúlveda & Quezada, 2015). El sector de Península Cavancha, presenta un intenso fracturamiento de rocas volcánicas del Cretácico inferior, de orientación N70°E con un manteo vertical, obliterando las demás estructuras presentes que se sería resultado de deformación asociada a la falla (Sepúlveda & Quezada, 2015).
- La **Falla Molle**, que atraviesa el sector de Bajo Molle, al sur de la ciudad de Iquique, pone en contacto rocas volcánicas del Cretácico en el bloque colgante por sobre depósitos de playa con fósiles de edad Pleistoceno-Holoceno (PIHI) en el bloque (Sepúlveda & Quezada, 2015). Esto evidencia el mecanismo inverso de la estructura y una edad mínima de la deformación, Pleistoceno-Holoceno. El plano de falla tiene una orientación general N78°W (Sepúlveda & Quezada, 2015) con una inclinación de 30°N (Allmendinger & González, 2009).
- La **Falla Tarapacá** presenta una traza con longitud de 32,43 km. (Sepúlveda & Quezada, 2015). Se observa notoriamente en las imágenes satelitales y fotografías aéreas, de la forma de escarpe de limbo de pliegue. Presenta un rumbo EW y la traza tiene una longitud de 32,43 km. La cara del escarpe tiene una orientación hacia el sur y el plano de la estructura no se expone en superficie. La morfología del escarpe es continua, caracterizado por una inversión de relieve expresado por el alzamiento del piedemonte con respecto a la sierra adyacente, provocando un rejuvenecimiento local del relieve. La estructura afecta a Depósitos coluviales del Pleistoceno- Holoceno y Gravas de Alto Hospicio del Oligoceno-Plioceno.

b) Estructuras N-S

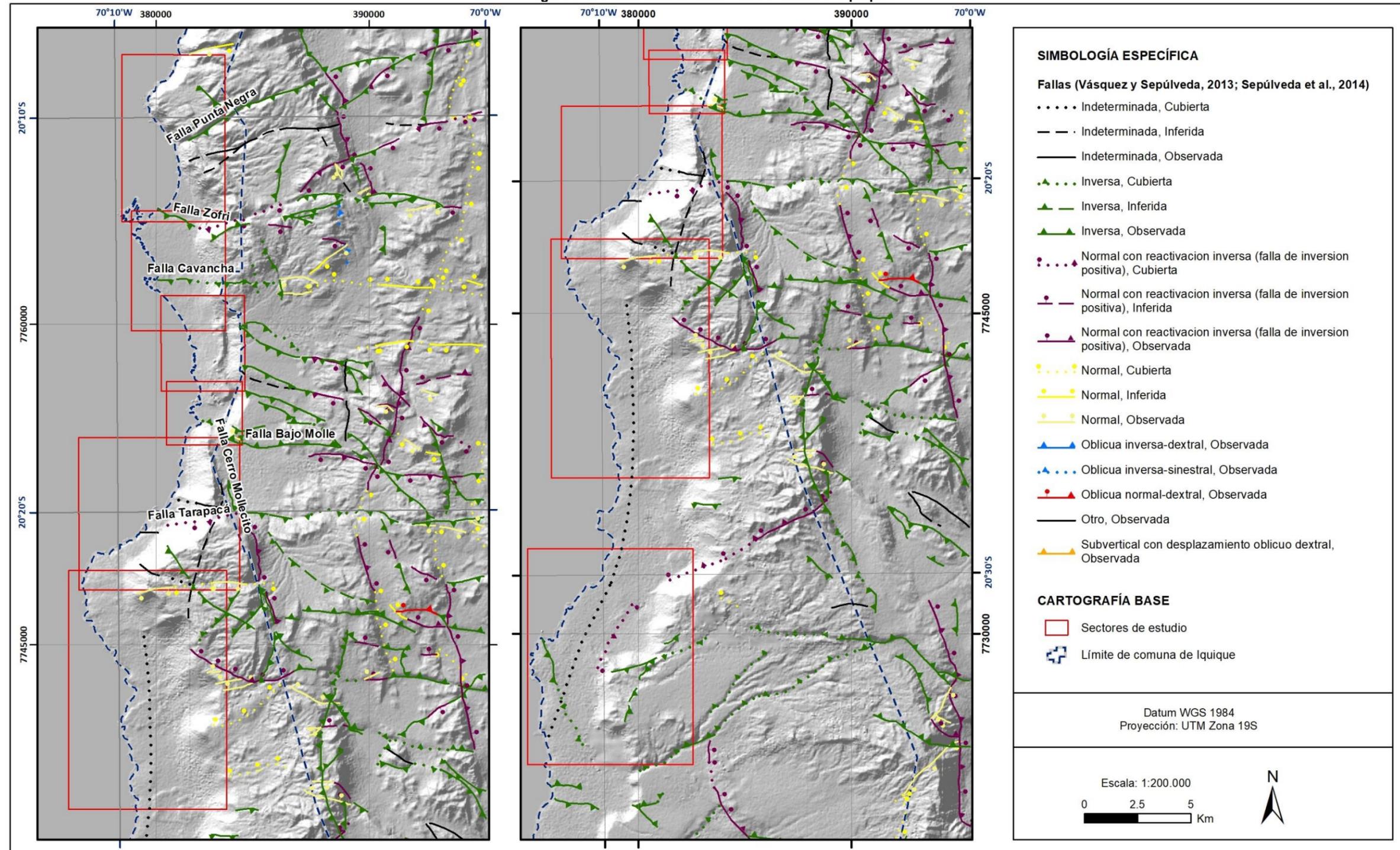
Las estructuras de orientación NS se reconocen como escarpes de falla, con una pobre exposición del plano de falla principal (SERNAGEOMIN, 2013). Son estructuras que corresponden a la terminación norte del sistema de Fallas de Atacama (González, Allmendinger, Casanova, & Carrizo, 2003) (varias centenas de km) y que son consistentes con estructuras de períodos de recurrencia bajos, pero con evidencias de movimientos durante el Holoceno.

- La **Falla Cerro Mollecito**, ubicada en el sector homónimo de la comuna de Iquique, afecta a depósitos de sobrecarga moderna y escombros de falda (Thomas, 1970). Tiene una longitud de 5 km, rumbo N10°W y la cara del escarpe se orienta hacia el oeste (Sepúlveda & Quezada, 2015).

c) Estructuras NW-SE

Las fallas de orientación principal noroeste – sureste (NW-SE) corresponden a sistemas de fallas que funcionan como estructuras de acomodo de la deformación de los sistemas anteriores. Estas estructuras son de carácter muy local, solo teniendo expresión en la Cordillera de la Costa, y no afectando la planicie litoral, atravesando exclusivamente a la comuna de Alto Hospicio. Son de traza continua y afectan principalmente a las Gravas de Alto Hospicio (OPah).

Figura 3-6: Fallas identificadas en la comuna de Iquique.



Fuente: Elaboración propia a partir de Vásquez & Sepúlveda (2013) y Sepúlveda (2014).

3.2 LÍNEA DE BASE DE HIDROLOGÍA

El clima en Iquique se define como desértico con nublados abundantes, que se caracteriza por precipitaciones muy escasas y que se presentan en los meses de invierno, la formación de nubosidad baja de tipo estratiforme y un régimen térmico influenciado por las características frías de la corriente de Humboldt (Cruz & Calderón, 2008). Como muestran los datos de precipitaciones que se presentarán más adelante, el clima de la zona se caracteriza por condiciones de extrema aridez, las que se han extendido, a lo menos, desde el Oligoceno-Mioceno (Dunai, González, & Juez-Larré, 2005).

Para caracterizar las precipitaciones en la comuna de Iquique se revisaron los registros de las estaciones Iquique y Tocopilla, ubicadas en las planicies litorales, y Cuya, Huara en Fuerte Baquedano, Esmeralda y Quillagua, ubicadas en la depresión intermedia (Cuadro 3.2-1).

Cuadro 3.2-1: Estaciones meteorológicas utilizadas en el análisis.

Estación	Código BNA	Coordenadas			Registro	
		Este	Norte	Altitud	Inicio	Fin
Iquique	01820001-5	381.308	7.764.260	50	08-1984	07-2017
Tocopilla	02210002-5	377.253	7.557.838	150	06-1994	07-2017
Cuya	01502006-7	381.457	7.886.408	200	11-1965	04-1979
Huara en Fuerte Baquedano	01700010-1	421.635	7.773.836	1.100	02-1993	05-2017
Esmeralda	01700008-K	460.226	7.734.864	1.115	09-1966	12-1972
Quillagua	02112008-1	444.557	7.604.648	802	06-1970	07-2017

Fuente: Elaboración propia

En el Apéndice - se presentan todos los días que presentan un registro de precipitaciones mayor que cero en las estaciones antes señaladas, de donde se confirma que las precipitaciones en la costa suelen ocurrir durante los meses de invierno, aunque también existen registros de precipitaciones en verano, y se observa que los eventos de precipitaciones que ocurren en la costa pocas veces alcanzan la depresión intermedia. Por otra parte, las cuencas aportantes a las planicies litorales de la comuna de Iquique se limitan a la vertiente oeste de la Cordillera de la Costa, y no se extienden hasta la depresión intermedia. En consecuencia, se ha considerado que para caracterizar las precipitaciones que afectan directa o indirectamente a las planicies costeras de la comuna de Iquique, sólo se necesita analizar los registros de precipitaciones de la estación Iquique.

En el Cuadro 3.2-2 se presentan los valores representativos de las precipitaciones en la estación Iquique, de donde se obtiene que la suma de los promedios de precipitaciones de cada mes equivale a una precipitación total anual de 1,4 mm, con un valor máximo de precipitaciones de 7,0 mm en un día. El registro completo de precipitaciones medias mensuales en esta estación se presenta en el Apéndice -.

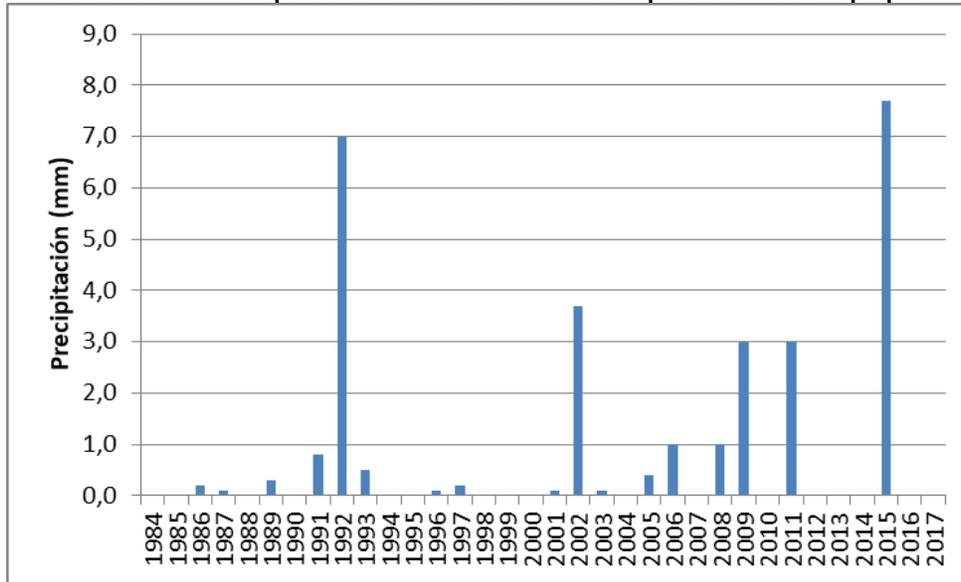
Cuadro 3.2-2: Valores representativos de las precipitaciones mensuales en la estación Iquique.

	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
N° Datos	33	33	33	33	33	33	33	33	32	32	33	33
Promedio	0,2	0,1	0,0	0,0	0,3	0,0	0,4	0,3	0,0	0,0	0,0	0,1
Máximo	7,0	1,6	0,0	0,5	10,5	1,0	5,0	9,0	0,2	0,0	0,0	1,9
Mínimo	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Fuente: Elaboración propia

Por otra parte, en el Gráfico 3.2 1 se presentan las precipitaciones máximas anuales en 24 horas, donde se observa que, en la mitad de los años con registro, este parámetro tiene un valor de 0 mm, y que en sólo 5 años de los 34 que tienen registro se ha alcanzado una precipitación mayor que 1 mm. Finalmente, en el

Cuadro 3.2-3 se presentan los valores de las precipitaciones máximas en 24 horas para diferentes períodos de retorno, ajustados según una distribución Gamma.

Gráfico 3.2-1: Precipitaciones máximas en 24 horas para la estación Iquique.

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 3.2-3: Precipitaciones máximas en 24 horas asociadas a diferentes períodos de retorno en la estación Iquique, según una distribución Gamma.

Probabilidad de no excedencia	Probabilidad de excedencia	Período de Retorno (años)	Precipitación (mm)
50%	50%	2	0,0
80%	20%	5	1,3
90%	10%	10	3,4
95%	5%	20	6,1

Fuente: Elaboración propia.

4 INUNDACIONES TERRESTRES

Como su nombre lo indica, las inundaciones por desborde de cauce ocurren cuando ríos o esteros desbordan su cauce natural anegando las terrazas fluviales laterales o adyacentes, debido a la ocurrencia de caudales extremos. Estos fenómenos se producen generalmente debido a eventos de precipitaciones líquidas intensas y/o prolongadas en el tiempo. Las inundaciones por anegamientos se producen en zonas deprimidas, de baja permeabilidad, con niveles freáticos someros y/o deficiente drenaje del terreno, frecuentemente inundadas debido a lluvias intensas y/o prolongadas. Este peligro describe con mayor detalle en el Apéndice 11.2.2a).

A continuación, se presenta un catastro de los eventos de inundaciones terrestres que han afectado al área de estudio (sección 4.1), un diagnóstico sobre los peligros de inundaciones por anegamientos (sección 4.2).

4.1 ANTECEDENTES Y CATASTRO

En el área de estudio no se encontraron antecedentes de inundaciones por desborde de cauces, aunque sí existen referencias a crecidas (que se han manifestado como flujos de barro, popularmente conocidas como avenidas) ocurridas en las quebradas que se ubican en la ladera occidental de la Cordillera Principal, y que han alcanzado la Depresión Central, principalmente asociadas a las precipitaciones que ocurren durante los meses de verano en el Altiplano. Las zonas donde ocurrieron estas crecidas se encuentran hidrológicamente desconectadas de la totalidad de la comuna de Iquique. Por otra parte, no existen cauces activos con escorrentía permanente en la comuna de Iquique, excepto el río Loa, que constituye su límite sur.

En cuanto a las inundaciones por anegamiento, tampoco se encontraron antecedentes. Sin embargo, existen elementos que podrían representar una amenaza de inundación por anegamiento que corresponden a filtraciones o afloramientos de agua que provienen desde el subsuelo. En la Figura 4-1, se presentan las zonas donde se han identificado afloramientos de agua en los sectores de estudio.

La presencia de recursos hídricos en el territorio que abarca la comuna de Iquique marcó los primeros asentamientos humanos y el posterior desarrollo de la ciudad y los poblados. Por lo anterior, gran parte de los poblados de los sectores de estudio ha podido instalarse gracias a la presencia de “aguadas” o vertientes. A su vez, estos afloramientos de agua subterránea representan un peligro para sus sectores próximos.

Como lo plantea Urbina *et al.* (2011), la serie de aguadas presentes en los sectores de estudio (como la Aguada de Iquique, de Bajo Molle, de Punta Gruesa, de Chucumata, de Alto Barranco, Aguada del Soronal, Aguada Aguadita y Aguada Punta de Lobos) se formaron a partir de fallas geológicas provenientes de las pampas. Sobre ello, Niemeyer y Cereceda (1984) mencionan que las aguadas de Colorado en Iquique, Bajo Molle, Chucumata, y Pabellón de Pica, asociadas a fallas transversales inactivas de la Cordillera de la Costera, presentan afloramientos de bajo caudal y deficiente calidad (al momento de la realización de dicha publicación). Estos afloramientos de agua, en general dulce, presentan un patrón disperso a lo largo de la costa de Iquique, pero todos se encuentran entre el borde costero y el acantilado, en los sectores planos.

Por otro lado, existe un tipo de afloramiento de agua diferente que amenaza con anegar los sectores aledaños a ellos, y corresponden a los denominados “ojos de mar”. A pesar de que no existe una definición formal que distinga este tipo de afloramiento con las aguadas, los ojos de mar suelen estar asociados a aguas salobres, que emergen a la superficie en distintos sectores de la ciudad. Esta filtración o aparición de agua es un elemento que está en la memoria Iquiqueña pues se encontraron visibles por mucho tiempo, hasta que la ciudad comenzó a crecer y estos ojos de mar se rellenaron y fueron cubiertos por casas, edificios y otras infraestructuras.

Sectores como Cavancha, donde se ubica el Casino y el Hotel Terrado, corresponden a zonas donde ojos de mar afloraban en el pasado. También al este de la Isla Serrano, como el edificio de la ex Aduana y la Municipalidad de Iquique, que aún posee un ojo de mar en el terreno. Hacia el norte, el sector del Colorado en la entrada hacia la Zofri, la población La Puntilla, Jorge Inostroza y hacia el sector de La Canterera, representaban una franja húmeda con ojos de mar que fueron cubiertos para la construcción de los galpones que hoy se encuentran instalados en la Zona Franca de Iquique. Específicamente en el sector de La Canterera, según informó la encargada de la Oficina de Protección civil y de Emergencia de Iquique, Sra (ta). Vanessa Bravo, existían ojos de mar que fueron rellenados con basura y escombros para la realización de viviendas sociales a fines de la década del 80. Hacia el sur, entre el peaje y el Aeropuerto de Chucumata, existe una zona que tendría afloramiento de agua, problema que fue mitigado con la instalación de drenes. Además, existe como antecedente del catastro un evento de inundación en el subterráneo del edificio de la Ex Aduana, el cual estaría ligado al ojo de mar presente en el terreno. Este ojo de mar se encuentra aun reflotando en el frontis del edificio, como lo indicó la encargada de la Oficina de Protección civil y de Emergencia de Iquique, Sra. Vanessa Bravo.

4.2 DIAGNÓSTICO

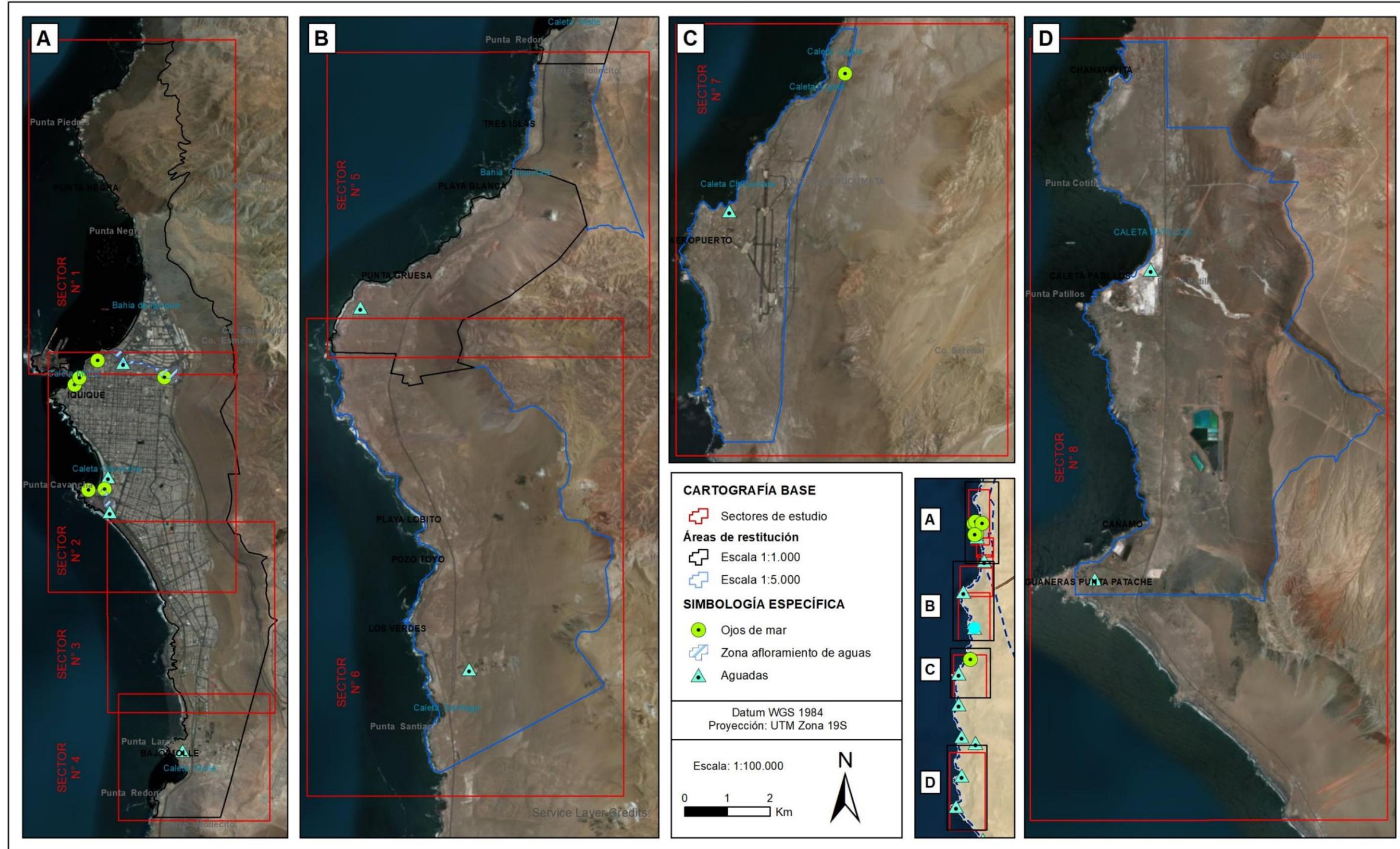
Como se señaló en la sección 3.2, las precipitaciones en la comuna de Iquique son muy poco frecuentes, de manera que los cauces ubicados en la zona presentan escorrentía muy ocasionalmente. Una consecuencia de esto es que se acumula mucho material sedimentario en los cauces, que puede ser asociado, al menos en parte, al viento, y por lo mismo, estos contienen abundante material sedimentario. En función de lo anterior, en caso de ocurrir una inundación por desborde de cauce, tanto las zonas afectadas como sus efectos serán menores que las resultantes de un flujo de barro. En consecuencia, no se analizará el peligro de inundación por desborde de cauces, sino que se considerará que las zonas expuestas a este peligro se encuentran completamente representadas por el peligro de flujos de barro.

Con respecto al peligro de anegamientos, al observar la disposición que muestran los ojos de mar en el sector Norte e Industrial, existe una correlación entre su ubicación y la presencia de las fallas geológicas Zofri y Cavancha. La posible relación entre los afloramientos de agua y fallas transversales a la costa ya ha sido mencionada para el caso de las aguadas por Niemeyer y Cereceda (1984) y por Urbina et al., (2011). Estas estructuras podrían facilitar el transporte y salida de aguas hacia la superficie.

Los ojos de mar ubicados en el área de la Zofri y en el borde costero, podrían estar asociados a otra causa. Debido a que en esta zona se sitúan depósitos de origen litoral que podrían acumular las aguas de origen marino en subsuperficie, el agua podría emerger en situaciones en que el nivel del mar aumente.

A partir de los antecedentes disponibles y el análisis realizado, no se cuenta con las condiciones que permiten zonificar el peligro de inundación por anegamiento asociado a los ojos de mar y a las aguadas. Lo anterior se debe a que (1) la información recopilada de los ojos de mar y las aguadas se presenta como fenómenos puntuales y que (2) las zonas donde se han ubicado estos eventos se encuentran cubiertas por infraestructura urbana. En conclusión, no es posible generar el análisis de susceptibilidad con los antecedentes disponibles.

Figura 4-1: Catastro de afloramientos de agua en los sectores de estudio.



Fuente: Elaboración propia a partir de referencias citadas en el texto.

5 INUNDACIONES LITORALES

Los tsunamis o maremotos corresponden a una ola o un grupo de olas de gran energía y tamaño que se producen como consecuencia de algún fenómeno extraordinario que desplaza verticalmente una gran masa de agua. Este fenómeno puede ser provocado por un movimiento sísmico¹³, un deslizamiento de tierra, una erupción volcánica, tifones o huracanes. En Chile, los más comunes han estado relacionados a sismos de subducción, de magnitud sobre 7,0 Richter, con epicentros ubicados en el fondo marino, que pueden ser 2 tipos: (1) de “origen cercano”¹⁴, donde la población siente el terremoto que generará el maremoto, como los grandes terremotos ocurridos en Chile (por ejemplo, 1922, 1960 y 2010), y (2) de “origen lejano”¹⁵, donde la población no es alertada por un movimiento sísmico previo al arribo del maremoto, como el terremoto de Japón del 2011. Este peligro se describe en detalle en el Apéndice 11.2.2a)iii) “Inundaciones costeras asociadas a maremotos”.

5.1 ANTECEDENTES Y CATASTRO

En el Apéndice 11.5.1 “Catastro de maremotos”, se presenta un catastro histórico de tsunamis que han afectado a la comuna de Iquique.

Históricamente, se conoce la ocurrencia de dos sismos que generaron tsunamis de magnitud considerable en la costa de la comuna de Iquique, con olas que alcanzaron los 21 m de altura (SHOA, 2015). Estos sismos, el de 13 de agosto de 1868 y el de 9 de mayo de 1877, son los más destructivos (Ms 8,8) de los que se tiene registro en la zona, con una intensidad de VIII (MM) para la ciudad de Iquique (ver sección 7.1). El registro del tsunami más destructivo que ha azotado a la ciudad de Iquique se asocia al segundo evento, al sismo de 1877, alcanzando los 21 m de altura y arrasando con gran parte de la ciudad, desde La Puntilla hasta el sector de El Morro; la población de aquel entonces, con nueve mil doscientos habitantes, se salvó huyendo hacia los cerros (Urrutia, Lanza, 1993).

Por otra parte, se han documentado otros cuatro eventos de tsunamis menores en la costa de Iquique, con olas que no superaron los 2,6 m (SHOA, 2015). Estos eventos de tsunamis están asociados a los siguientes sismos:

- Sismo del 11 de marzo de 2011, con epicentro en Japón, de magnitud 9,0 Mw.
- Sismos del 1 y 2 de abril de 2014, el primero conocido como el “terremoto de Iquique de 2014”, de magnitud 8,2 Mw, y el segundo corresponde a una réplica, de magnitud 7,6 Mw (ver Apéndice 11.5.3 “Catastro de sismos”).
- Sismo de 2015, conocido como el “terremoto de Coquimbo de 2015”, de magnitud 8,4 Mw.

Los tsunamis de los años 1868, 1877 y 2014 son de tipo “origen cercano”, pues la población de la comuna de Iquique fue afectada por los sismos previos al arribo del tsunami; a diferencia de los eventos de tsunamis asociados a los sismos del 2011 y 2015, considerados de tipo “origen lejano”, cuyos sismos gatillantes no fueron percibidos por dicha población.

El Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada (SHOA) elaboró una Carta de Inundación por Tsunami referida al evento del año 1877 para la parte urbana de la ciudad de Iquique (SHOA, 2012), a escala 1:15.000 (Figura 11-2). Esta carta define las áreas que potencialmente podrían inundarse ante la ocurrencia de un tsunami de gran tamaño. La información publicada es el resultado de un modelo de simulación numérica, a

¹³ No todos los sismos generan tsunamis, sino sólo aquellos de magnitud considerable, que ocurren bajo el lecho marino y que son capaces de deformarlo.

¹⁴ Son los más peligrosos, debido a que la primera ola puede llegar a la costa entre 10 a 60 minutos de producido el sismo, dependiendo de la ubicación del epicentro.

¹⁵ Se generan a distancias mayores de 1000 km. La primera ola del tsunami tarda en llegar a nuestras costas entre 5 a 24 horas de producido el sismo.

partir de datos topográficos y batimétricos, junto con parámetros sísmicos que fueron estimados para el terremoto de 1877.

En el año 2013, SERNAGEOMIN elaboró un mapa de peligro de inundación por tsunami para el área de Iquique, a escala 1:20.000, en el cual se utilizó como base la Carta de Inundación por Tsunami para la ciudad de Iquique (SHOA, 2012) e incluyó, además, las vías de evacuación, la línea de seguridad (sobre la cota 30 m s. n. m.) y los puntos de encuentro ante un posible tsunami que podría afectar a las costas de Iquique (Marín & Ramírez, 2013).

5.2 DIAGNÓSTICO

Con relación a los factores condicionantes del área de estudio, la mayoría de las localidades y las caletas del área de estudio están construidas sobre las planicies litorales, caracterizadas por terrenos planos que ascienden paulatinamente hacia el este, condición geomorfológica que facilita el ingreso de aguas tierra adentro.

Según los registros históricos de las costas de la comuna de Iquique, la máxima cota que fue alcanzada por inundación de maremoto fue la cota de 21 m para el sismo de 1877 (Cuadro 11.5-1). De acuerdo a los estudios de tsunamis realizados en la zona, por una parte, la modelación realizada por el SHOA (2012) para Iquique, concluye que la altura máxima de inundación con una profundidad de al menos 1 metro (peor escenario) varía entre aproximadamente 15 m s. n. m. y 100 m s. n. m. Por otra parte, según un estudio realizado por CIGIDEN¹⁶ (2017), que simula un escenario sísmico con un terremoto cercano a la ciudad de Iquique, de magnitud M_w 8,9, a una profundidad de foco de 21 km y con una duración de 200 segundos, las máximas inundaciones de un consecuente maremoto tienen un comportamiento variable a lo largo de la costa, con zonas que superan los 5 m como Iquique y con valores puntuales que superan los 10 m al sur de Iquique (latitud 21°S, aproximadamente). En general, estos modelos representan de forma simplificada un sistema real graficando un solo escenario con parámetros específicos.

Es importante tener presente que sismos de magnitud estimada entre M_w 8.5 y 9 se consideran sismos de gran magnitud, con recurrencia mayor a 100 años, pero frecuentes en un contexto de margen de subducción como el chileno, por lo que la ocurrencia de tsunamis de esas dimensiones en el futuro es esperable. Por otra parte, también son esperables en forma más frecuente, tsunamis de menores dimensiones con origen en sismos de menor magnitud o en sismos lejanos que afecten sectores ubicados a cotas menores.

5.3 SUSCEPTIBILIDAD

En función de los antecedentes históricos y bibliográficos disponibles, se utilizaron las curvas de nivel de detalle “calibradas” a las áreas de inundación propuestas por el SHOA (2012). Dado que la modelación cubre sólo las costas de la ciudad de Iquique, se superpuso el área de inundación del SHOA con las curvas de nivel y se eligió el peor caso más frecuente como referencia máxima para zonificar el resto del área de estudio.

La metodología utilizada busca generar una representación general de los posibles eventos, donde el resultado incluye la información entregada por los modelos, los antecedentes del catastro, la recurrencia de los sismos y las observaciones de terreno.

Se escogió la cota 20 m s. n. m. como representativa de los alcances de maremotos esperables en los grandes terremotos de subducción que ocurren en Chile de M_w mayor a 8.5 (como los de 1868 y 1877), los cuales suelen ocurrir una vez cada 200-300 años, es decir con una baja frecuencia, pero con gran generación de daños. Se

¹⁶ Centro de Investigación para la Gestión Integrada del Riesgo de Desastres

utilizó la cota 10 m s. n. m. como representativa de los alcances de maremotos generados por aquellos terremotos con Mw menor a 8.5 o por terremotos lejanos, esta categoría considera sismos de menor magnitud que los anteriores, pero que son más frecuentes que los grandes terremotos, y que a su vez suelen producir menores daños.

Para definir la cota máxima susceptible a ser afectada por eventos de tsunamis, se utilizó un criterio conservador, considerando que la cota de seguridad en la Región de Tarapacá es de 30 m s. n. m. Es en esta cota de seguridad donde se ubican 15 islas de seguridad en la comuna de Iquique (ONEMI, 2017c), que corresponden a casetas que cumplen el rol de bodega de insumos básicos ante una emergencia y como punto de conexión radial con ONEMI. Al cruzar esta información con el área de inundación modelada por el SHOA, se definió como cota máxima la de 30 m s. n. m.

En consideración de lo anterior, las categorías de susceptibilidad para inundaciones por maremotos se describen a continuación:

1. **Zonas de Susceptibilidad Muy Alta:** sectores ubicados por debajo de la cota 10 m s.n.m.
2. **Zonas de Susceptibilidad Alta:** sectores ubicados entre las cotas 10 y 20 m s.n.m.
3. **Zonas de Susceptibilidad Moderada:** sectores ubicados entre las cotas 20 y 25 m s.n.m.
4. **Zonas de Susceptibilidad Baja:** sectores ubicados entre las cotas 25 y 30 m s.n.m.

En el caso de ocurrir un evento extraordinario que afecte las zonas de susceptibilidad Baja, los daños que se produzcan en las zonas de susceptibilidad de mayor grado (Moderada, Alta y Muy Alta), serán aún mayores que los que podrían ser generados en un evento que alcance como máximo las zonas de estas susceptibilidades Moderada, Alta o Muy Alta.

Los mapas de susceptibilidad de inundaciones por maremoto se presentan, a modo referencial dentro del informe, desde la Figura 5-1 a la Figura 5-7, como se indica en el Cuadro 5.3-1 y, fuera de texto, se presenta a escala 1:10.000, desde el Plano N°1-B al Plano N°8-B, como se indica en el siguiente cuadro:

Cuadro 5.3-1: Numeración de figuras de los mapas de susceptibilidad de inundación por maremoto.

N° Figura	Sectores incluidos	Escala de presentación
Figura 5-1	Sector N°1	1:30.000
Figura 5-2	Sector N°2	
Figura 5-3	Sectores N°3 y 4	
Figura 5-4	Sector N°5	1:40.000
Figura 5-5	Sector N°6	
Figura 5-6	Sector N°7	
Figura 5-7	Sector N°8	1:50.000

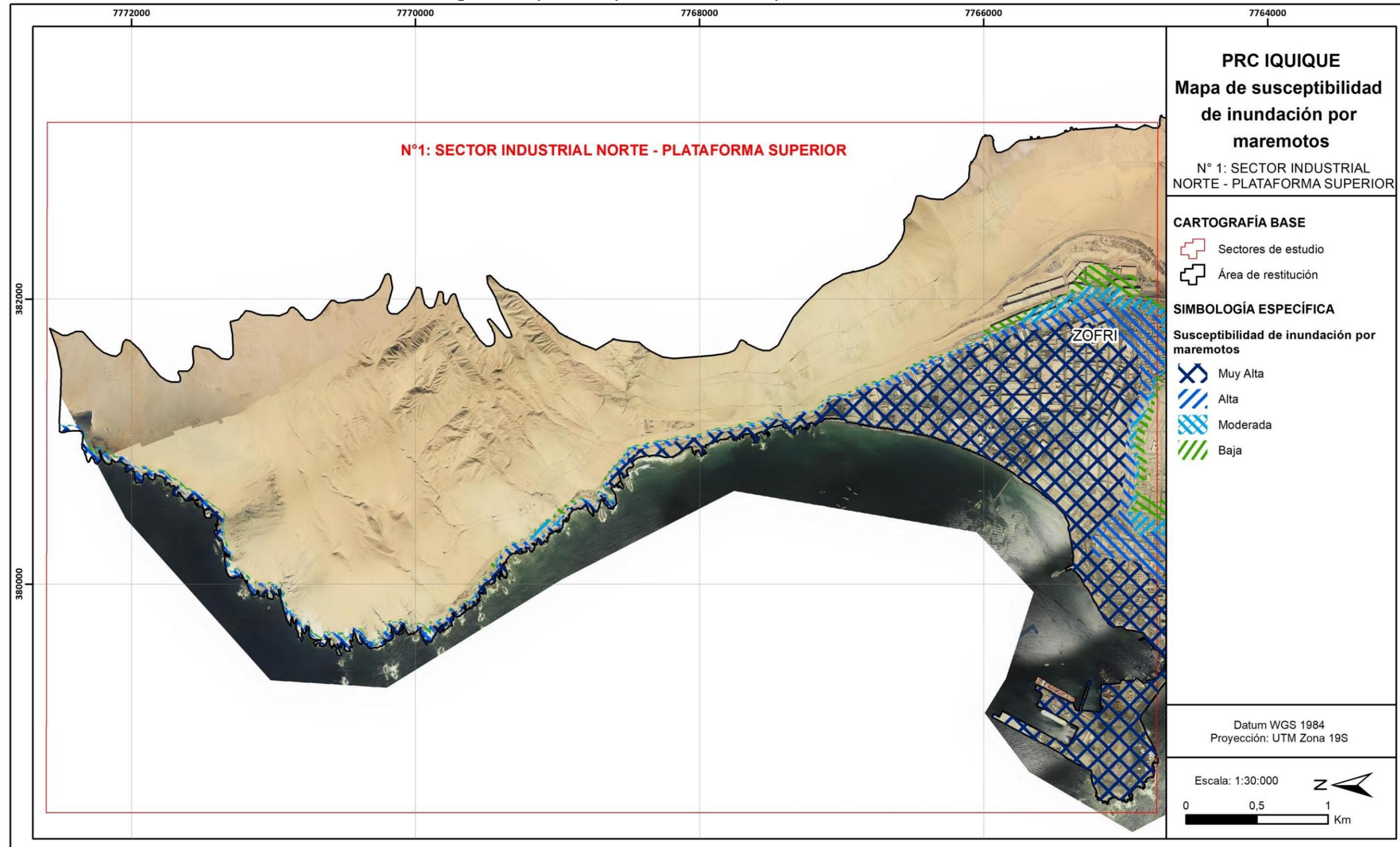
Fuente: Elaboración propia

Cuadro 5.3-2: Numeración de planos de los mapas de susceptibilidad de peligros geológicos.

Numeración de planos	Sectores incluidos
Plano N°1-B	Sectores N°1 y N°2
Plano N°2-B	Sectores N°3, N°4 y N°5
Plano N°3-B	Sector N°6 - Oeste
Plano N°4-B	Sector N°6 - Este
Plano N°5-B	Sector N°7
Plano N°6-B	Sector N°8 - Norte
Plano N°7-B	Sector N°8 - Sur
Plano N°8-B	Sector N°8 - Este

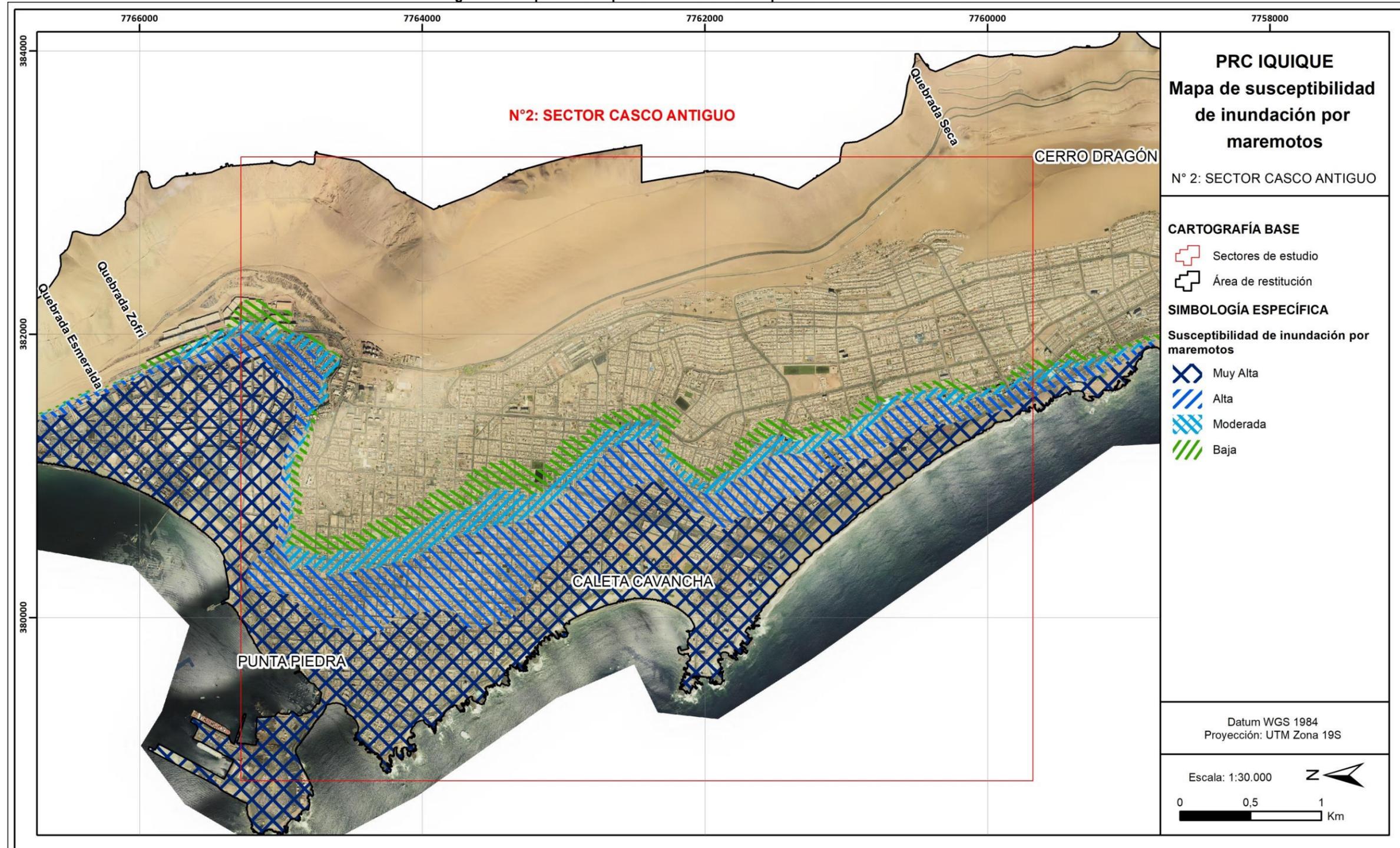
Fuente: Elaboración propia

Figura 5-1: Mapa de susceptibilidad de inundación por maremoto en el sector N°1.



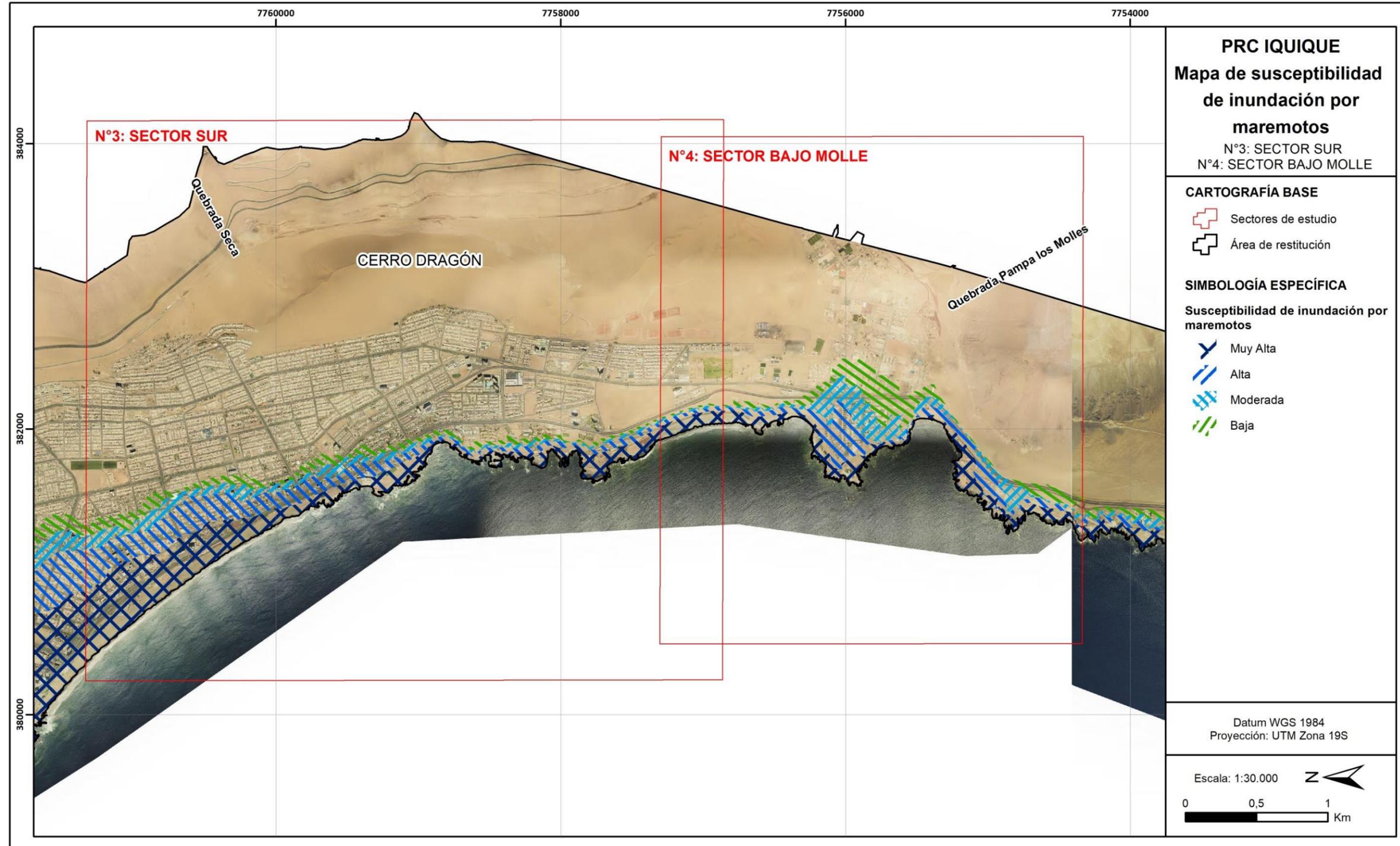
Fuente: Elaboración propia

Figura 5-2: Mapa de susceptibilidad de inundación por maremoto en el sector N°2.



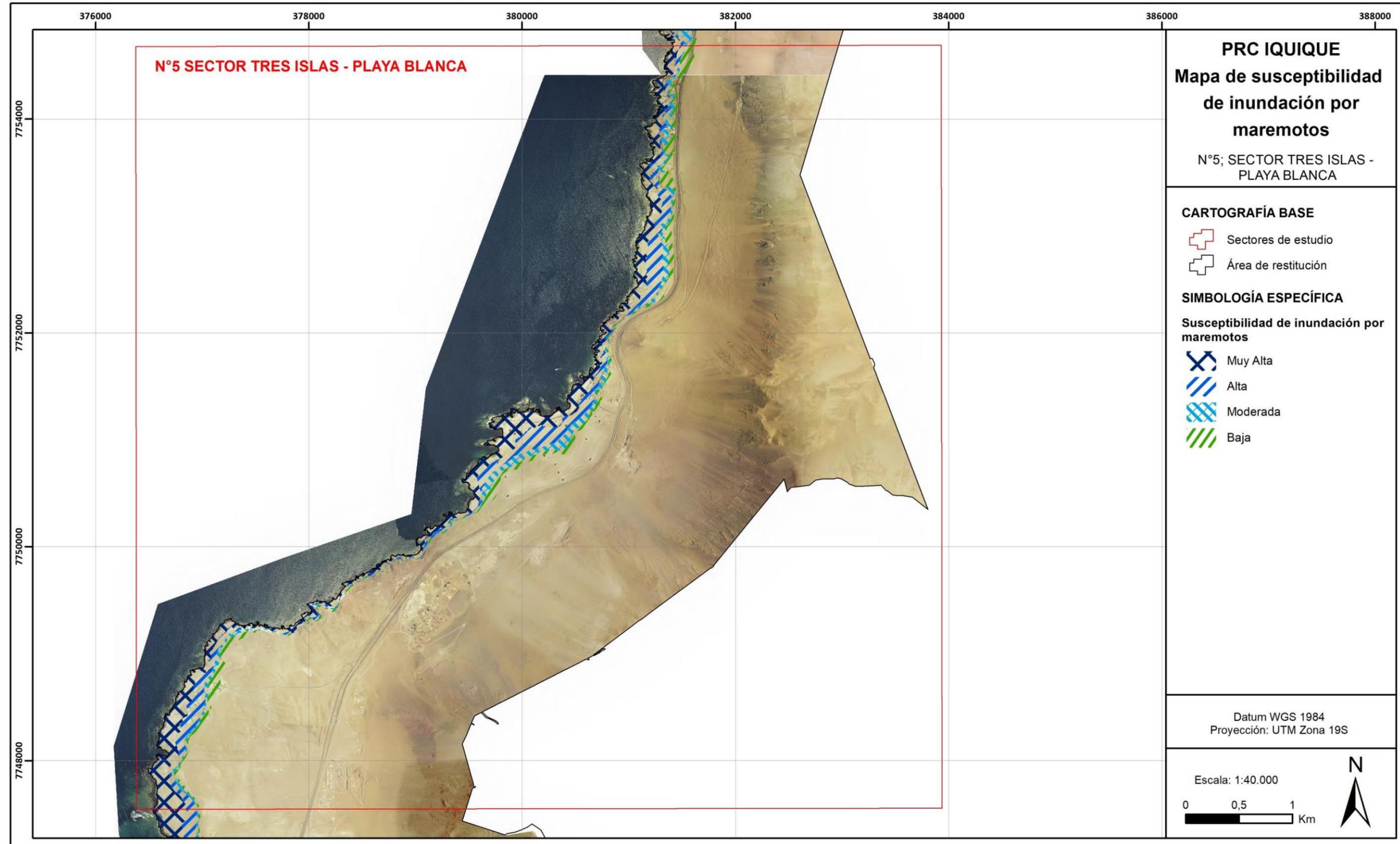
Fuente: Elaboración propia.

Figura 5-3: Mapa de susceptibilidad de inundación por maremoto en los sectores N°3 y 4.



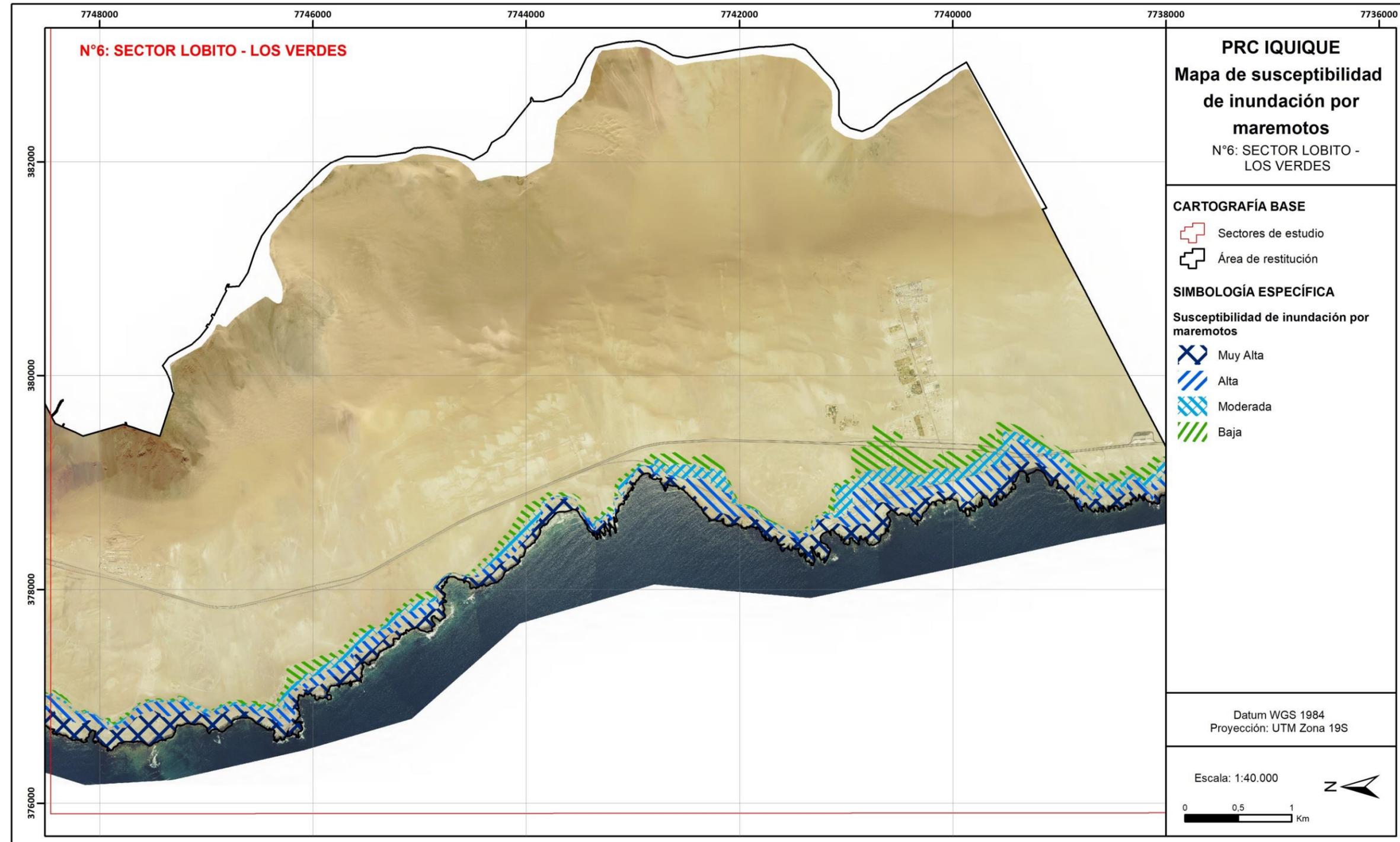
Fuente: Elaboración propia.

Figura 5-4: Mapa de susceptibilidad de inundación por maremoto en el sector N°5.



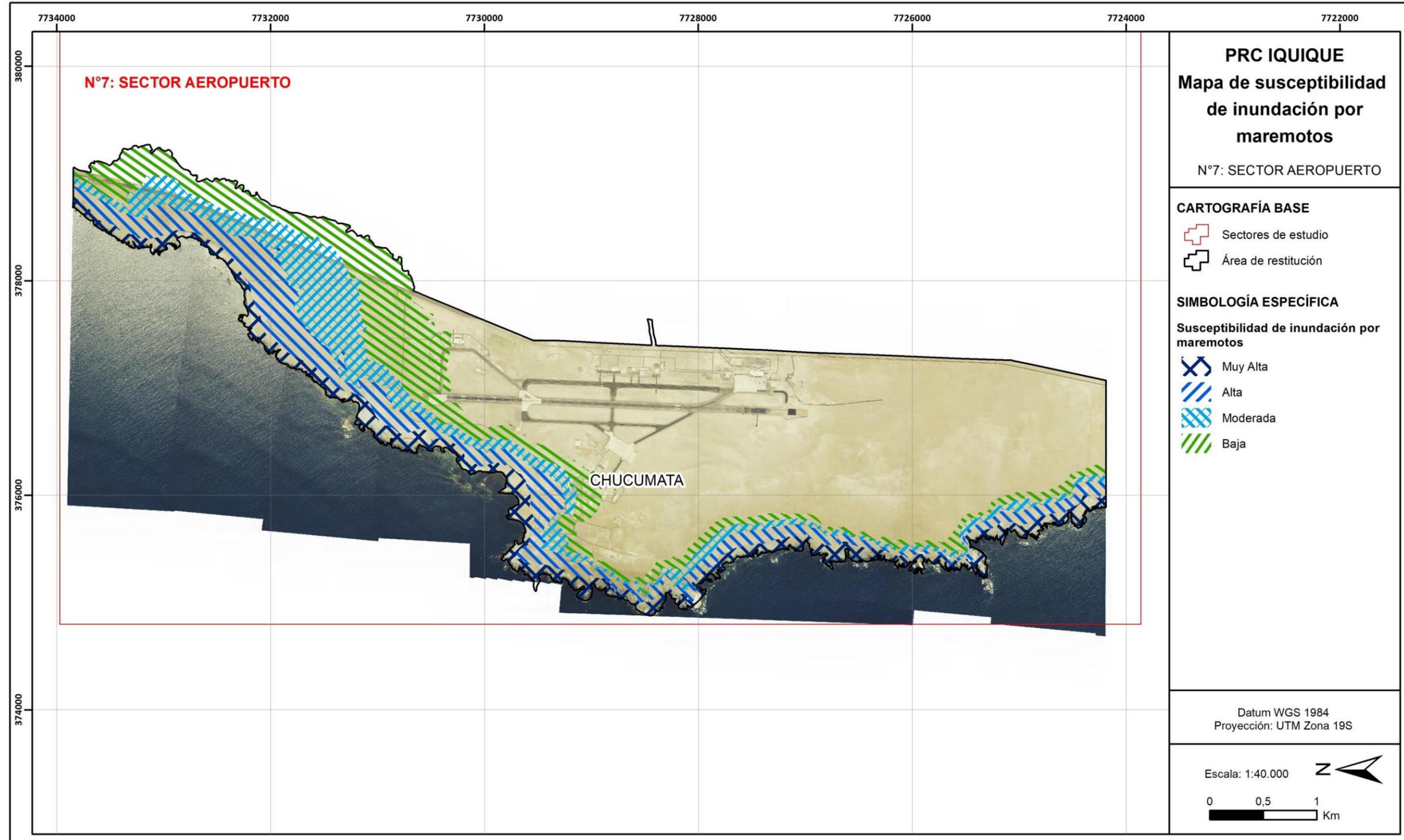
Fuente: Elaboración propia.

Figura 5-5: Mapa de susceptibilidad de inundación por maremoto en el sector N°6.



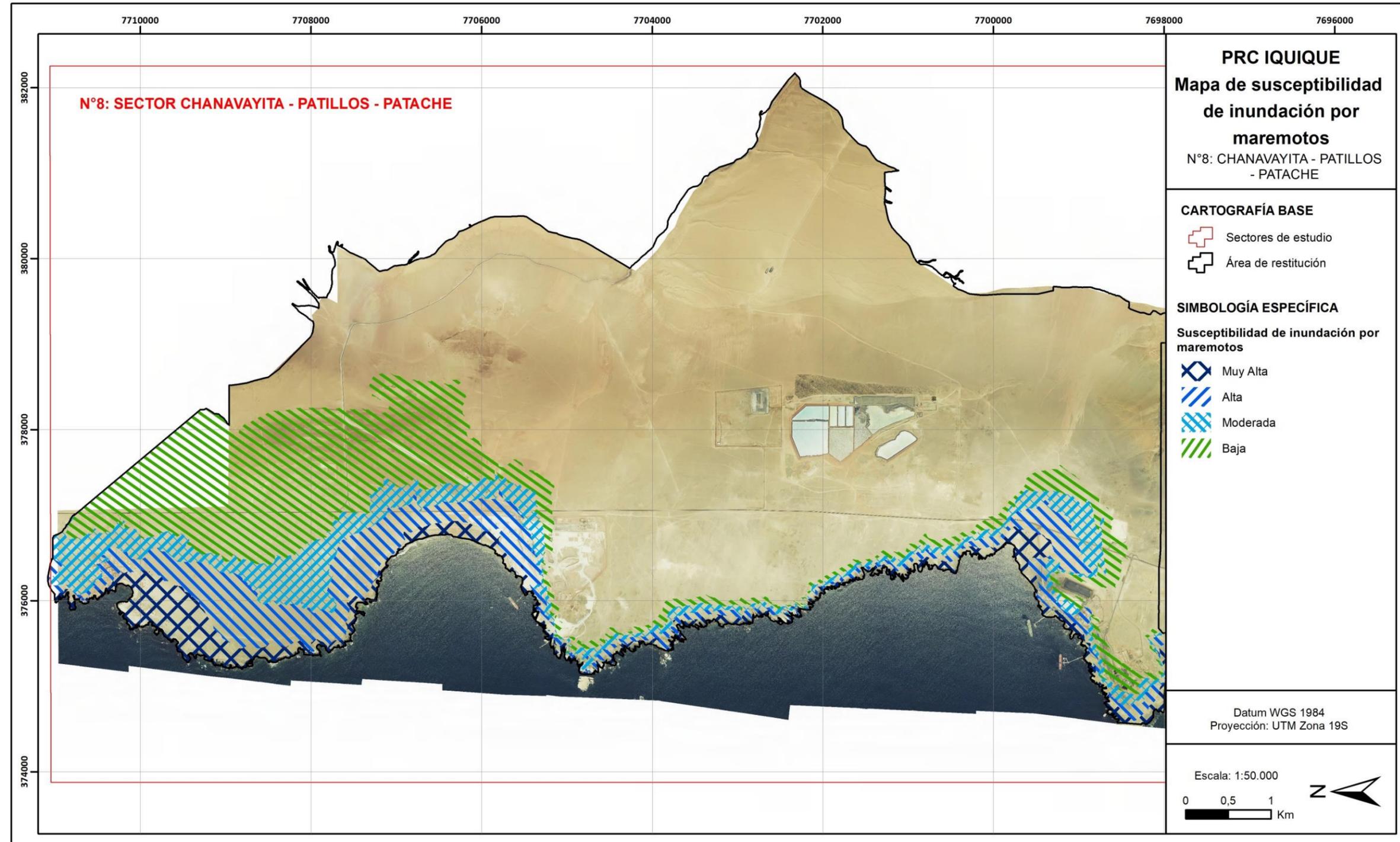
Fuente: Elaboración propia.

Figura 5-6: Mapa de susceptibilidad de inundación por maremoto en el sector N°7.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 5-7: Mapa de susceptibilidad de inundación por maremoto en el sector N°8.



Fuente: Elaboración propia.

6 REMOCIONES EN MASA

El término “remoción en masa” incluye una amplia variedad de procesos que generan el movimiento aguas abajo de los materiales que constituyen las laderas, incluyendo roca, suelo, relleno artificial o una combinación de las anteriores (ver Ilustración 11.2-13). El movimiento de estos materiales puede ser por caída, volcamiento, deslizamiento, propagación lateral o flujo (PMA-GCA, 2007). Cada uno de ellos se describe detalladamente en el Apéndice 11.2.2b) Procesos de remociones en masa”.

En este estudio, los peligros de remociones en masa son analizados separadamente: como (1) flujos de barro y detritos, correspondientes a movimientos de masa que trasladan material sedimentario con contenido de agua, lo que permite que se comporten como fluidos plásticos, y como (2) procesos de ladera, entendidos como aquellos desplazamientos de masas de tierra o rocas que se encuentran en pendiente que ocurren debido a la inestabilidad de los materiales que forman la ladera (incluyendo caídas de bloques, deslizamientos y retrocesos de laderas).

A continuación, se presenta (para flujos y para procesos de ladera) un catastro de los eventos de remociones en masa que han afectado al área de estudio, un diagnóstico que considera los factores condicionantes y una zonificación de susceptibilidad de cada peligro analizado¹⁷.

6.1 FLUJOS DE BARRO Y/O DETRITOS

6.1.1 Antecedentes y catastro

Se realizó una compilación bibliográfica que reúne distintos eventos de remoción en masa registrados en la comuna de Iquique por distintos autores (SERNAGEOMIN, 2013; Mather, Hartley, & Griffiths, 2014; Opazo E. , 2014; Fariás, 2017), cuya ubicación espacial referencial se presenta en la Figura 6-8 y, en el Cuadro 11.5-2 (Apéndice 11.5.2), se detalla la ubicación geográfica, el tipo de peligro, la descripción y la fuente de información de cada evento. Para la construcción del catastro, se consideraron los siguientes peligros de remoción en masa: flujo de barro y/o detritos, caída de bloques (o rocas) y deslizamientos.

De manera complementaria, durante las campañas de terreno se llevó a cabo la elaboración de un registro de remociones en masa complementario al catastro bibliográfico. Este registro incluye observaciones acerca de las siguientes remociones en masa: flujos de barro y/o detritos, caída de bloques (o rocas) y deslizamientos, y es presentado en el Cuadro 11.5-3 (Apéndice 11.5.2).

ARCADIS-MOP (2012) presenta una recopilación de eventos de precipitaciones importantes registrados por la prensa en Iquique, que se sistematiza en el Cuadro 6.1-1. Esta compilación no incluye, necesariamente, la totalidad de eventos ocurridos, ni tampoco se garantiza que los eventos de precipitación listados hayan generado aluviones. Esta información es insuficiente para asignar una recurrencia a los flujos o a los eventos de precipitaciones con condiciones favorables para generarlos.

Entre los eventos recopilados, el más importante es el ocurrido en julio de 1940, cuando ocurrieron precipitaciones de gran intensidad durante 18 horas, que generaron una serie de aluviones de barro, arena y piedras, en distintas quebradas de Iquique y Alto Hospicio. Estos aluviones aparentemente no habrían alcanzado la ciudad de Iquique de ese entonces, la cual ocupaba un área mucho más pequeña, prácticamente

¹⁷ Durante las etapas de observaciones de este estudio, fue publicado el trabajo del Sernageomin “Peligros geológicos del área de Iquique-Alto Hospicio, Región de Tarapacá, 1:20.000”, de Opazo et al. (2018). Dicho estudio, por solicitud del Sernageomin establecida en el oficio ORD N° 1154/2022, con fecha 14/09/2022, fue debidamente analizado, y se incorporaron a este informe los antecedentes que fueron considerados relevantes. En particular, en el Apéndice 11.8, se agregó íntegramente la tabla de catastro de remociones en masa de Opazo et al. (2018).

restringida al sector entre el actual puerto de Iquique hasta Punta Cavancha. Dos de estos flujos aluvionales ocurrieron en los cauces naturales de las quebradas Esmeralda y Zofri (Figura 6-1); estos flujos de barro y arenas rojas llegaron al borde superior del Acantilado Costero desde donde desbordaron hacia el sector donde actualmente se encuentra la ZOFRI (SERNAGEOMIN, 2013). Además, la línea férrea Iquique-Humberstone (Ruta 5), fue cortada por flujos de barro en 21 sectores distintos, dejando zanjones de hasta 7,5 m de profundidad y aterramientos de hasta 4 m de espesor (SERNAGEOMIN, 2013). También se activaron las quebradas Seca, Santa Rosa, La Pampa y Los Molles, generando flujos de detritos que inundaron parte de los sectores urbanos de Iquique existentes a esa fecha. Incluso el diario “El Tarapacá”, mencionó que desde el Acantilado costero “rodaron rieles y durmientes hasta el mar” (SERNAGEOMIN, 2013; ARCADIS-MOP, 2012). Por otro lado, el mismo año ocurrieron flujos de detritos en las quebradas Obispo, Huantajaya y La Encañada, las cuales drenan hacia la pampa de Alto Hospicio (SERNAGEOMIN, 2013).

El 9 de agosto del 2015 hubo un temporal en el que se midieron 7,7 mm de precipitaciones en Iquique y 5,0 mm en Tocopilla, que dejó como consecuencia un aluvión en el sector de caleta San Marcos (SERNAGEOMIN, 2015) y 50 familias afectadas¹⁸ (

Figura 6-2). Según el relato de lugareños de las caletas, como el presidente de la Junta de Vecinos de Chanavayita, Sr. Marcos González, ese 9 de agosto llovió por casi 5 horas, desde las 8 am hasta la 1 pm, generando aluviones que afectaron a los sectores de Patillos y Patache, arrastrando autos, camiones y contenedores.

En general, los flujos presentan condiciones para afectar directamente a áreas pobladas, como varios sectores de Iquique (los más críticos son los que se ubican inmediatamente bajo las quebradas Zofri y Esmeralda, Seca y Pampa Los Molles); otro caso se presenta en el área de Lobito-Los Verdes en el sector del proyecto habitacional Alto Playa Blanca, sobre el cual se observó el depósito de un abanico aluvial reciente, por lo que podría ser afectado por flujos (Figura 6-3).

Cuadro 6.1-1: Principales eventos de precipitaciones en Iquique.

Fecha del evento	Precipitación (mm)	Observación	Fuente utilizada
23 y 24 de junio de 1911	Sin información	Cobertura de prensa	Diarios
12 y 13 de junio de 1940	Sin información	Cobertura de prensa	Diarios
25 y 26 de julio de 1940	Sin información	Cobertura de prensa, generó evento aluvional	Diarios
16 de septiembre de 1965	4,2	Cobertura de prensa	Diarios
16 de enero de 1969	6,0		Diarios
10 de enero de 1992	1,0		Diarios
12 de enero de 1992	1,0		Diarios
14 de enero de 1992	4,0		Diarios
27 y 28 de mayo de 1992	3,5 y 7,0, respectivamente	Cobertura de prensa	Diarios
1, 2 y 3 de julio de 2002	0,8, 0,5 y 3,7, respectivamente	Cobertura de prensa	Diarios
2 de julio de 2009	3,0		Registro de precipitaciones diarias
7 de julio de 2011	3,0	Se generó escurrimiento en algunas de las quebradas	Registro de precipitaciones diarias

Fuente: Modificado de ARCADIS-MOP (2012).

¹⁸ <http://www2.latercera.com/noticia/lluvias-dejan-35-mil-hogares-afectados-en-r-de-tarapaca/>, consultado el 27/03/2018.

Figura 6-1: Marca de antiguo flujo de detritos generado en quebrada Zofri y conducido por el Acantilado Costero, hacia Iquique.



Fuente: Extraído de SERNAGEOMIN (2013)

Figura 6-2: Aluvión en caleta San Marcos



Fuente: Extraído de SERNAGEOMIN (2015)

En el Apéndice 11.5.2 se incluyen otros sitios en donde fueron identificados depósitos de flujos de detritos por Opazo (2014).

Figura 6-3: Conjunto Alto Playa Blanca, ubicado en un abanico aluvial.

Fuente: Archivo fotográfico de terreno.

6.1.2 Diagnóstico

Los flujos se relacionan con las quebradas que van desde los sectores altos de la comuna hacia los sectores bajos, a través de zonas de pendiente alta, lo que determina que el escurrimiento a través de ellas tenga un nivel de energía elevado, favoreciendo el transporte del material que se acumula en las laderas o en los cauces. De esta manera, la ocurrencia de flujos está condicionada por la existencia de una cuenca en la cual se colectan los aportes de lluvia y material detrítico, que se acumula y es transportado por las corrientes de agua. El factor desencadenante más común corresponde a lluvias líquidas intensas que afectan localmente a las quebradas y desestabilizan el material detrítico.

En el relieve relictivo de la Cordillera de la Costa, existe una serie de quebradas, actualmente inactivas, las cuales pueden ser activadas durante lluvias de gran intensidad, como la ocurrida en julio de 1940. Estas quebradas “desembocan” a través del acantilado, y eventualmente alcanzan las planicies litorales, en donde se encuentran las zonas pobladas. Por lo tanto, dichas zonas, que pueden encontrarse pobladas, presentan condiciones para ser afectadas ya sea a importantes flujos de barro y detritos (aluviones) o por inundaciones con baja cantidad de sedimentos, según la concentración y tamaño de sedimentos que traiga el cauce activado.

Se identificaron factores condicionantes que ayudan a determinar, de manera cualitativa, la probabilidad de que se genere un flujo en una quebrada en particular, y el alcance que estos pueden tener. Entre estos factores se encuentran (1) el catastro de flujos con registro histórico ocurridos en el área del proyecto, (2) la forma y el

tamaño de las cuencas aportantes, (3) la litología del acantilado costero, y (4) la morfología de los cauces y de las áreas circundantes.

En el catastro destacan dos eventos de precipitaciones, de magnitudes y efectos diferentes, pero que, en conjunto entregan información muy relevante. El primero de ellos ocurrió en julio de 1940, que es el más extremo ocurrido en la zona, por lo que entrega antecedentes para conocer cómo afecta este peligro al área de Iquique y su entorno cercano, que eran las zonas donde existían actividades en ese entonces. De esta forma, las quebradas Esmeralda, Zofri, Seca y Pampa Los Molles afectaron al área que en ese tiempo ocupaba Iquique o a su entorno cercano. El segundo de estos eventos ocurrió en agosto de 2015, que fue de una magnitud considerablemente menor y afectó en mayor medida a la parte sur de la comuna, sin embargo, la existencia de imágenes satelitales permite comparar las situaciones anterior y posterior al evento, lo que ayuda a comprender con un nivel de detalle mayor cómo inciden los otros factores que se describen más adelante. Esto último se complementó con las observaciones durante la visita a terreno.

Las cuencas que se encuentran en la Cordillera de la Costa y que drenan hacia la vertiente occidental definen las zonas donde pueden ocurrir flujos

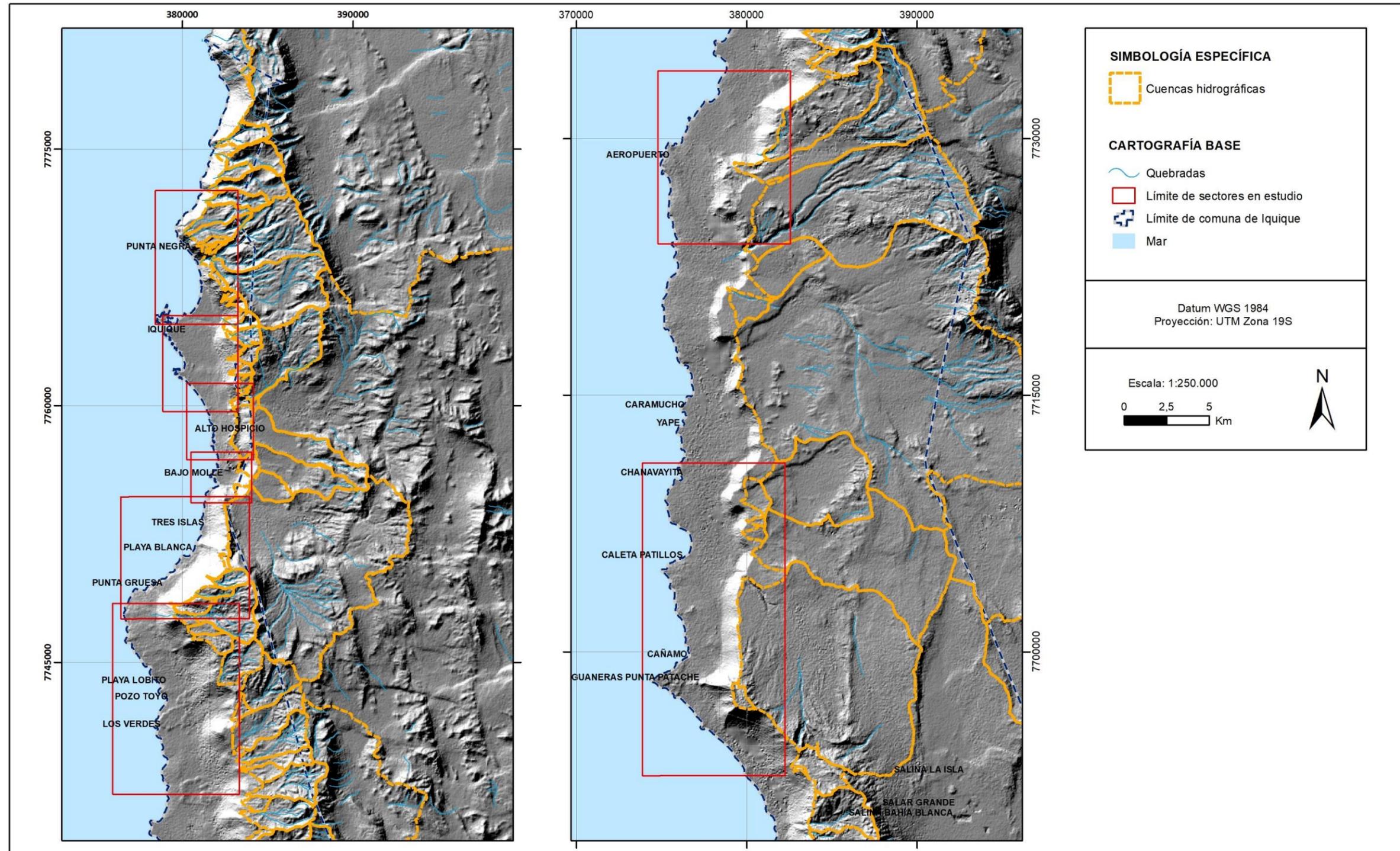
Las cuencas aportantes plantean una discusión respecto al caudal máximo que se puede esperar en una quebrada, debido a la morfología de las cuencas. En general, los cauces reducen progresivamente su pendiente desde la cabecera hacia la parte más baja, sin embargo, en la comuna de Iquique se encuentra el Acantilado Costero que, en la mayoría de los casos, les da una forma especial a los cauces, que desde la cabecera hacia abajo presenta una pendiente que progresivamente disminuye hasta llegar al acantilado, donde la pendiente de las quebradas tiene un aumento muy grande y de manera abrupta. Desde este punto, la pendiente nuevamente empieza a decrecer. Una consecuencia de lo anterior es que una lluvia muy localizada e intensa (que afecte sólo al acantilado) podría generar un caudal mayor que una lluvia que afecte a la totalidad de la cuenca. Otro efecto de esto, derivado de lo anterior, es que una cuenca que se presente muy ramificada en el acantilado, ante la misma precipitación descrita anteriormente, podrá generar un caudal mayor. Esto último ocurre en zonas donde el acantilado presenta una forma cóncava.

La litología, en general, es poco importante, excepto en lo relativo a las dunas que, por sus características granulométricas y el tamaño de los depósitos, pueden presentar una alta capacidad para frenar un escurrimiento principalmente líquido. Por otra parte, en las dunas pueden ocurrir flujos secos, asociados a arena que se desplaza por la duna hacia abajo, sin necesidad de que haya agua. Estos procesos suelen afectar a pequeños volúmenes de material y ser poco importantes como peligro.

Con respecto a las formas presentes en los cauces, hay dos aspectos que se consideraron relevantes. El primero de ellos tiene que ver con la gran cantidad de actividades permanentes que se desarrollan a lo largo de los cauces naturales, que, pese a que presentan escurrimiento muy esporádico, no resulta recomendable. Esto se manifiesta en construcciones y movimientos de tierra a lo largo de la red de drenaje natural.

Otro aspecto relevante tiene que ver con el desarrollo de abanicos aluviales al pie del Acantilado Costero, que son el resultado de una disminución abrupta en la pendiente, que produce una rápida reducción en la capacidad para transportar material generando las condiciones para que se deposite. Como consecuencia de este proceso de depositación, los abanicos aluviales están cambiando de forma permanentemente, lo que disminuye la probabilidad de predecir correctamente las zonas por donde debería escurrir el agua. De esta forma, los modelos unidimensionales de flujo, como HECRAS, son poco adecuados para representar el escurrimiento de agua en los abanicos aluviales. Por esta razón, el modelo hidráulico de las principales quebradas de Iquique (ARCADIS-MOP, 2012) sólo se utilizó referencialmente en el análisis de este peligro.

Figura 6-4: Cuencas ubicadas en la vertiente occidental de la Cordillera de la Costa.



Fuente: Elaboración propia.

Durante el año 2021 la Dirección de Obras Hidráulicas de Ministerio de Obras Públicas licitó un estudio para estudiar y modelar los eventuales flujos aluvionales que pudiesen afectar el área de Playa Blanca y Los Verdes (EIC Ingenieros - DOH, 2021). En este estudio se hizo un análisis hidrológico para las 9 principales cuencas que aportan al área, se desarrolló un estudio hidrológico en el que se estimaron caudales para períodos de retorno de 30, 50 y 100 años y, con ellos, se modelaron en 2D los respectivos flujos aluvionales. De los resultados se obtuvieron áreas de inundación para cada escenario en la planicie. Los resultados de este estudio fueron considerados como un insumo en la delimitación de la susceptibilidad de flujos de barro y o detritos para dichas cuencas. A partir de un criterio conservador se utilizó el resultado de la modelación para el período de retorno de 100 años de forma que las áreas resultantes fueron interpretadas según la profundidad de inundación y las condiciones geomorfológicas del terreno, considerando que los flujos al llegar a la planicie costera depositan material y continúan avanzando como inundación de caudal líquido efecto que no necesariamente se representa en los modelos numéricos.

6.1.3 Susceptibilidad

Como se explicó en la sección 6.1.2, se identifican cuatro factores principales que condicionan la ocurrencia de flujos: el catastro, las cuencas aportantes, la litología y la morfología de los cauces y sus zonas aledañas. Estos cuatro factores son los que se utilizaron como criterios para zonificar el peligro de flujos.

En primer lugar, se identificaron las cuencas que presentan condiciones favorables para que se generen flujos, pudiendo identificar tres casos: (1) las cuencas que presentan registros de haber sido afectadas por flujos, (2) las cuencas aportantes grandes (mayores que 1 km²), y (3) las cuencas que presentan forma cóncava en el Acantilado Costero. En aquellas áreas de flujo cuya cuenca aportante cumple al menos una de las tres condiciones anteriores se asignó un grado de susceptibilidad muy alta, mientras que en aquellas donde no se cumple ninguna de las tres condiciones, se asignó un grado de susceptibilidad alta.

Las zonas de susceptibilidad muy alta, es decir, aquellas en que se cumple al menos una de las tres condiciones que se describen en el párrafo anterior, se extendieron hasta el lugar donde la pendiente es igual a 4°. Aguas abajo de estas zonas y hasta donde la pendiente alcanza los 2°, se asignó un grado de susceptibilidad alta. Aguas debajo de estas zonas se asignó un grado de susceptibilidad moderada.

Las zonas de susceptibilidad alta o moderada se extendieron hasta alcanzar una pendiente de 4°.

También se definió que aquellos sectores ubicados en los abanicos aluviales, pero afuera de las zonas que presentaran condiciones más favorables para el escurrimiento, se les asignara una susceptibilidad moderada.

Por último, se definieron dos casos especiales. En aquellas quebradas que atraviesan zonas de depósitos eólicos, o dunas (PIHe), a la parte baja se le asignó una susceptibilidad moderada y que su alcance máximo sería donde hubiera una pendiente de 4°. Otro caso especial corresponde a sectores del Acantilado Costero en donde hay una serie de cauces paralelos de pequeñas dimensiones, que forman una especie de cortina. A estos sectores se les asignó una susceptibilidad alta.

En resumen, se definieron las siguientes categorías de susceptibilidad:

1. **Susceptibilidad Muy Alta:** Cauces que presentan registros de haber sido afectadas por flujos, asociados a cuencas aportantes mayores que 1 km² o con cuencas que presentan forma cóncava en el Acantilado Costero, en que se extienden hasta zonas con pendiente mayor que 4°. En las cuencas modeladas para el estudio de EIC ingenieros – DOH (2021), se consideró como Muy Altas las áreas con altura de inundación mayor a 50 cm y su continuación geomorfológica.

2. **Susceptibilidad Alta:** Cauces que no presentan registros de haber sido afectadas por flujos, están asociados a cuencas aportantes menores que 1 km² y con cuencas que no presentan forma cóncava en el Acantilado Costero, en zonas con pendiente mayor que 4°, excepto en aquellos casos en que el cauce atraviesa depósitos eólicos (PIHe). Cauces que presentan registros de haber sido afectadas por flujos, asociados a cuencas aportantes mayores que 1 km² o con cuencas que presentan forma cóncava en el Acantilado Costero, en zonas con pendiente entre 2 y 4°. Sectores del Acantilado Costero con alta concentración de pequeños cauces paralelos. En las cuencas modeladas para el estudio de EIC ingenieros – DOH (2021), se consideró como Altas las áreas con altura de inundación entre 30 y 50 cm y su continuación geomorfológica.
3. **Susceptibilidad Moderada:** Cauces que presentan registros de haber sido afectadas por flujos, asociados a cuencas aportantes mayores que 1 km² o con cuencas que presentan forma cóncava en el Acantilado Costero, en zonas con pendiente menor que 2°. Zonas en que los cauces atraviesan depósitos eólicos (PIHe). Zonas de los abanicos aluviales ubicadas fuera de las zonas más favorables para que exista escurrimiento. En las cuencas modeladas para el estudio de EIC ingenieros – DOH (2021), se consideró como Moderadas las áreas con altura de inundación menor a 30 cm y su continuación geomorfológica.

El mapa de susceptibilidad de flujos de barro y/o detritos elaborado a escala 1:1.000 y a escala 1:5.000 en las áreas de restitución (según corresponda) se presenta, a modo referencial dentro del informe, desde la Figura 6-17 a la Figura 6-23, como se indica en el Cuadro 6.1-2 y, fuera de texto, se presenta a escala 1:10.000, desde el Plano N°1-B al Plano N°8-B, como se indica en el siguiente cuadro:

Cuadro 6.1-2: Numeración de figuras de los mapas de susceptibilidad de remociones en masa por flujos de barro y/o detritos

N° Figura	Sectores incluidos	Escala de presentación
Figura 10.2-13	Sector N°1	1:30.000
Figura 10.2-14	Sector N°2	
Figura 10.2-15	Sectores N°3 y 4	
Figura 10.2-16	Sector N°5	1:40.000
Figura 10.2-17	Sector N°6	
Figura 10.2-18	Sector N°7	
Figura 10.2-19	Sector N°8	1:50.000

Fuente: Elaboración propia

6.2 PROCESOS DE LADERA

6.2.1 Antecedentes y catastro

En la comuna de Iquique, la zona que se encuentra más expuesta a caída de bloques está asociada al Acantilado Costero. Una de las zonas más afectadas por estos fenómenos es la ruta A-16. Debido al alta pendiente a lo largo del Acantilado costero durante el terremoto de Tarapacá del 13 de junio de 2005, se produjeron numerosos desprendimientos de bloques de hasta 2 m de diámetro; estos rodaron, principalmente, desde taludes de caminos y en algunos casos impactaron muros de contención (Marquardt & Naranjo, 2005) en la Ruta A-16. Uno de estos desprendimientos ocasionó el corte de esta ruta y provocó la muerte de seis personas que viajaban en un automóvil que desbarrancó en el kilómetro 5 de la ruta de Iquique a Alto Hospicio (EMOL¹⁹). Otro punto importante de caídas de roca es el escarpe de falla cercano al sector Zofri (SERNAGEOMIN, 2013).

¹⁹ <http://www.emol.com/noticias/nacional/2005/06/13/185366/terremoto-en-la-zona-norte-deja-al-menos-8-muertos-y-tres-heridos.html>

Farías (2017) y Opazo (2014) reconocen la ocurrencia de caída de bloques dentro de la comuna de Iquique, que se concentran en los sectores N°2 (“Sector Casco Antiguo”) y N°8 (“Sector Chanavayita-Patillos-Patache”) y al norte del sector N°3 (“Sector Sur”), como se muestra en la sección 11.5.2.

Hacia la Cordillera de la Costa, se presentan, localmente, bloques caídos, asociado a laderas con afloramiento rocoso de alta pendiente.

Es posible encontrar deslizamientos de arena (o flujos de detritos de arena de acuerdo con la clasificación de Hungr, et al. (2013)) asociados a complejos dunarios, principalmente en la Duna Dragón (SERNAGEOMIN, 2013).

En el talud antrópico de la ruta A-16 afloran sectores de roca altamente fracturada, los cuales se exponen en un alta pendiente, por lo que es posible que se generen deslizamientos de roca. Un deslizamiento de este tipo ocurrió en agosto del 2003, el cual produjo el bloqueo del camino²⁰. En este mismo camino, también es posible encontrar zonas que se encuentran expuestas a deslizamientos de suelo; una evidencia de este proceso corresponde a una grieta de tensión, local, ubicada en la parte más alta del talud, la cual se había formado en material no consolidado (Figura 6-5 y Figura 6-8).

Figura 6-5: Grieta de tensión en talud sobre unidad no consolidada.



Fuente: Extraído de Opazo (2014).

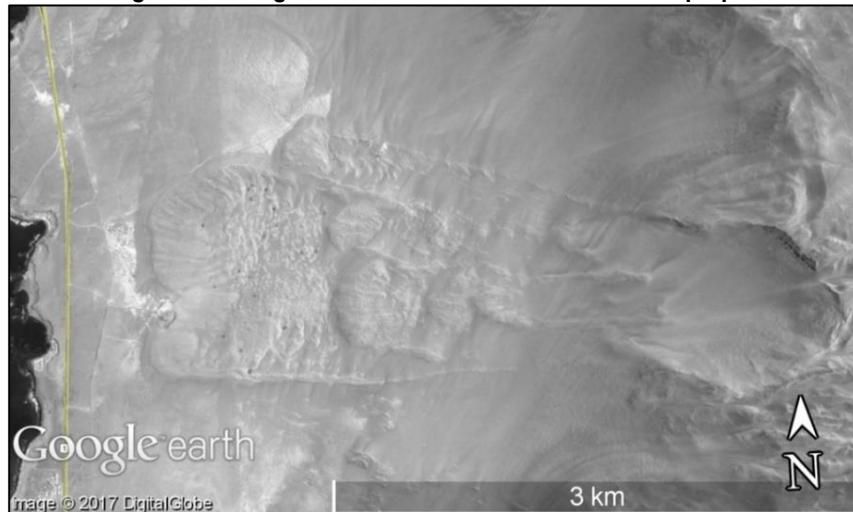
En este tipo de taludes se han presentado rodados y “derrumbes de ladera” durante los últimos terremotos ocurridos en la región. Tales como los de la Ruta A-16 durante el 13 de junio del 2005 (ONEMI, 2009a) y 1 de abril 2014 (Opazo E. , 2015), y en la Ruta A-65 en Pozo Almonte durante el terremoto de Tocopilla 2007 (ONEMI, 2009b).

Por otro lado, a lo largo del Acantilado Costero, se distribuye una serie de antiguos deslizamientos rotacionales, avalanchas (Figura 6-6) y escarpes antiguos de gran escala; los cuales son la prueba manifiesta acerca de las remociones en masa como procesos de formación del escarpe costero. Estas remociones en masa han sido ampliamente documentados (eg. Mather et al. (2014), Yugsi et al. (2012)), y se caracterizan por ser de gran

²⁰ www.desinventar.org

volumen (incluso superior a 106 m³) y por su antigüedad (de edad mayor a 40.000 años BP, Yugsi et al. (2012)), y debido a su volumen se clasifican mega-deslizamientos y mega-avalanchas (sturzstrom).

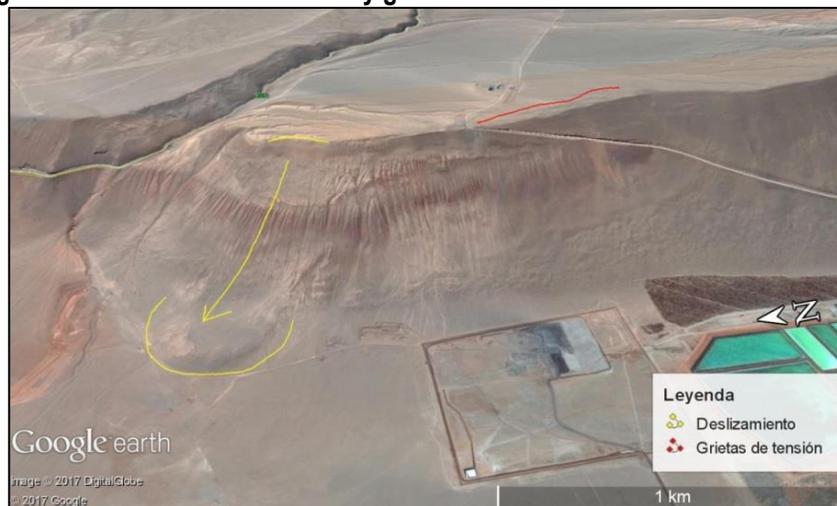
Figura 6-6: Mega avalancha en sector costero de Iquique.



Fuente: Extraído de Google Earth (24/2/2011)

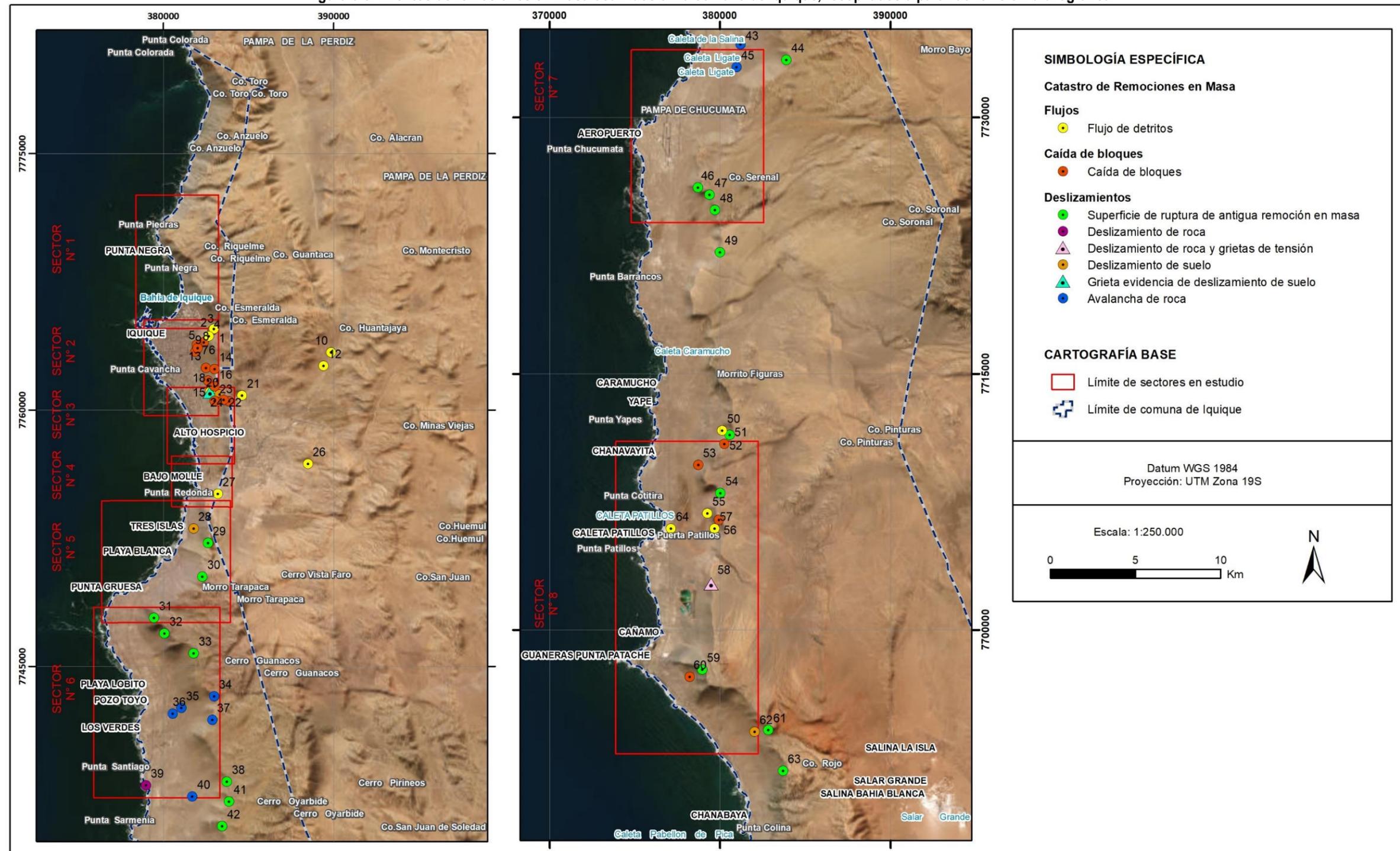
Un ejemplo de la actividad del escarpe del Acantilado Costero se presenta camino a Patache, cercano a la Ruta A-750 (Fariás, 2017). En este sector se observa una serie de grietas de tensión tras el escarpe (marcadas con rojo en Figura 6-7), las cuales son una muestra de procesos activos en la ladera y por lo tanto podrían ser conducentes a un deslizamiento de roca. En el mismo sector se identificó el depósito de un deslizamiento de roca (marcado en amarillo en la Figura 6-7).

Figura 6-7: Deslizamiento de roca y grietas de tensión en el Acantilado Costero.



Fuente: Elaboración propia a partir de Google Earth.

Figura 6-8: Eventos de remociones en masa ocurridos en la comuna de Iquique, recopilados a partir de revisión bibliográfica.



Fuente: Elaboración propia a partir de referencias citadas en el Apéndice 11.5.2.

6.2.2 Diagnóstico

a) Procesos naturales de ladera

La caída de bloques está condicionada por la existencia de discontinuidades o fracturas en las rocas que presentan condiciones de inestabilidad que favorecen su caída a través del talud. Existen factores geotécnicos que determinan la probabilidad de ocurrencia, como orientación, frecuencia de las discontinuidades y pendiente del talud, y factores condicionantes que controlan el daño generado, como el tamaño de los bloques y la distancia vertical recorrida por estos. En resumen, la mayor inestabilidad y por ende la generación de caída de bloques, ocurre a mayores pendientes y diferencias de cota con respecto al nivel del suelo. Este tipo de evento se desencadena principalmente por sismos y por lluvias extremas, pues genera la condición de inestabilidad para que los bloques caigan ladera abajo.

La composición granulométrica de los distintos suelos y el contexto geomorfológico (altas pendientes) son los principales condicionantes de la ocurrencia de deslizamientos de suelo. Las unidades litológicas no consolidadas (depósitos eólicos, aluviales, coluviales, etc.) se encuentran expuestas a la ocurrencia de deslizamientos superficiales de suelo (traslacionales). Por otro lado, las Gravas de Alto Hospicio, de mayor consolidación (gran cantidad de sales), presentan un alto peligro de desprendimientos, los cuales se comportan como caídas de rocas.

La comuna de Iquique se encuentra limitada orientalmente por el Acantilado Costero que, cuya topografía de relieve escarpado es altamente propensa a generar todo tipo de remociones en masa. Además, uno de los mecanismos erosivos más importantes que ocurrieron durante el pasado (al menos Pleistoceno) corresponde a los grandes deslizamientos compuestos y avalanchas, cuyos depósitos deslizaron hacia el mar o hacia las planicies litorales en donde actualmente se localizan las zonas pobladas e instalaciones mineras de Iquique; y cuyos escarpes se encuentran aparentemente activos en algunos sectores.

El Acantilado se encuentra principalmente expuesto a caídas de bloques y deslizamientos de suelo y roca en zonas aledañas a rutas viales, tales como la Ruta A-16 (Iquique - Alto Hospicio) y A-750 (Punta Patache), en las cuales la ladera ha sido desestabilizada por el corte de camino. Esto, debido a que allí el talud antrópico, deja expuestos afloramientos de roca altamente fracturados y afloramientos de suelo con evidencias de actividad actual (grietas de tensión), ambos bajo condiciones de alta pendiente y extensión de gran altura. Dichos procesos de remoción en masa pueden ser activados principalmente durante sismos de gran intensidad, tales como los que han ocurrido los años 2005, 2007 y 2014.

Es importante mencionar que la presencia de fallas activas o inactivas representa un factor condicionante para la ocurrencia de caídas de bloques o deslizamientos en roca; puesto que estas controlan el grado de meteorización de las distintas unidades litológicas consolidadas.

En general, se observa la actividad antrópica como un factor controlador de este tipo de remociones en masa, ya que interviene desestabilizando laderas naturales al llevarlas a condiciones de pendiente aún más extremas a las que presenta naturalmente. Un caso particular de esto se presenta en las operaciones de explotación de cantera, en donde los procesos de extracción del material dejan expuestos taludes de alta pendiente, los cuales representan un alto riesgo de caídas de rocas o caídas de potentes bloques de material semi-consolidado (Gravas de Alto Hospicio) frente a sismos de gran intensidad y/o magnitud. Tal como sucede por ejemplo en el Sector Sur Bajo Molle y el Sector Playa Blanca. Además, en algunos sectores, existen botaderos adheridos a estas laderas, los cuales se agrietaron durante el terremoto del 2014, y constituyen un peligro de deslizamiento de material no consolidado hacia la carretera (con bloques superiores a 15 cm).

b) Análisis geotécnico en taludes de canteras en sector Bajo Molle, Los Verdes y Playa Blanca

Como parte de este trabajo se realizó la evaluación de la estabilidad de 8 canteras de extracción de áridos, 4 de ellas ubicadas en el sector de Bajo Molle (Figura 6-9), y las 4 restantes en el sector de Playa Blanca (Figura 6-10), el análisis detallado de estas canteras se presenta en el informe “Análisis geotécnico de canteras” del Apéndice 11.7. Estas fueron mapeadas *in situ*, caracterizadas geotécnicamente y analizadas a través de métodos numéricos con el fin de estimar el alcance que tendrían los deslizamientos y caída de roca ante dos escenarios: sísmico y estático.

Cada cantera fue categorizada de acuerdo con las unidades geotécnicas que afloran en su talud, correspondientes a: una unidad no consolidada con predominancia de Gravas de Alto Hospicio (que geotécnicamente se clasifica como suelo) y roca perteneciente a la Formación Punta Barranco.

El análisis de terreno se enfocó en registrar el estado actual de los taludes, identificar cuáles eran las operaciones de extracción activas, realizar perfiles geotécnicos y reconocer la existencia de indicadores de procesos de ladera activos tanto en los taludes como en los botaderos.

La caracterización de las unidades geotécnicas se realizó mediante mediciones de terreno y revisión de la literatura disponible. En el caso de las Gravas de Alto Hospicio, la alta presencia de sales aumenta la resistencia del material permitiendo taludes inclinados (40°), sin embargo, la unidad presenta un deterioro de sus propiedades geotécnicas al contacto con el agua lo que disminuiría potencialmente su rigidez. Esto fue analizado por Tamblay (1983) quien propone una pérdida de cohesión del material, sin variaciones en el ángulo de fricción interna a no ser que algunas estructuras presentes en la unidad generaran expansión de grietas internas debido a un aumento de la presión de poros, lo que efectivamente disminuiría el valor del ángulo de fricción.

Para el caso de la Formación Punta Barranco, se realizaron líneas geotécnicas, reconociendo las principales estructuras y la condición del macizo rocoso, el cual se caracterizó con un GSI de 30 a 60, en unidades de Andesita y Basaltos, los que se encuentran afectados por excavaciones o procesos de tronadura. El análisis estereográfico de las estructuras encontradas no descarta totalmente mecanismos de fallas planas, cuñas o toppling, sin embargo, sugiere que el mayor potencial de fallamiento podría deberse a volcamientos de niveles superiores debido a la existencia de un set estructural con orientación paralela ($\pm 10^\circ$) a la pared del talud, pero con inclinaciones mayores (subverticales). Estos bloques podrían descolgarse y afectar el área por caídas de rocas, cuyos tamaños fueron estimados de acuerdo con los espacimientos de los sets y al material observado en las plataformas de operación de las canteras.

El análisis de estabilidad se realizó bajo los escenarios estático y sísmico (considerando una aceleración horizontal de 0.5 g). Para el caso de las canteras en unidad de suelo, el análisis sísmico arrojó una mayor área de deslizamiento, siendo este generalmente tendiente a formar un segundo talud más inclinado, el cual podría favorecer la ocurrencia de fallamiento progresivo de la ladera. Este deslizamiento tendría alcances por sobre 50 m fuera del área de operación, los que se detallan individualmente en el reporte completo (presentado en el Apéndice 11.7. “Análisis geotécnico de canteras”). En el caso de condición no sísmica, el fallamiento se asocia a una propagación del talud tendiente a arrastrar material no consolidado de los niveles superiores y disminuir el ángulo de inclinación de la pared. En aquellas canteras con predominancia de roca, no se observan fallamientos de los taludes sometidos a condición sísmica, por lo que los grandes eventos de remoción en masa estarían principalmente asociados a caída de rocas. Modelos numéricos de elementos finitos sugieren que la concentración de esfuerzo no generaría fallamiento de los taludes para grandes deslizamientos ya sea en el talud en roca, como en la vecindad de las estructuras que afloran en la cara de los taludes.

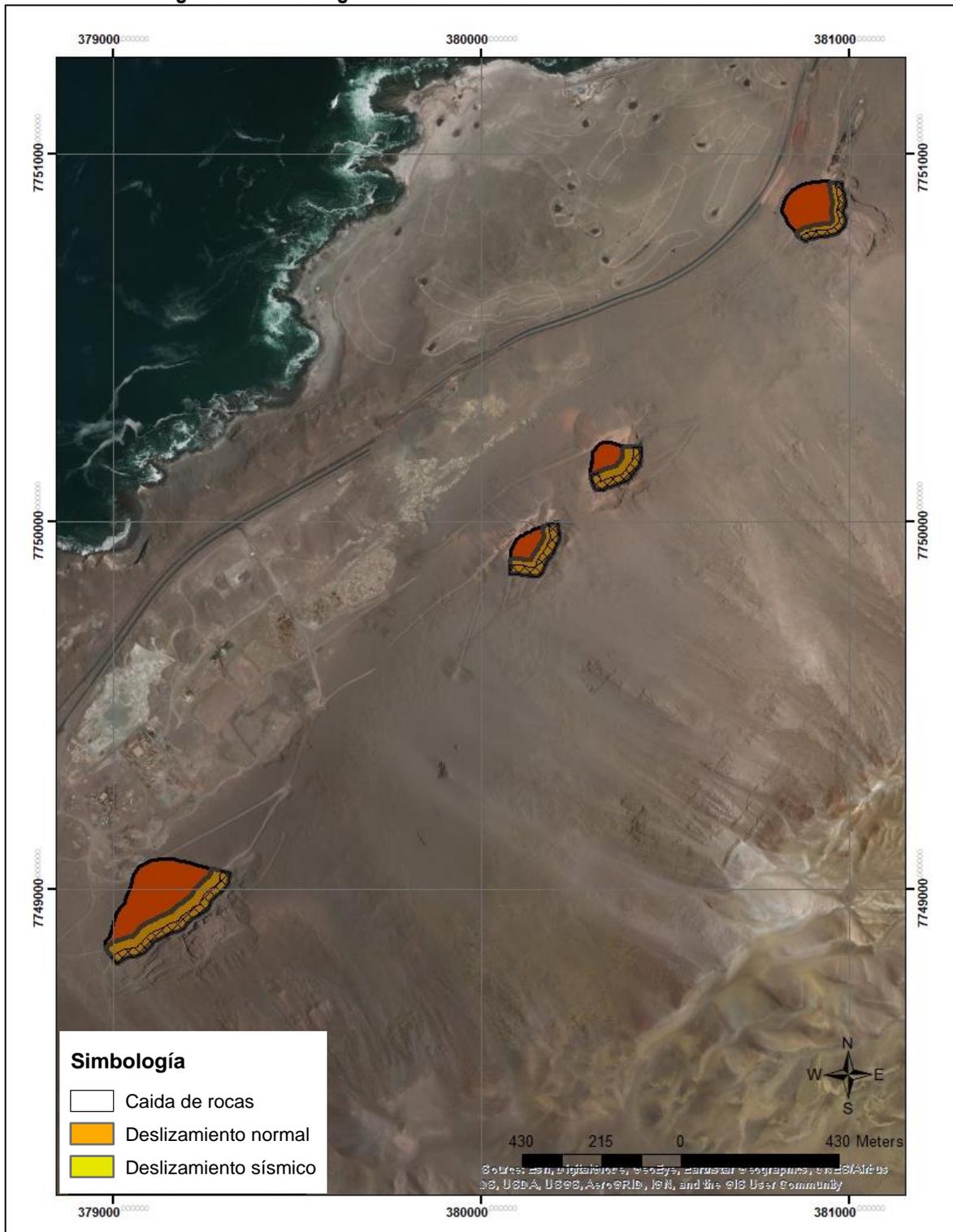
Actualmente, la operación (sin lineamientos geotécnicos) ha generado un talud cuyo botadero tiene inclinaciones promedio de entre 40° y 60° , sin existencia de bermas o banquetas intermedias, el cual se forma

naturalmente debido a la extracción descontrolada de la pata del talud. Habitualmente, los botaderos se encuentran formando parte del área de operación, es decir directamente bajo la zona de extracción. Esto los deja expuestos a la caída continua de material, el cual genera una sobrecarga sobre el mismo, favoreciendo condiciones de inestabilidad para posibles deslizamientos. Esta condición se ve aumentada debido a la actividad sísmica en la zona, la cual a su vez favorece la caída de rocas hacia el botadero. Esta condición de inestabilidad se evidencia por la presencia de grietas de tensión.

A lo anterior se suma el estado de los botaderos con material de origen antrópico, los cuales tienen una alta susceptibilidad a deslizarse y tener una mayor área de influencia para procesos de ladera (caída de roca y deslizamientos). Sin embargo, las relaciones de ángulo entre la ladera y estos materiales podrían generar caídas de rocas emplazadas en la vertical (es decir de alcance cercano al pie del talud).

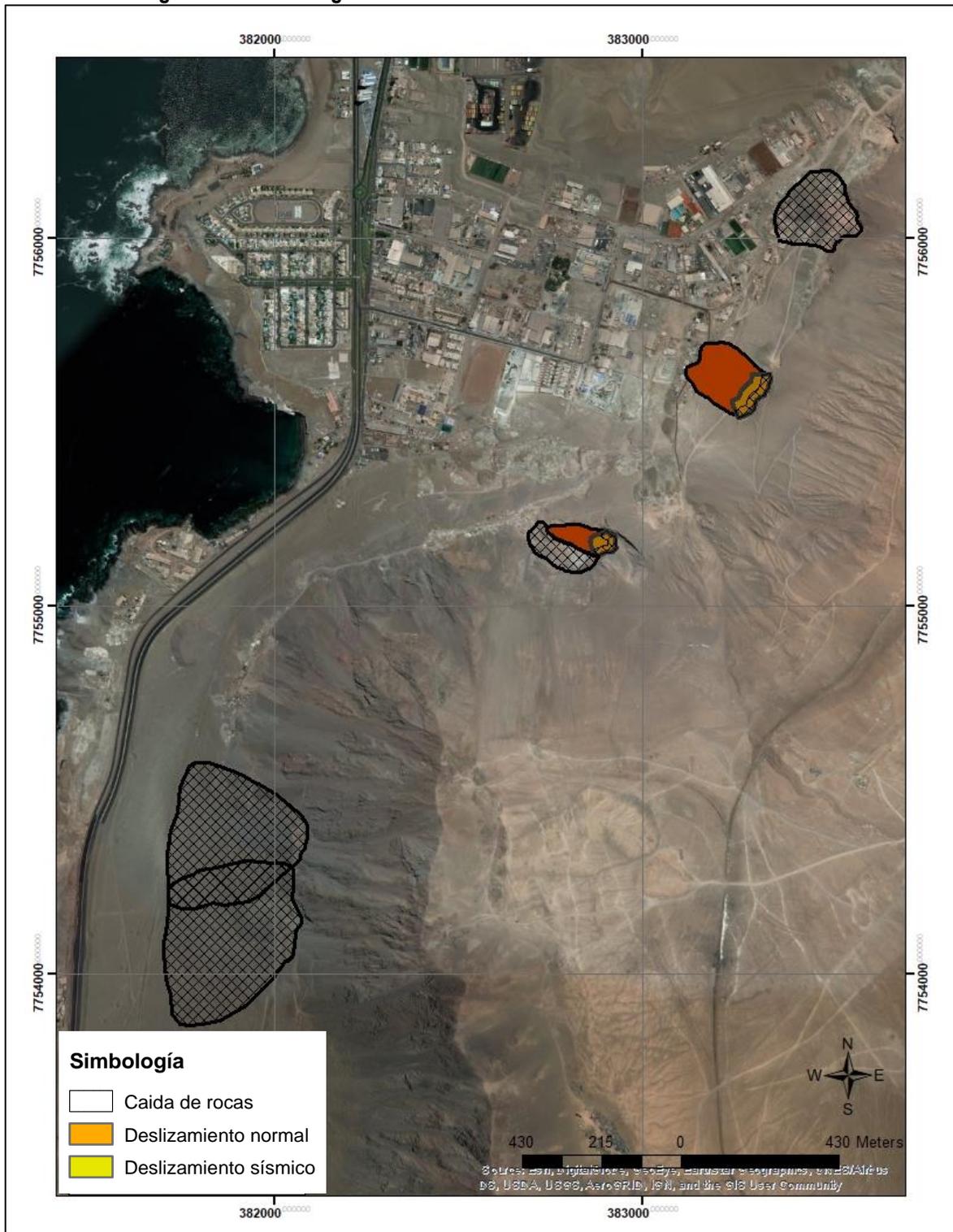
Finalmente, para las canteras compuestas tanto por las unidades geotécnicas de roca como de suelo se determinaron áreas de influencia de potenciales deslizamientos, es decir el alcance que tendría el material al caer, desprenderse y/o deslizarse desde los taludes. Estos resultados se presentan en las Figura 6-9 y Figura 6-10

Figura 6-9 Análisis geotécnico de canteras Sector Sur: Canteras 1 a 4



Fuente: Elaboración propia. Canteras y Áreas de Influencia, caracterizados por caídas de material ante escenario sísmico y estático.

Figura 6-10 Análisis geotécnico de canteras Sector Norte: Canteras 5 a 8.



Fuente: Elaboración propia. Canteras y Áreas de Influencia, caracterizados por caídas de material ante escenario sísmico y estático.

6.2.3 Susceptibilidad

La metodología de trabajo para el análisis de procesos de laderas se llevó a cabo considerando dos etapas:

- Susceptibilidad de generación de procesos de ladera
- Susceptibilidad de alcance por procesos de ladera

Cada una de estas etapas se detalla a continuación.

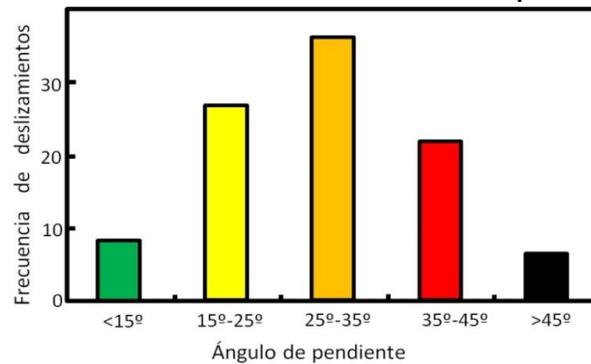
a) Susceptibilidad de generación de procesos de ladera

Con el fin de definir qué sectores del área de estudio son más susceptibles a ser afectados por procesos de laderas, se analizaron los factores condicionantes principales que generan una situación potencialmente inestable y los registros de ocurrencia de este fenómeno en el área de estudio, como se describe a continuación:

1. Pendiente: la topografía escarpada y ángulos altos de pendientes de laderas es el primer factor geomorfológico que debe ser considerado.
2. Geología: otro factor condicionante a considerar en este análisis corresponde a las condiciones geológicas que caracterizan a las laderas con pendientes pronunciadas.
3. Evidencias: de acuerdo con la información recopilada para el catastro, se consideran más susceptibles aquellas zonas que presentan evidencias de ocurrencia de procesos de laderas.

Para diferenciar qué pendientes son las más susceptibles de ser removidas, se utilizó la información compilada a partir de diversas fuentes que han generado catastros de deslizamientos en distintos lugares del mundo. Esaki et al. (2005) y Giraud y Shaw (2007), así como otros catálogos de deslizamientos, indican que la mayor frecuencia de deslizamientos se observa en pendientes de 25° a 35° de inclinación (Figura 6-11).

Figura 6-11 Frecuencia de deslizamientos en función de la pendiente del terreno.



Fuente: Esaki et al. (2005)

El número de registros de remociones en masa, tanto deslizamientos como caída de bloques, no permite hacer una estadística rigurosa; sin embargo, sí representa un buen indicador acerca de cuáles son las formaciones más propensas a generar algún proceso de ladera. Por lo tanto, en base al registro de observaciones de remociones en masa realizado en terreno (durante las dos campañas) acerca de: caídas de rocas, escarpes activos, deslizamientos, mega-avalanchas, etc. (Cuadro 11.5-3 en Apéndice 11.5.2), y al catastro bibliográfico presentado en la Sección 6.1.2, se identifican las zonas que presentan evidencia de procesos de ladera activos o recientes. Estas evidencias se encontraron en las unidades correspondientes a: Formación Punta Barranco, tanto el miembro basal clástico como el superior volcánico, Formación Oficina Viz, y a la Formación el Godo

(lutitas). Todos los procesos de ladera registrados se produjeron en estas unidades, en afloramientos con pendientes mayores a 15° .

En función de lo anterior, al considerar la geología, las pendientes de las laderas y las evidencias de ocurrencia de procesos de ladera, se caracterizaron las condiciones de generación de estos fenómenos. En donde las categorías de susceptibilidad son asignadas de acuerdo a los siguientes criterios generales: (1) para los sectores que no presentan evidencias de procesos de laderas se considera una relación directa entre los rangos de pendientes propuestos por Esaki *et al.* (2005) y los grados de susceptibilidad, utilizando una categoría de “Susceptibilidad Baja” para pendientes menores a 15° ; por otra parte, (2) en aquellos sectores que sí presentan evidencias de procesos de ladera activos o recientes, se asignó una categoría de susceptibilidad mayor, reconociendo que las rocas de estas unidades presentan condiciones favorables para la ocurrencia de procesos de ladera, es decir se asignó una categoría de “Susceptibilidad Moderada” para pendientes menores a 15° , tal como resume el Cuadro 6.2-1.

Cuadro 6.2-1: Categorías de susceptibilidad de generación de procesos de ladera

Evidencia de procesos de ladera		Pendiente			
		< 15°	$15^\circ - 25^\circ$	$25^\circ - 35^\circ$	> 35°
Sin evidencia de procesos de ladera	El resto de las unidades del área de estudio.	Baja	Moderada	Alta	Muy Alta
Con evidencia de procesos de ladera	Formación Punta Barranco, Formación Oficina Viz, y Formación el Godo.	Moderada	Alta	Muy Alta	Muy Alta

Fuente: Elaboración propia.

A partir de la metodología explicada anteriormente, se definieron las siguientes categorías de susceptibilidad:

- **Susceptibilidad de generación de procesos de ladera Muy Alta:** corresponde a sectores de ladera natural o taludes de pendiente sobre 35° en la mayoría de las unidades geológicas del área de estudio, y sobre 25° en los estratos pertenecientes a las formaciones Punta Barranco, Oficina Viz, y El Godo.
- **Susceptibilidad de generación de procesos de ladera Alta:** corresponde a sectores de ladera natural o taludes cuya pendiente es de entre 25° y 35° en la mayoría de las unidades geológicas del área de estudio, y entre 15° y 25° en los estratos pertenecientes a las formaciones Punta Barranco, Oficina Viz, y El Godo.
- **Susceptibilidad de generación de procesos de ladera Moderada:** corresponde a sectores de ladera natural o taludes cuya pendiente entre 15° y 25° en la mayoría de las unidades geológicas del área de estudio, y menores a 15° en los estratos pertenecientes a las formaciones Punta Barranco, Oficina Viz, y El Godo.
- **Susceptibilidad de generación de procesos de ladera Baja:** corresponde a sectores de ladera natural o taludes cuya pendiente es menor a 15° en la mayoría de las unidades geológicas del área de estudio, exceptuando los estratos pertenecientes a las formaciones Punta Barranco, Oficina Viz, y El Godo.

Este resultado corresponde a un resultado intermedio, y a un insumo para la determinación de la susceptibilidad de alcance, y se presenta de modo representativo en el Apéndice 11.6.

b) Susceptibilidad de alcance por procesos de ladera

Una vez obtenido el mapa de susceptibilidad de generación se procedió a determinar el escenario de susceptibilidad alcance, para cada grado de susceptibilidad. Preliminarmente se asignaron alcances de 200 m, 500 m y 800 m, para los grados de susceptibilidad Muy Alta, Alta y Moderada, respectivamente; sin embargo, estos resultados fueron modificados según el criterio de zonificación que se explica más adelante.

Durante la segunda campaña de terreno se realizaron observaciones directas de las condiciones geológicas y geomorfológicas del talud costero, con el objetivo de contrastar o validar la metodología predefinida y de dimensionar la escala y alcance de los procesos que ocurren dentro del área de estudio (Cuadro 11.5-3 en Apéndice 11.5.2). De este modo se identificó la posición exacta de rodados, bloques y desprendimientos provenientes del talud, así como también sus afloramientos de origen.

Se asume que la categoría de susceptibilidad de alcance se relaciona directamente con la susceptibilidad de generación previamente definida, de modo que: una susceptibilidad de generación Muy Alta tendrá tres grados de susceptibilidad de alcance: Muy Alta, Alta y Moderada; una susceptibilidad de generación Alta tendrá dos grados: Alta y Moderada; mientras que una susceptibilidad de generación Moderada sólo tendrá susceptibilidad de alcance Moderada.

Se observó que la distancia de alcance asociada a susceptibilidad de alcance Muy Alta se relaciona con procesos de menor escala, pero más frecuentes, tales como: caída de rocas, rodados, desprendimientos, por ejemplo. Mientras que las zonas de alcance moderada se relacionan mayormente a procesos menos frecuentes y de gran escala, de volumen superior a 9 km³ (del tipo de los descritos por Mather et al. (2014)), tales como: mega-deslizamientos o mega-avalanchas de roca.

Como fue mencionado en la sección 6.2.2b), se realizó la evaluación de la estabilidad de 8 canteras de extracción de áridos. Estas fueron mapeadas *in situ*, caracterizadas geotécnicamente y analizadas a través de métodos numéricos con el fin de estimar el alcance que tendrían los deslizamientos y caída de roca ante ambos escenarios: sísmico y estático. Los resultados de ambos escenarios fueron considerados para realizar la zonificación de alcance de procesos de ladera, de modo tal que las áreas afectadas como resultado del análisis estático quedaran contenidas al menos en la zona de susceptibilidad muy alta, mientras que las áreas afectadas por el escenario sísmico quedaran al menos contenidas en la zona de susceptibilidad alta.

Posteriormente se hizo un análisis cruzado de la información disponible: curvas de nivel, ortofotos, imágenes satelitales antiguas, catastro y observaciones de terreno, mapa de altura, mapa de pendientes, mapa geológico, mapas de análisis geotécnico de las canteras, mapa de generación de procesos de ladera, y mapa preliminar de alcance. Cabe mencionar que se encontró que las distancias estimadas preliminarmente para susceptibilidad alta (500 m) y moderada (800 m) habían sido sobreestimadas durante la primera aproximación, y fueron ajustadas apropiadamente durante este análisis. Por lo tanto, por medio de este análisis fue posible determinar las zonas de alcance de procesos de ladera para cada grado de susceptibilidad de acuerdo con las observaciones realizadas por el equipo consultor.

c) Síntesis de susceptibilidad de generación y alcance

Finalmente, las categorías de susceptibilidad de generación y alcance de procesos de ladera quedan definidas del modo siguiente.

1. **Susceptibilidad de generación y alcance de procesos de ladera Muy Alta:** áreas ubicadas topográficamente bajo zonas de generación de susceptibilidad muy alta; es decir, bajo sectores de ladera natural o taludes de pendiente sobre 35° en la mayoría de las unidades geológicas del área de estudio, y bajo pendientes mayores a 25° en los estratos pertenecientes a las formaciones Punta Barranco, Oficina Viz, y El Godo. Considerando una distancia de alcance promedio de 200 metros, modificada en base a la posición de los sitios de acumulación de caídas de rocas, rodados y desprendimientos, y a los cambios de pendiente.
2. **Susceptibilidad de generación y alcance de procesos de ladera Alta:** corresponden a: (1) zonas ubicadas topográficamente bajo zonas de susceptibilidad de alcance y generación alta, considerando una distancia de alcance condicionada por la altura del talud en la zona de origen, las características

morfológicas y pendiente de la planicie, en general esta distancia de alcance se encuentra en zonas de pendientes mayores a 15° en promedio; y (2) áreas ubicadas directamente bajo zonas de generación de susceptibilidad alta en los casos en que topográficamente sobre ellos no existen afloramientos de susceptibilidad de generación muy alta, es decir, bajo sectores de ladera natural o taludes cuya pendiente es de entre 25° y 35° en la mayoría de las unidades geológicas del área de estudio, y entre 15 y 25° en los estratos pertenecientes a las formaciones Punta Barranco, Oficina Viz, y El Godo. En este caso se considera una distancia de alcance promedio de 200 metros, modificada en base a la posición de los sitios de acumulación de caídas de rocas, rodados y desprendimientos, y a los cambios de pendiente.

3. **Susceptibilidad de generación y alcance de procesos de ladera Moderada:** corresponde a: (1) zonas ubicadas topográficamente bajo zonas de susceptibilidad de alcance y generación alta, considerando una distancia de alcance condicionada por la altura del talud en la zona de origen, las características morfológicas y pendiente de la planicie, en general esta distancia de alcance se encuentra dentro de la planicie en zonas de pendientes mayores a 10° en promedio; y (2) en las zonas no correspondientes a sitios de alcance de susceptibilidad mayores, a sectores de ladera natural o taludes cuya pendiente entre 15 y 25° en la mayoría de las unidades geológicas del área de estudio, y menores a 15° en los estratos pertenecientes a las formaciones Punta Barranco, Oficina Viz, y El Godo.

Los resultados apuntan a que las zonas más susceptibles del área de estudio se presentan asociadas al Acantilado Costero, el cual en toda su extensión presenta un nivel de susceptibilidad Alta y Muy Alta a procesos de ladera.

En el sector norte, desde Punta Piedras hasta la Altura de Caleta Cavanha, se encuentra una zona del talud asociada a generación de susceptibilidad Muy Alta, bajo la cual se disponen edificaciones asociadas a un sector industrial, por lo que *containers*, estacionamientos y también infraestructura vial se encuentran expuestos a una susceptibilidad Muy Alta de procesos de laderas (Figura 6-12). El sector de la plataforma norte se encuentra mayormente expuesto a una susceptibilidad Baja, con excepción de algunos sectores con susceptibilidad Moderada y Alta para procesos de ladera en pendientes de las quebradas y el acantilado costero, y Muy Alta para flujos de barro y/o detritos, debido a las quebradas que bajan hacia el oeste. En el talud costero, al oriente de Cerro Dragón, se dispone una zona de susceptibilidad Muy Alta, asociada a la Ruta A-16, lo cual deja comprometida la infraestructura vial allí disponible. El sector aldeaño a Falla Zofri, se encuentra expuesto a susceptibilidad muy alta de caída de rocas y deslizamientos de poco alcance (

Figura 6-13).

Figura 6-12 Caída de rocas activa en sector industrial de Iquique.

Fuente: Archivo fotográfico de terreno. La flecha negra señala la dirección de caída de rocas.

Figura 6-13 Escarpe de Falla Zofri.

Fuente: Archivo fotográfico de terreno.

El área de Tres Islas, Lobito y Los Verdes se encuentra expuesta a susceptibilidad Muy Alta, incluyendo el sector poblado de Bajo Molle, sin embargo, este sector está fuera de la comuna. Destaca la zona de nuevas viviendas sociales ubicada en el Sector de los Verdes (Alto Playa Blanca), la cual se encuentra expuesta a susceptibilidad alta de caídas de rocas, rodados y desprendimientos provenientes del corte en el talud, tal como muestra la Figura 6-14.

Figura 6-14 Viviendas sociales “Alto Playa Blanca”.

Fuente: Archivo fotográfico de terreno. En rojo se señala el escarpe activo, la flecha negra señala la dirección de caída de rocas.

El área de Chucumata, se encuentra a aproximadamente más de 800 metros del talud costero, por lo que no se encuentra expuesta a procesos de ladera.

El sector de Chanavayita, Patillos y Patache, se encuentra expuesta a susceptibilidad Muy Alta a lo largo de toda la extensión del talud costero. El sector más al sur presenta evidencias de antiguas mega-avalanchas, correspondientes a depósitos tipo *hummocky* relictos, ya bastante meteorizados (Figura 6-15). Por otro lado, el camino a la Ruta de la Sal (A-750) se encuentra expuesto a caídas de rocas locales, así como también deslizamientos; ya que se identificaron zonas de escarpes activos, asociadas a actividad antrópica (Figura 6-16).

Figura 6-15 Relictos de grandes avalanchas ocurridas en el escarpe costero.

Fuente: Archivo fotográfico de terreno. Se envuelve en negro el sector de depósitos de avalancha relictos.

Figura 6-16 Escarpes activos en ruta A-750 (camino de la Sal).

Fuente: Archivo fotográfico de terreno. Se señala en rojo el sector del escarpe activo.

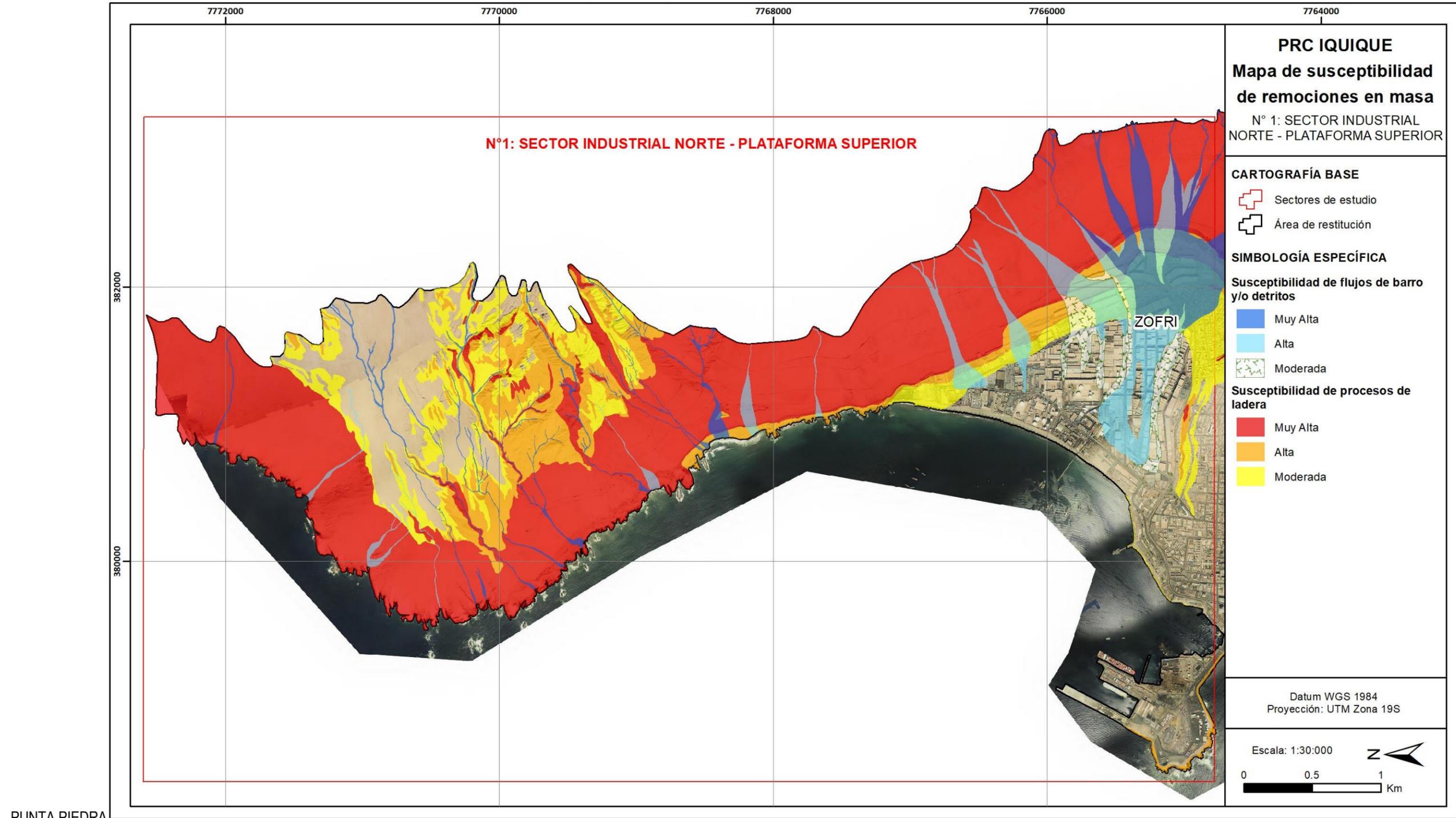
El mapa de susceptibilidad de procesos de laderas elaborado a escala 1:1.000 y a escala 1:5.000 en las áreas de restitución (según corresponda) se presenta, a modo referencial dentro del informe, desde la Figura 6-17 a la Figura 6-23, como se indica en el Cuadro 6.1-2 y, fuera de texto, se presenta a escala 1:10.000, desde el Plano N°1-B al Plano N°8-B, como se indica en el siguiente cuadro:

Cuadro 6.2-2: Numeración de figuras de los mapas de susceptibilidad de remociones en masa por procesos de ladera

N° Figura	Sectores incluidos	Escala de presentación
Figura 10.2-13	Sector N°1	1:30.000
Figura 10.2-14	Sector N°2	
Figura 10.2-15	Sectores N°3 y 4	
Figura 10.2-16	Sector N°5	1:40.000
Figura 10.2-17	Sector N°6	
Figura 10.2-18	Sector N°7	
Figura 10.2-19	Sector N°8	1:50.000

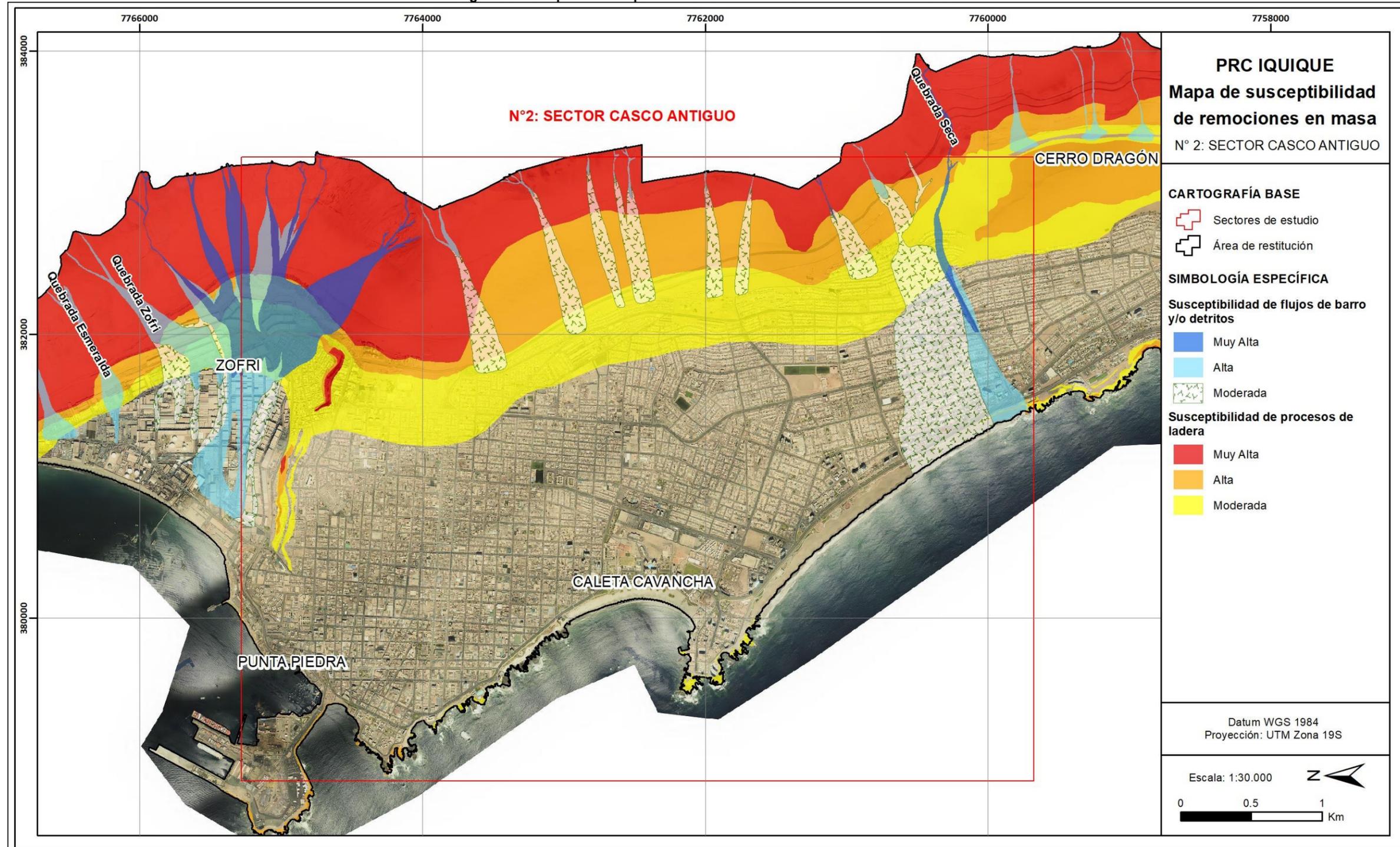
Fuente: Elaboración propia

Figura 6-17: Mapa de susceptibilidad de remociones en masa en el sector N°1



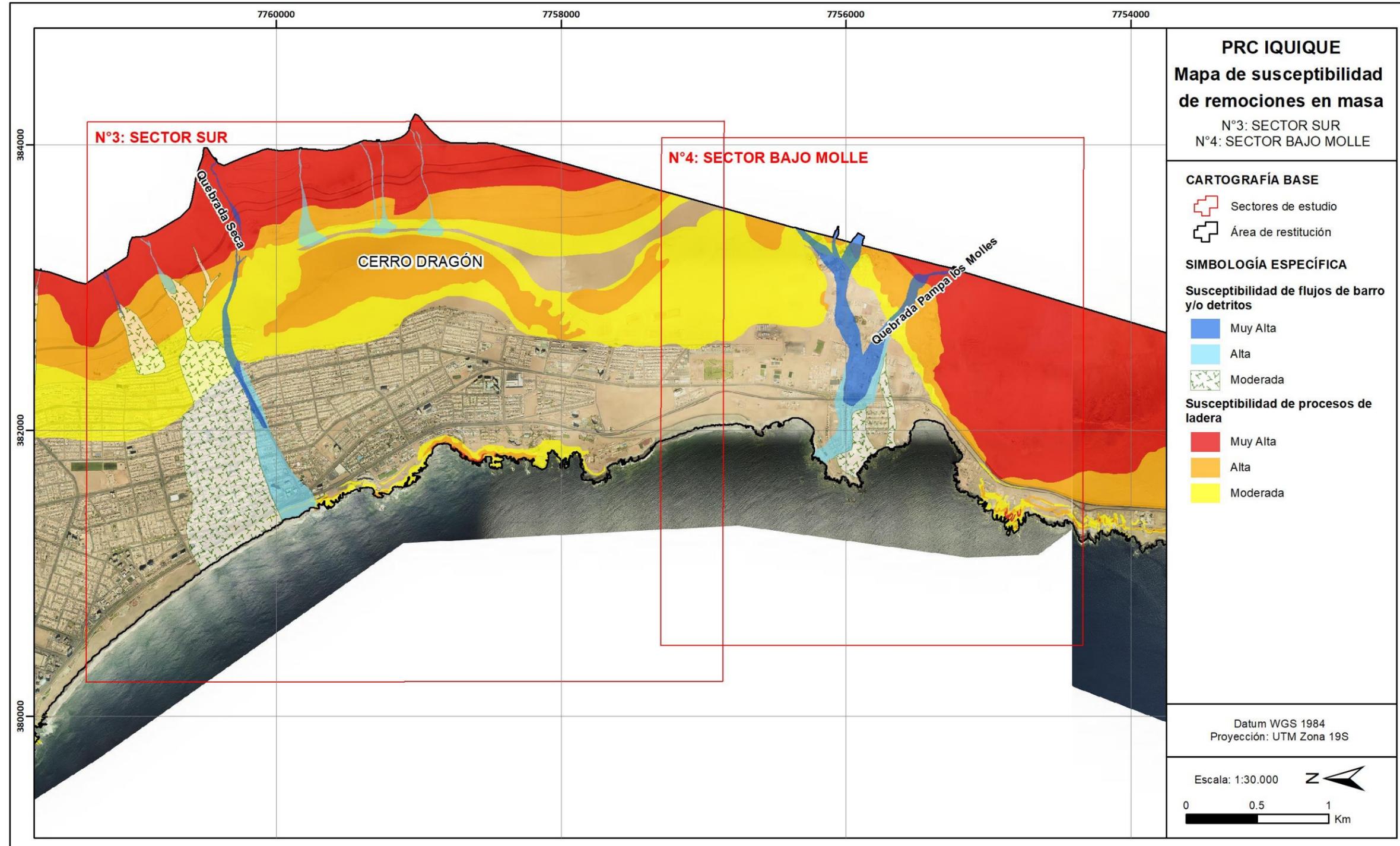
Fuente: Elaboración propia

Figura 6-18: Mapa de susceptibilidad de remociones en masa en el sector N°2



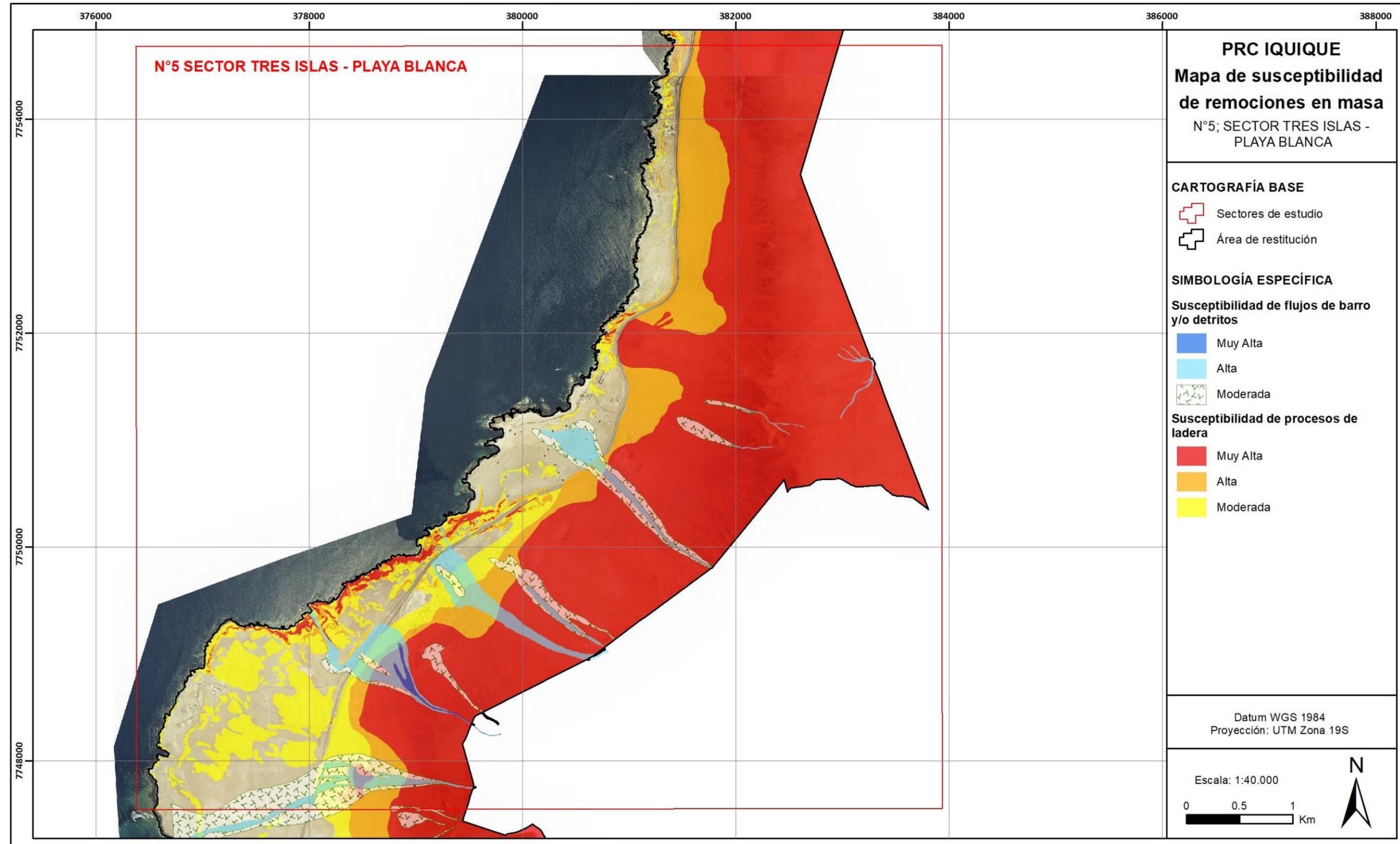
Fuente: Elaboración propia.

Figura 6-19: Mapa de susceptibilidad de remociones en masa en los sectores N°3 y 4.



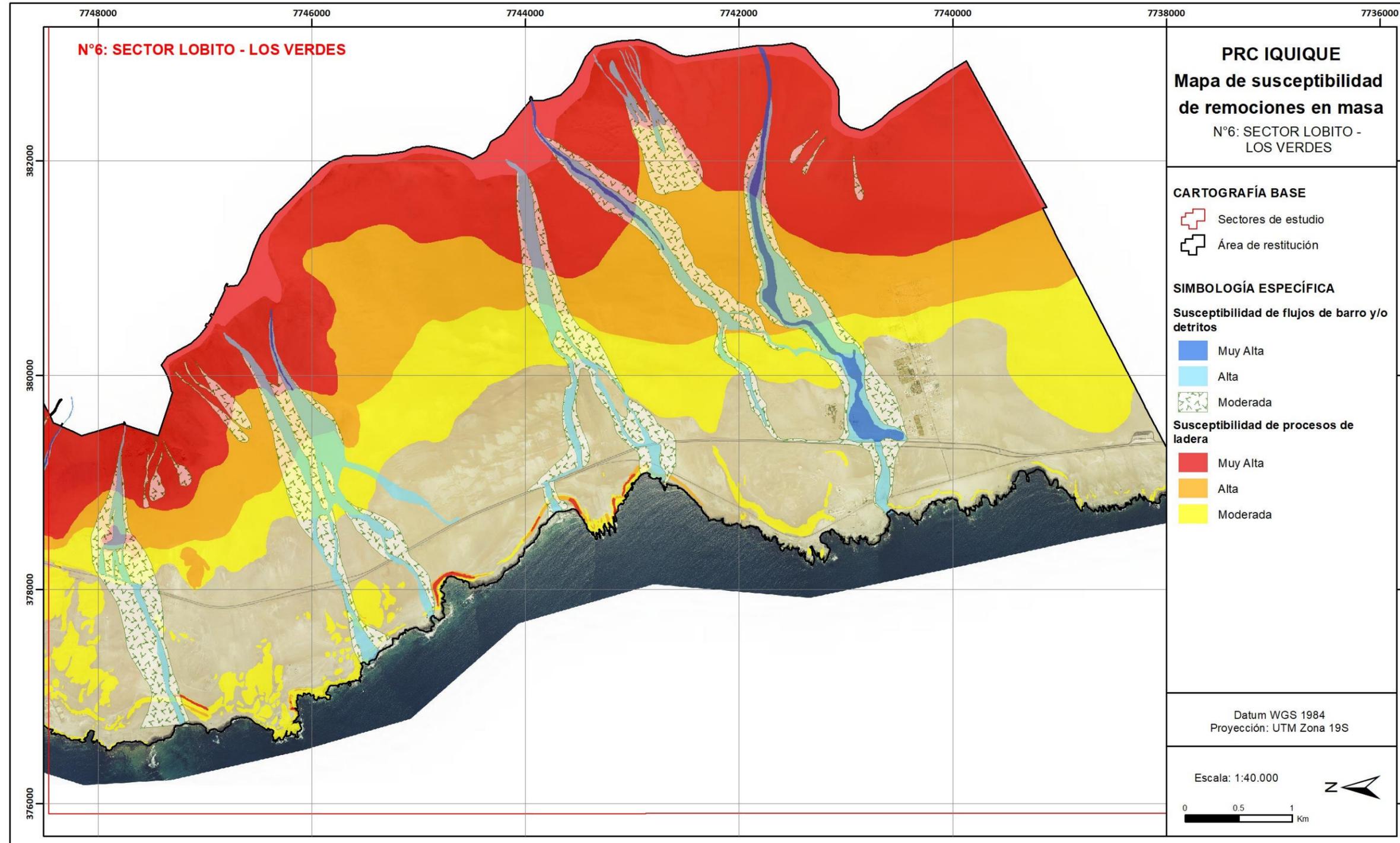
Fuente: Elaboración propia.

Figura 6-20: Mapa de susceptibilidad de remociones en masa en el sector N°5.



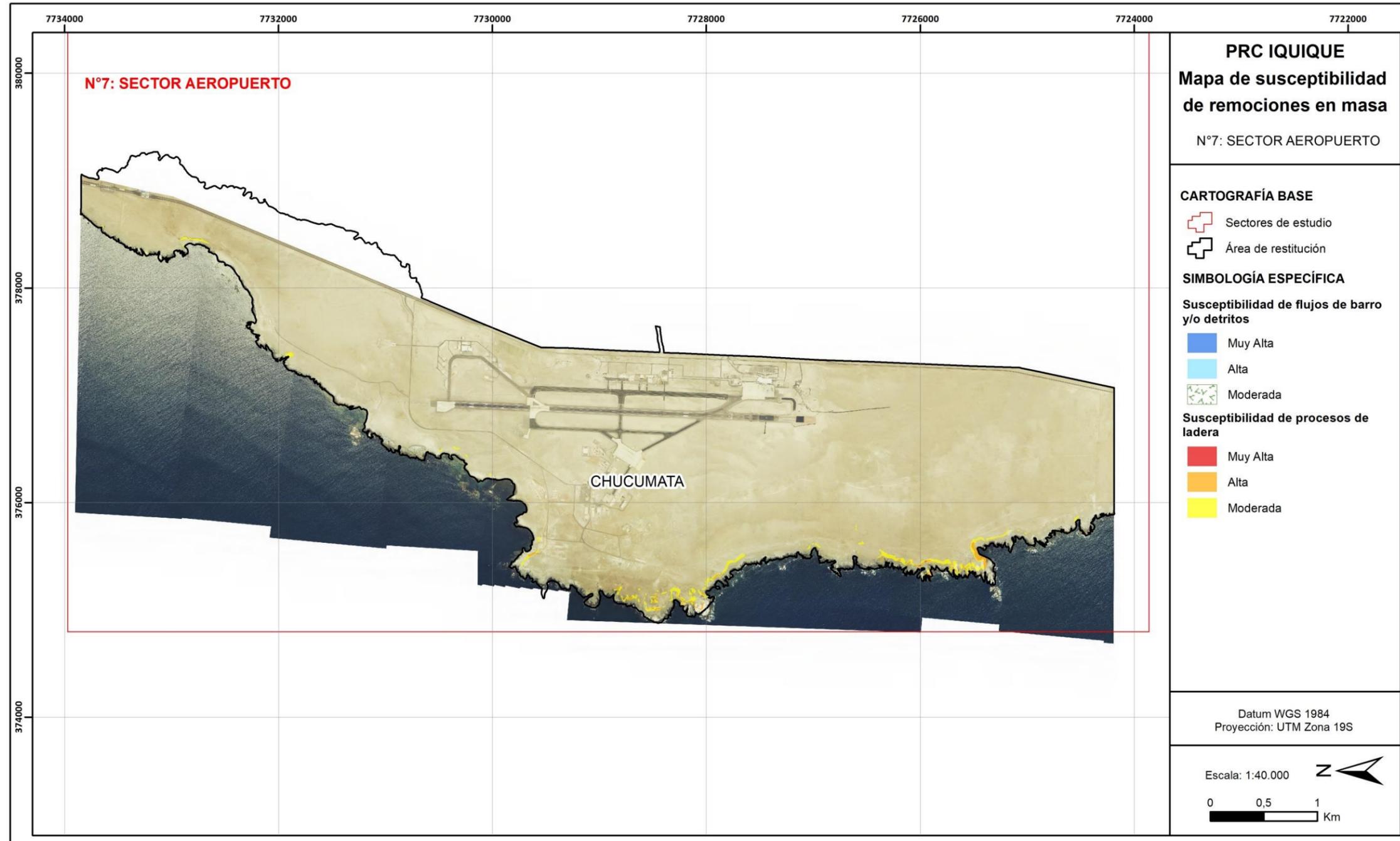
Fuente: Elaboración propia.

Figura 6-21: Mapa de susceptibilidad de remociones en masa en el sector N°6



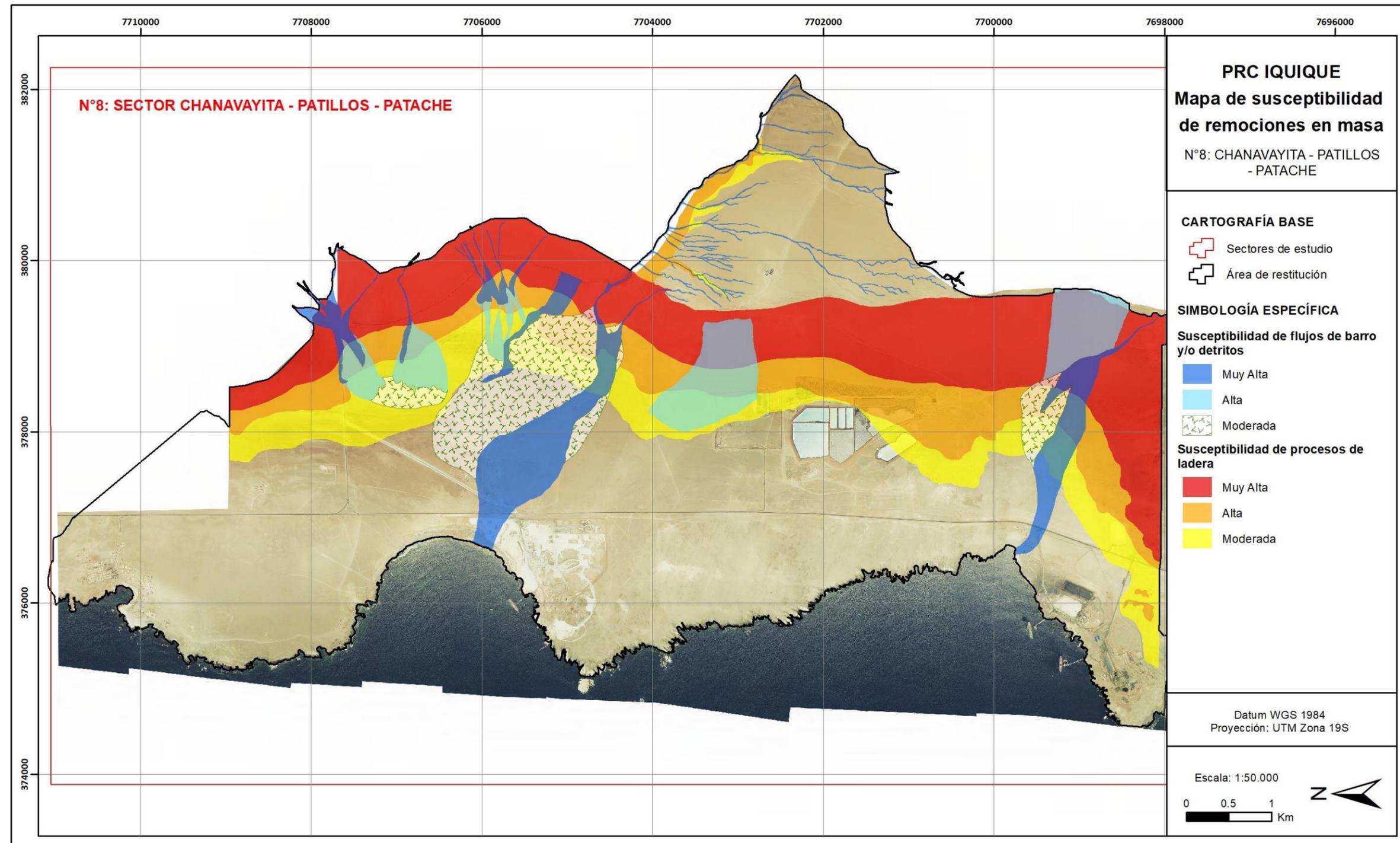
Fuente: Elaboración propia.

Figura 6-22: Mapa de susceptibilidad de remociones en masa en el sector N°7



Fuente: Elaboración propia.

Figura 6-23: Mapa de susceptibilidad de remociones en masa en el sector N°8.



Fuente: Elaboración propia.

7 SISMICIDAD

7.1 ANTECEDENTES Y CATASTRO

La costa oeste de Sudamérica está delineada por el borde occidental de la placa tectónica sudamericana y se caracteriza por su sismicidad debido a la convergencia entre esta placa y la placa tectónica de Nazca. Esta convergencia de placas se caracteriza por un nivel particularmente alto de acoplamiento mecánico en la zona de contacto entre las placas, lo que permite la acumulación de grandes niveles de energía que, al liberarse, generan sismos de gran magnitud. Por lo anterior, la zona de convergencia define una banda sísmica activa angosta, de aproximadamente 150 a 200 kilómetros de ancho, y una profundidad variable que aumenta hacia el este, entre aproximadamente 5 km de profundidad en la fosa Perú-Chile y aproximadamente 150 km de profundidad bajo el cordón montañoso de Los Andes. En la zona de estudio, el contacto entre ambas placas se extiende hasta alrededor de los 40 - 53 km de profundidad (Tichelaar & Ruff., 1993; Suárez & Comte, 1993; Belmonte-Pool, 1997; Khazaradze & Klotz., 2003; Tassara, Götze, Schimdt, & Hackney, 2006).

La costa de Chile históricamente ha sido afectada por grandes terremotos, varios acompañados de maremotos destructivos. En el Apéndice a) "Sismicidad", se explica la sismicidad que caracteriza al territorio chileno; y en el Apéndice 11.5.3 "Catastro de sismos", se compilan los sismos registrados por la red sismológica mundial y se describen en detalle los sismos históricos que han afectado a la comuna de Iquique y sus alrededores.

7.1.1 Sismos reportados en antecedentes históricos (siglo XVII en adelante) que han afectado a la comuna de Iquique

En la Ilustración 7.1-1, se grafican los sismos de subducción más importantes que han afectado al territorio de Chile continental en el período histórico. El área norte de Chile, entre Arica y la península de Mejillones posee antecedentes históricos de grandes sismos de este tipo (por ejemplo, los más recientes sismos de 1877, 2007, 2014). Estos sismos son los que liberan mayor energía sísmica ($M_w > 8$), son del tipo fallas inversas y suelen relacionarse con tsunamis (David, 2007). Los principales eventos que han afectado al área de estudio se presentan en el

Cuadro 7.1-1, donde destaca el terremoto de Iquique de 2014, con una magnitud estimada de $M_w^{21}=8,1$ (Lay, Yue, Brodsky, & An, 2014).

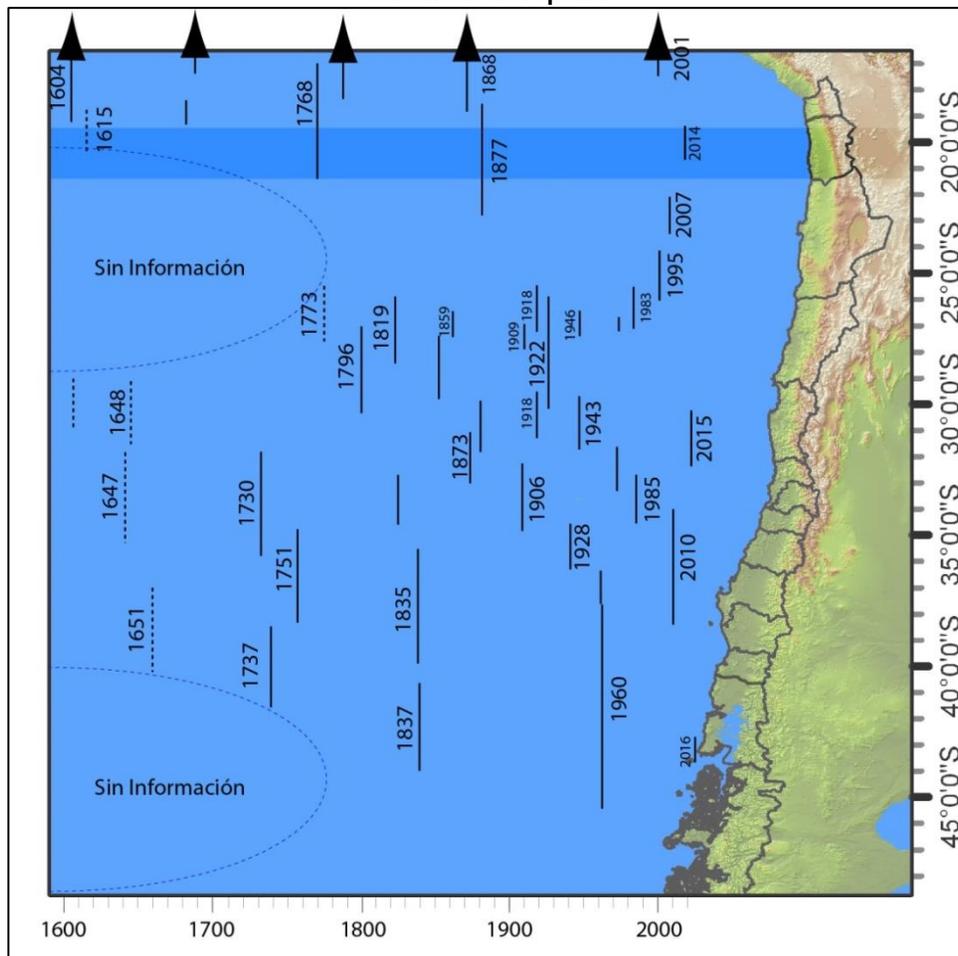
En la zona de estudio se han registrados eventos intraplaca de profundidad intermedia con magnitudes de importancia, como el sismo de Tarapacá de 2005 (Peyrat, y otros, 2006). Dado que estos terremotos ocurren bajo la Depresión Central, y dado el patrón de radiación de energía en general estos sismos no causan daños mayores en la costa respecto a los daños que ocurren en la zona epicentral. No existen registros más detallados de la ocurrencia previa a 1950 de grandes sismos intraplaca de profundidad intermedia, esto es en gran parte debido a las limitaciones del registro instrumental e histórico. En efecto, los terremotos ocurridos en Chile previamente al año 1960 no fueron registrados mediante sismómetros modernos, por lo que no poseen información instrumental que permita determinar sus características. Por lo tanto, las áreas de ruptura de los

²¹ La **escala de magnitud de momento (M_w)** es una escala logarítmica basada en la medición de la energía total que se libera en un sismo. Fue introducida en 1979 como la sucesora de la escala sismológica de Richter o escala de magnitud local (M_L). Una ventaja de la escala de magnitud de momento es que no se satura cerca de valores altos. Es decir, a diferencia de otras escalas, esta no tiene un valor por encima del cual todos los terremotos más grandes reflejen magnitudes muy similares. Otra ventaja que posee esta escala es que coincide y continúa con los parámetros de la escala sismológica de Richt

La **escala magnitud de onda superficial (M_s)** es una de las escalas de magnitud sísmica usadas en sismología para describir el tamaño de un sismo. Está basada en mediciones de las ondas superficiales de Rayleigh, que viajan principalmente a lo largo de las capas superiores de la tierra. Uno de los problemas que genera este método es que se satura alrededor de los 8 grados, por lo que no permite calcular sismos mayores, lo que obliga a utilizar otro tipo de medición.

terremotos previos a dicha fecha han sido estimadas en otros estudios utilizando los datos históricos de intensidad de daño mediante la metodología propuesta por Kausel & Ramírez (1992).

Ilustración 7.1-1: Sismos de subducción históricos con magnitud estimada y calculada mayor a 7,2 y sus áreas de ruptura



Fuente: Elaboración propia. En línea continua las zonas de ruptura bien identificadas; en línea discontinua las zonas de ruptura inferidas a partir de datos históricos.

Cuadro 7.1-1: Sismos de subducción históricos con magnitud estimada y calculada mayor a 7,2.

Latitud (°)	Longitud (°)	Profundidad (km)	Magnitud aproximada	Año	Mes	Día
18,500	70,400	30,0	8,5	1604	11	24
18,500	70,350	-	8,5	1868	08	13
19,600	70,230	10,0	8,5	1877	05	09
19,572	70,908	38,9	8,2	2014	04	01

Fuente: Elaboración propia a partir del Catálogo Centro Sismológico Nacional (2014).

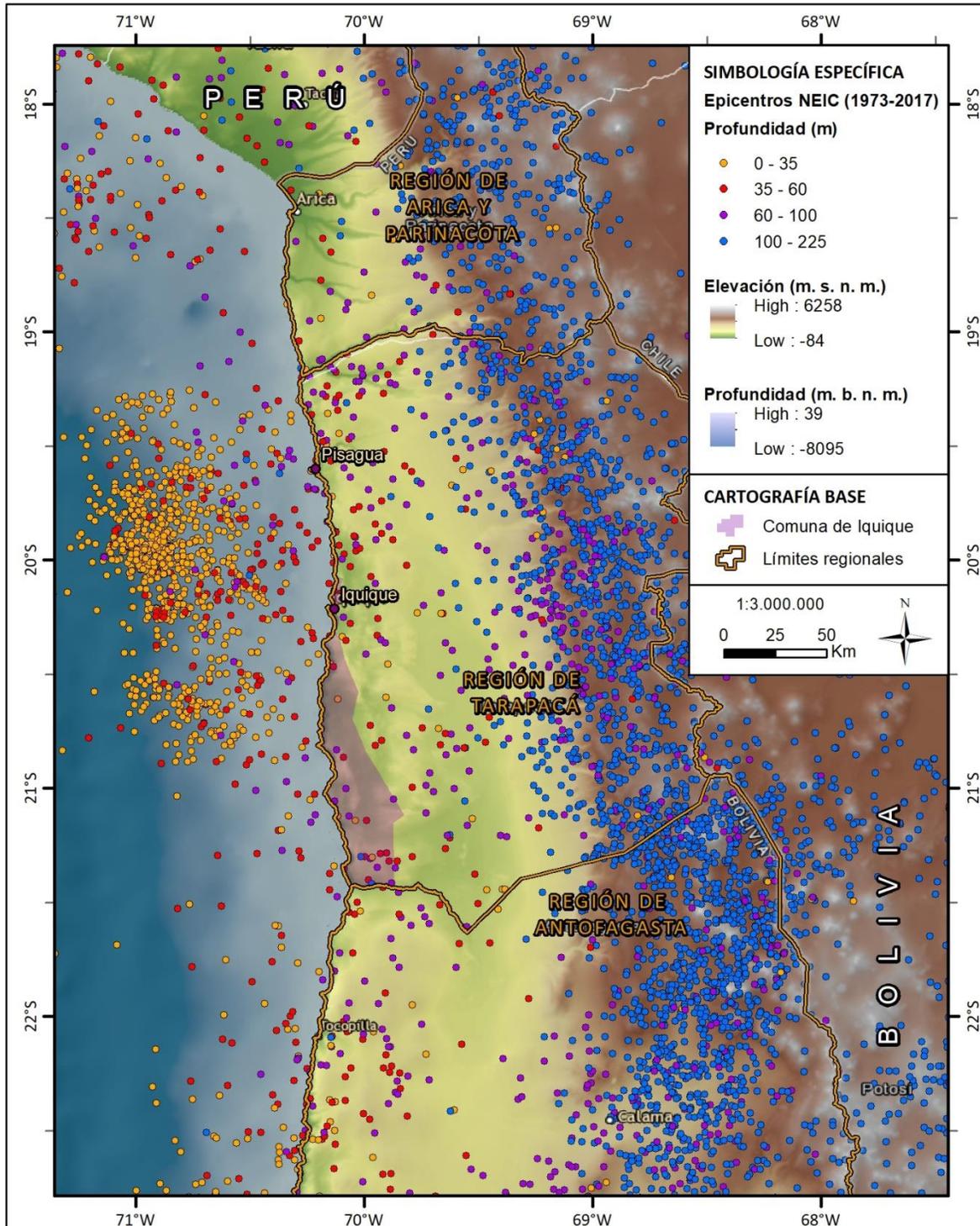
7.1.2 Sismos registrados por la red sismológica mundial

En la Figura 7-1, se presenta la sismicidad a través de los epicentros de los sismos registrados por la red sismológica internacional (catálogo NEIC del USGS), desde enero de 1973 hasta el 1 de diciembre de 2017, con magnitudes superiores a 4.0. En esta figura, se aprecian los diferentes tipos de sismos descritos en el Apéndice a), es decir:

1. Una concentración de la sismicidad frente a las costas de Iquique y Pisagua, asociada a las réplicas del terremoto de Iquique 2014; estos eventos sísmicos junto a los otros localizados próximos al contacto entre la placa de Nazca y la placa Sudamericana (puntos distribuidos en el occidente en la Figura 7-1, son denominados interplaca o tipo *thrust*, y suelen alcanzar grandes magnitudes (Ilustración 11.2-2).
2. Una gran cantidad de eventos que ocurren al interior de la placa de Nazca, lejos del contacto, a profundidades superiores a 50 km (puntos morados y azules); a este conjunto de eventos se les conoce como intraplaca de profundidad intermedia.
3. En menor medida, también es posible observar en la Figura 7-1, sismos corticales en la placa Sudamericana, cerca de la Cordillera de Los Andes. Estos eventos corresponden a sismos producidos por fallas superficiales, cuyos focos se encuentran a una profundidad menor a 30 km, y están asociados a fallas geológicas activas en superficie. que no se aprecia una tendencia clara de sismicidad superficial en las zonas donde hay fallas declaradas activas.

De acuerdo con la Figura 7-1, la comuna de Iquique ha sido afectada, principalmente, por sismos interplaca (puntos amarillos y rojos) desde el año 1973.

Figura 7-1: Sismos registrados por la red sismológica mundial entre enero de 1973 y diciembre de 2017.



Fuente: Elaboración propia a partir del Catálogo NEIC (2017) (sismos sobre magnitud 4.0) del USGS.

7.1.3 Catastro de sismos

En base a los antecedentes descritos, se construyó un catastro de los sismos registrados más significativos que han afectado a la comuna de Iquique desde el año 1604 hasta el 2017. Este catastro se presenta en el Apéndice 11.5.3.

7.1.4 Fallas inactivas, potencialmente activas e inactivas

Las fallas en la corteza continental son producto de los campos de esfuerzos predominantes en ésta, que están principalmente modulados por la subducción activa. Cuando los esfuerzos acumulados superan la resistencia de la roca estos se liberan como deformación frágil por medio de la propagación de una ruptura con desplazamiento en el plano de falla generando así, ondas sísmicas. Cuando una falla está orientada de forma favorable a los esfuerzos predominantes la resistencia que opone es menor que la que presenta la roca sin fracturar, por esta razón se concentra la deformación frágil en las fallas, lo que se traduce en sismos generados en las mismas con una cierta recurrencia en el tiempo. Como resultado se puede considerar a estas estructuras como fuentes sísmicas, la identificación de fuentes sísmicas en cierta área es el primer paso en la evaluación del peligro sísmico.

La actividad de una falla es una categorización relacionada a su potencial de generar un sismo. Las fallas activas son aquellas que presentan evidencias de desplazamiento durante el Holoceno (los últimos 12.000 años); las fallas potencialmente activas son aquellas que tienen evidencia de desplazamiento durante el Pleistoceno (2.5 Ma²² millones de años a 12 ka²³); y las fallas se consideran inactivas si no caen dentro de alguna de estas categorías (movimiento más antiguo que 2.5 Ma, lo que incluye el Plioceno 2.5 Ma a 5 Ma, Mioceno a partir de 5 Ma y períodos más antiguos).

En el área de estudio a la fecha no se conocen registros instrumentales concluyentes de sismos superficiales asociados a fallas corticales como las reconocidas en el marco estructural (sección 3.1.4). A pesar de lo anterior se reconoce que la comuna de Iquique está próxima al sistema de fallas de Atacama y otra serie de fallas corticales inversas de orientación E-W en las que se ha reconocido morfologías asociadas a actividad en el Pleistoceno (Carrizo, González, & Dunai, 2008), y posiblemente del Holoceno (Allmendinger, González, Yu, & Hoke, 2005) y en los que se reconocen evidencias que sugieren movimientos durante el Holoceno, sin embargo debido a la hiperaridez de la zona es posible que estas evidencias sean más antiguas y preservadas por la falta de erosión.

Por otra parte, evidencias sismológicas sugieren algún grado de actividad para las fallas inversas de orientación E-W reconocidas en el área debido al registro de sismos cercanos al contacto interplaca que tendrían mecanismos de ruptura compatibles con los sistemas de falla corticales observados (Bloch, Kummerow, Salazar, Wigger, & Shapiro, 2015; González, y otros, 2015). Razón por la cual no se puede desestimar la actividad en estas fallas.

De lo anteriormente expuesto no se reconoce actividad comprobada de las fallas reconocidas en el área, debido a que no existen evidencias concluyentes de actividad de estas durante el Holoceno, pero existen indicios que sugerirían algún grado de actividad. Probablemente con tasas de deformación muy pequeñas. En ese sentido es recomendable considerar las fallas que presentan evidencias de movimiento en el Cuaternario como fallas potencialmente activas. Sin embargo, es necesario realizar estudios de detalle para una adecuada

²² Millones de años

²³ Miles de años

caracterización de estas y determinar su grado de actividad. A la vez darle un tratamiento de fallas activas de la misma forma que señala SERNAGEOMIN (2013).

7.2 DIAGNÓSTICO

El diagnóstico de peligro sísmico para la comuna de Iquique se puede analizar según la fuente sísmica analizada, considerando la tipología de terremotos chilena. En esta tipología se reconocen terremotos interplaca, terremotos de intraplaca de profundidad intermedia y terremotos corticales superficiales.

Los terremotos interplaca son los más frecuentes y potentes que se registran en Chile, asociados a la convergencia de las placas Sudamericana y de Nazca. En el área de Iquique se han registrado grandes terremotos de este tipo como los ocurridos los años 1868 y 1877, que causaron cuantiosos daños, además los de mayor magnitud suelen ser acompañados de maremotos. Normalmente se asume para los segmentos sísmicos en Chile una recurrencia de aproximadamente 100 años, hasta el año 2014 se consideraba que el área se encontraba en un déficit de liberación de energía sísmica, o laguna sísmica, respecto a los sismos ocurridos en el siglo XIX. El terremoto del 1 de abril de 2014 (M_w 8.1) significó la liberación de aproximadamente el 20% de dicho déficit (Lay, Yue, Brodsky, & An, 2014) en el sector central de la laguna. De dicha forma se considera que el más probable escenario es que en el futuro el déficit sea cubierto con sismos al norte y sur del área de ruptura del terremoto de 2014 con magnitudes del orden de M_w 8.5 que podrían presentar altas intensidades y generación de maremoto.

De los sismos de intraplaca de profundidad intermedia no existe información suficiente para establecer recurrencias ni magnitudes esperables, sin embargo, sus mayores intensidades se ubicarían en el sector de la depresión intermedia debido al patrón de dispersión de las ondas que se concentran en el área epicentral y para las áreas costeras las intensidades esperadas se consideran menores a las intensidades asociadas a un sismo interplaca. Por lo anterior se considera que esta fuente sísmica se encuentra supeditada a la de los sismos interplaca.

Los sismos corticales superficiales se caracterizan por hipocentros a profundidades menores a 20 km y magnitudes moderadas (respecto a las magnitudes que puede alcanzar un sismo interplaca), y se asocian a fallas corticales activas. Localmente, en el área epicentral, estos sismos pueden registrar grandes aceleraciones debido a efectos no lineales en la propagación de las ondas, pero que se atenúan rápidamente con la distancia. Si bien en la comuna hay fallas que pueden considerarse potencialmente activas, no hay registros concluyentes de su actividad durante el Holoceno. Al no haber estudios paleosismológicos específicos en las fallas que se encuentran en la comuna de Iquique tampoco se conoce la recurrencia, edad o magnitud de los movimientos asociados a estas fallas en el pasado geológico, por lo anterior no es posible asociar una amenaza específica a los sismos corticales superficiales. Es más, dado que muchas de las trazas de las fallas con evidencias de deformación cuaternaria en el área del PRC de Iquique son trazas inferidas dado que la escala de la información topográfica (incluso la topografía generada para este trabajo) no permite reconocer la ubicación precisa de estos elementos en superficie a la escala de detalle de este PRC (1:1.000 y 1:5.000).

Por lo anterior se desprende que la comuna de Iquique, de la misma forma que gran parte de Chile, se encuentra expuesta a sismos de las tres fuentes sísmicas. Se considera que a partir de los antecedentes la fuente sísmica predominante en términos de amenaza corresponde a los terremotos interplaca como el ocurrido el año 2014 o los ocurridos en 1868 y en 1877.

7.3 RESULTADOS

Los peligros asociados a sismicidad reconocidos en el área se asocian a efectos primarios producto de la actividad tectónica, estos son movimientos del terreno resultado del tránsito de las ondas sísmicas y la ruptura en superficie asociada a actividad de fallas superficiales.

Los efectos del paso de las ondas sísmicas se asocian a la respuesta de los suelos de fundación y con la forma en que estos están considerados en la construcción de edificaciones e infraestructura según las normas sísmicas chilenas. Esto es debido a que las propiedades de los suelos que influyen en su respuesta sísmica son muchas y deben conocerse a un detalle que va más allá de los alcances de los Instrumentos de Planificación Territorial, estas condiciones se encuentran incorporadas en los análisis de las normas chilenas de construcción para el diseño de edificios (NCh433²⁴) y de instalaciones industriales (NCh2369²⁵) las se evalúan en detalle al momento del desarrollo de algún proyecto de construcción, y a partir de ellas se incorporan en el diseño de la edificación o infraestructura. Por lo anterior el efecto de sitio no es parte de la zonificación de este Plan Regulador Comunal y no se considera adecuado establecer restricciones según el artículo 2.1.17 de la OGUC.

En relación con la posible ruptura en superficie asociada a sismicidad de las fallas corticales superficiales no existen antecedentes claros que permitan evaluar la actividad de las fallas con evidencias de movimientos en el Cuaternario. En general se recomienda establecer zonas de restricción en función a cierta distancia de las fallas con características de activas para evitar el uso intenso. En el caso de la comuna de Iquique las trazas y el nivel de actividad de las zonas de fallas identificadas no poseen la certeza adecuada para poder establecer estas restricciones por el momento. La topografía nueva generada para este PRC no permitió identificar las trazas de las fallas a la escala del estudio, y además no refleja actividad de estas sobre la planicie costera, con la excepción de la falla Zofri que es la única que tiene evidencias morfológicas claras en la ciudad de Iquique. Sin embargo, para esta última se encuentra en un lugar tan intervenido que no es posible determinar con precisión la traza de la falla. En la medida que las trazas de las fallas superficiales son identificadas es posible determinar áreas de restricción en función de una distancia respecto a la traza de la falla es útil para evitar efectos directos sobre la infraestructura, edificaciones y las personas en caso de ocurrencia de un sismo originado en alguna de estas fallas. De esa forma, el área de restricción consideraría los lugares donde podría producirse la ruptura en superficie considerando la precisión cartográfica de la identificación de la falla y posibles complejidades secundarias de la estructura de esta. El ancho de estas zonas de restricción varía en diversos casos entre un ancho total aproximado de 300 m centrado en la traza de la falla para fallas complejas y cartografiadas a escalas pequeñas o en condiciones que implican una definición poco precisa de la traza (McCalpin, 2009), hasta distancias del orden de 50 m para fallas bien identificadas y cartografiadas a escalas mayores a 1:25.000 (Kerr et al., 2004). Por lo anterior se considera necesario primero evaluar de forma adecuada la actividad de las fallas mediante estudios paleosismológicos detallados y mediante esto cuantificar el nivel de actividad de las fallas y delimitar mediante estos la traza de las fallas a la precisión requerida a la escala de este PRC, particularmente considerando las consecuencias sobre la ciudad que tendría delimitar zonas de restricción según el artículo 2.1.17 de la OGUC en sectores equívocos²⁶.

Por todo lo anterior no se considera posible establecer restricciones según el artículo 2.1.17 de la OGUC para efecto de sitio y fallas corticales.

²⁴ INN, Diseño Sísmico de Edificios, Norma Chilena Oficial NCh 433.Of1996 (Modificada en 2009), Instituto Nacional de Normalización, Santiago, Chile (2ª edición 2009)

²⁵ INN, Diseño Sísmico de Estructuras e Instalaciones Industriales, Norma Chilena Oficial NCh 2369.Of2003, Instituto Nacional de Normalización, Santiago, Chile (2003).

²⁶ Durante las etapas de observaciones de este estudio, fue publicado el trabajo del Sernageomin "Peligros geológicos del área de Iquique-Alto Hospicio, Región de Tarapacá, 1:20.000", de Opazo et al. (2018). Dicho estudio, por solicitud del Sernageomin establecida en el oficio ORD N° 1154/2022, con fecha 14/09/2022, fue debidamente analizado. En particular, en lo que respecta a fallas corticales, el trabajo de Opazo et al. (2018) no entrega antecedentes suficientes como para establecer restricciones según el artículo 2.1.17 de la OGUC.

8 VOLCANISMO

8.1 ANTECEDENTES Y CATASTRO

Chile se dispone en la franja de Fuego del Pacífico, situada en las costas del Océano Pacífico, que se caracteriza por concentrar una intensa actividad sísmica y volcánica en las zonas que abarca. En particular, la comuna de Iquique se ubica al oeste del segmento denominado Zona Volcánica Central, desarrollado desde los 14° hasta los 28° latitud Sur, correspondiente al límite sur del Desierto de Atacama.

En la Figura 8-1, se muestran los centros volcánicos activos y los depósitos volcánicos recientes (miocenos a cuaternarios) situados en el extremo sur de la Región de Tarapacá y extremo norte de la Región de Antofagasta. Los registros de la actividad volcánica prehistórica muestran abundante y vigorosa actividad volcánica del Mioceno, principalmente representada en los extensos depósitos de productos volcánicos ampliamente distribuidos a lo largo de la Depresión Central, de la Precordillera y de la Cordillera Occidental (ver sección 3.1.2).

Por otra parte, se han identificado 3 centros eruptivos geológicamente activos cercanos al área de estudio; de norte a sur, estos son los siguientes: Irruputuncu, Olca-Paruma y San Pedro (Figura 8-1). Estos corresponden a estratovolcanes y complejos volcánicos (Cuadro 8.1-1), con evidencias de actividad volcánica histórica (González-Ferrán, 1995). El centro volcánico más próximo al área de estudio es el volcán Irruputuncu, situado a 170 km aproximadamente de la ciudad de Iquique. Corresponde al volcán geológicamente más activo de la Región de Tarapacá y es considerado por el Servicio Nacional de Geología y Minería de Chile, como uno de los volcanes más peligrosos del país (Lara, Orozco, Amigo, & Silva, 2011), debido a su constante actividad y su reciente registro de erupciones (hay reportes desde 1963 de actividad fumarólica constante hasta la actualidad²⁷ y una última erupción mayor en 1995; ver Cuadro 8.1-1). De acuerdo González Ferrán (1995), nuevas erupciones del Irruputuncu podrían producir flujos de piroclastos, avalanchas de detritos y lluvia de tefra, colocando en riesgo a los asentamientos aledaños al volcán.

De acuerdo con los registros históricos de la actividad eruptiva de los volcanes catastrados, el material volcánico emitido por ellos no ha alcanzado a la comuna de Iquique. En el Cuadro 8.1-1, se detalla la ubicación geográfica de ellos, la distancia a la cual se sitúan de la ciudad de Iquique (entre 170 y 260 km), la altitud de máximas de sus cumbres, las últimas erupciones mayores registradas y la posición de peligrosidad que ocupan según el ranking de los volcanes activos más peligrosos de Chile, nómina elaborada por el SERNAGEOMIN (2015)²⁸.

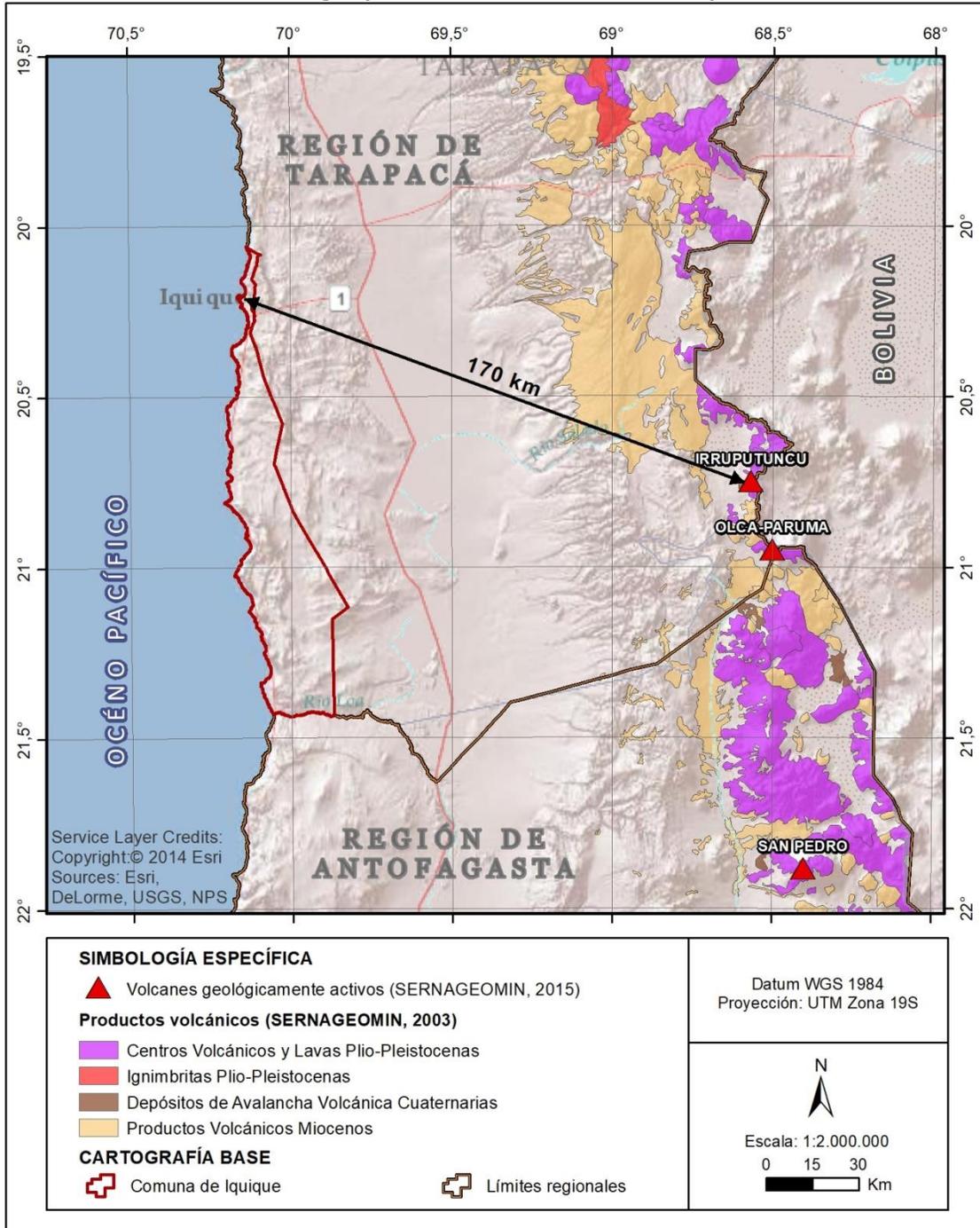
El área de estudio se encuentra ubicada a aproximadamente 170 km de distancia del arco volcánico actual y, de acuerdo con los registros prehistóricos e históricos, la comuna de Iquique no ha sido afectada directamente por material volcánico desde, al menos, el Mioceno (Figura 8-1), por lo que se considera que no está influenciada directamente por peligros asociados al volcanismo.

Desde el punto de vista morfológico, la comuna de Iquique se encuentra desconectada de los centros volcánicos mencionados, pues existen dos grandes unidades morfoestructurales que actúan como barrera que limitan el alcance de varios de los procesos asociados al volcanismo.

²⁷ <http://www.semageomin.cl/archivosVolcanes/20140111123048776fichaEjecutivalrruputuncu.pdf>

²⁸ Esta nómina se establece de acuerdo con tres criterios: (1) que el volcán haya tenido algún nivel de actividad comprobable en los últimos 10.000 años o que los instrumentos muestren que tiene actividad, (2) que se encuentre cerca de centros poblados y (3) que represente un riesgo para las personas o la infraestructura pública y privada.

Figura 8-1: Ubicación de los centros y depósitos volcánicos recientes más próximos a la comuna de Iquique



Fuente: Elaboración propia a partir de SERNAGEOMIN (1993) y SERNAGEOMIN (2015).

Cuadro 8.1-1 Principales centros volcánicos geológicamente activos en sectores cercanos a la comuna de Iquique

Nombre volcán	Coordenadas	Región	Distancia a la ciudad de Iquique	Altitud máxima (m s.n.m..)	Tipo de centro eruptivo	Última Erupción Mayor	Ranking Peligrosidad ²⁹
San Pedro	21,89 S / 68,39 O	II Región de Antofagasta	260 km	6.145	Estratovolcán	25/05/1901	16
Irruputuncu	20,73 S / 68,56 O	I Región de Tarapacá	170 km	5.165	Estratovolcán	1995	20
Olca-Paruma	20,94 S / 68,50 W	II Región de Antofagasta	190 km	5.407	Complejo volcánico	1865 - 1867	35

Fuente: Elaboración propia a partir de González Ferrán (1995) y SERNAGEOMIN (2015)

8.2 DIAGNÓSTICO

Como se señaló anteriormente, los volcanes más cercanos a la comuna de Iquique se encuentran a más de 100 km de ella, y algunas de las unidades geomorfológicas que separan a la comuna de los centros volcánicos actúan como barrera para el avance de varios de los peligros asociados al volcanismo.

En el Cuadro 11.2-1, se presentan los peligros asociados al volcanismo separados en cuatro grupos. A continuación, se analiza cuáles de estos grupos de peligros podrían afectar a la comuna de Iquique:

8.2.1 Lluvia de tefra y proyectiles balísticos.

A continuación, se analizan los peligros:

1. Con respecto a la **caída de piroclastos y dispersión de cenizas**, los mapas de peligro volcánico de los volcanes mencionados en el Cuadro 8.1-1 asignan, para toda la comuna de Iquique, una probabilidad menor que 12,5% de acumular un espesor de 1 cm de tefra en caso de ocurrir una erupción considerable para cada uno de los volcanes, incluso en la época más desfavorable del año, que es el verano (Amigo & Bertin, 2013; Orozco & Bertin, 2013; Bertin & Amigo, 2015).
2. En cuanto a la **inyección de aerosoles en la estratósfera**, el efecto sería un impacto en el clima, que no puede analizarse en el contexto del Plan Regulador Comunal.
3. El resto de los peligros de este grupo no presenta potencial para afectar a la comuna, debido a la distancia y a la forma del terreno.

8.2.2 Lavas y edificio volcánico

Los peligros de este grupo no pueden afectar a la comuna de Iquique porque las redes de drenaje de la comuna de Iquique no alcanzan a los edificios volcánicos y la distancia de las áreas estudiadas respecto a los centros volcánicos.

²⁹ <http://www.sernageomin.cl/archivos/Ranking-de-Volcanes.pdf>, consultado el 14/06/2017.

8.2.3 Remociones en masa

Los peligros de este grupo no pueden afectar a la comuna de Iquique porque las redes de drenaje de la comuna de Iquique no alcanzan a los edificios volcánicos ubicados en la región.

8.2.4 Otros

Los peligros de este grupo afectarían a la comuna de Iquique por la distancia que los separa y porque las redes de drenaje de la comuna de Iquique no alcanzan a los edificios volcánicos.

Por lo tanto, la comuna de Iquique sólo podría ser afectada de manera indirecta por el peligro volcánico debido a la caída de tefra, producto de la erupción de alguno de los volcanes activos cercanos. En erupciones violentas, la tefra puede ser llevada a altas capas de la atmósfera siendo transportadas por el viento y depositándose a centenares de kilómetros. Sin embargo, suponiendo que las erupciones volcánicas involucren caída de cenizas se espera que migren con mayor probabilidad hacia el SE y E debido a la dirección predominante de los vientos. No es posible definir áreas más expuestas a la caída de ceniza dentro de las áreas urbanas y, por lo tanto, no es posible zonificar el peligro.

9 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Una vez identificados los peligros, definidos los grados de susceptibilidad y el alcance territorial de ellos, es necesario incorporar estos resultados en la zonificación urbana. Esto debe realizarse a través de la aplicación del artículo 2.1.17 de la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones (OGUC) y, complementariamente, tomando otras medidas de planificación acordes a las atribuciones que otorga la LGUC y la OGUC al Plan Regulador Comunal, como, por ejemplo, la diferenciación de usos de suelo y regulación de la forma e intensidad de su ocupación.

9.1 ZONIFICACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD

La definición de las diferentes categorías de susceptibilidad asociadas a los peligros estudiados, y su concreción en mapas a través de una zonificación, son el resultado de la aplicación de metodologías específicas y criterios acordes a las características propias de cada peligro y a las condiciones que localmente controlan su ocurrencia y alcance. En este sentido, en el Cuadro 9.1-1 se resumen los factores que condicionan y desencadenan cada peligro geológico, los elementos metodológicos con los que se asignó la distribución espacial de la susceptibilidad y el capítulo en que se analiza cada peligro.

Es muy relevante comprender que la categorización de susceptibilidad se relaciona con la posibilidad de ocurrencia de un fenómeno dado en un área determinada, pero corresponde a una categorización cualitativa, de carácter relativo, y no cuantitativa. Pese a que el concepto de susceptibilidad no contempla la cuantificación de períodos de retorno, ni probabilidades de ocurrencia, sí estipula niveles que indican de manera relativa la frecuencia con que ocurre un cierto fenómeno. En este sentido, las zonas de 'muy alta' susceptibilidad son aquellas que muy probablemente serán afectadas en caso de ocurrir un evento del peligro analizado, las zonas de 'alta' susceptibilidad serán aquellas afectadas por eventos extremos (en muchos casos son los más grandes de los que se tengan registros históricos) y las de 'moderada' susceptibilidad se asocian a eventos excepcionales, de los que muchas veces no existen registros históricos, pero si otro tipo de evidencias, como evidencias geológicas o morfológicas. En términos prácticos, se recomienda que, mientras mayor sea la susceptibilidad de un área específica, mayores sean las restricciones y/o condicionantes para su utilización.

Por las condiciones locales o las características de los peligros analizados, no se elaboró una zonificación de inundaciones terrestres, sismicidad y volcanismo, según lo que se describe a continuación.

En las inundaciones terrestres, se decidió no zonificar debido a que uno de los peligros (inundación por desborde de cauces) se encuentra cubierto con creces por los flujos de barro y/o detritos, mientras que el otro (anegamiento) se asocia a fenómenos puntuales y que actualmente se encuentra cubierto por infraestructura, por lo que no es posible asignar una susceptibilidad.

En el caso de la sismicidad, las propiedades del suelo que influyen en la respuesta sísmica deben conocerse con un nivel de detalle que va más allá de los alcances de un Instrumento de Planificación Territorial, por lo que no se considera adecuado establecer restricciones según el artículo 2.1.17 de la OGUC. Por otra parte, no existen antecedentes claros para evaluar la actividad de las fallas corticales superficiales con evidencia de movimiento en el Cuaternario ni condiciones para conocer su traza con un nivel de certeza adecuado.

Finalmente, en cuanto al volcanismo, la comuna de Iquique sólo podría ser afectada de manera indirecta por algunos peligros específicos, y no se puede determinar áreas que se encuentren más expuestas, de manera que se ha considerado que el área no se encuentra expuesta a este peligro.

Cuadro 9.1-1: Resumen de factores que condicionan y desencadenan cada peligro geológico y criterios de zonificación de la susceptibilidad

Peligro	Factores condicionantes	Factores desencadenantes	Elementos de zonificación	Capítulo en este informe
Inundaciones terrestres	1. Morfología del terreno 2. Estructuras geológicas	1. Lluvias intensas 2. Variación del nivel del mar	1. No se zonifica el peligro	4
Inundaciones litorales	1. Relieve	1. Terremoto	1. Elevación sobre el nivel del mar	5
Flujos de barro y/o detritos	1. Características de la cuenca aportante (tamaño, forma). 2. Litología de zonas aportantes. 3. Morfología de los cauces y su entorno. 4. Pendiente de los cauces.	1. Lluvias intensas	1. Catastro de flujo 2. Morfología de la cuenca aportante. 3. Tipo de depósitos. 4. Abanicos aluviales. 5. Pendiente del terreno.	6
Procesos de ladera	1. Existencia, orientación y frecuencia de discontinuidades. 2. Composición granulométrica de los suelos 3. Pendientes 4. Actividad antrópica	1. Sismos 2. Lluvias intensas	1. Evidencia de ocurrencia de procesos de ladera 2. Pendiente de los taludes 3. Condiciones geológicas de las laderas 4. Distancia a las zonas de generación	6
Sismicidad	1. Convergencia de placas Sudamericana y Nazca 2. Fallas activas 3. Respuesta sísmica del suelo	1. Sismos 2. Fallas activas	1. No se zonifica el peligro	7
Volcanismo	1. Presencia de arco volcánico activo en Cordillera Principal	1. Erupciones 2. Sismos	1. No se zonifica el peligro	8

Fuente: Elaboración propia

9.2 DEFINICIÓN DE ÁREAS DE RIESGO Y OTROS CRITERIOS DE PLANIFICACIÓN

En el caso de los peligros en que se construyeron mapas de zonificación, las zonas de susceptibilidad 'muy alta y 'alta' corresponden a aquellas que con un alto grado de certeza serían afectadas, en caso de ocurrir un evento del peligro analizado y que, en caso de que el evento fuera mayor que lo que se espera habitualmente, las zonas más afectadas se encontrarían en las zonas de susceptibilidad 'muy alta' y 'alta'. En consecuencia, y con el fin de homologar las categorías de susceptibilidad al lenguaje de la OGUC, se propone aplicar el concepto de área de riesgo establecido en el artículo 2.1.17 a estas zonas (Cuadro 9.2-1). Para la zona de 'moderada' y 'baja' susceptibilidad, no se recomienda aplicar el concepto de área de riesgo establecido en el artículo 2.1.17, porque la probabilidad de que éstas sean afectadas es baja y, en caso de ocurrir un evento de una magnitud tal que fueran afectadas, los efectos debieran ser considerablemente menores. Pese a esto último, no se debe considerar que las áreas de susceptibilidad 'moderada' o 'baja' no se encuentran expuestas al peligro analizado.

Cuadro 9.2-1: Criterios de zonificación para la susceptibilidad de cada peligro estudiado.

"Áreas de riesgo" según el artículo 2.1.17 de la OGUC	TIPOS DE PELIGRO (según este informe)	SUSCEPTIBILIDAD	DESCRIPCIÓN	CRITERIO DE ZONIFICACIÓN ÁREA URBANA O.G.U. y C.	
				ÁREA SIN OCUPACIÓN	ÁREA CONSOLIDADA
1. Zonas inundables o potencialmente inundables, debido entre otras causas a maremotos o tsunamis, a la proximidad de lagos, ríos, esteros, quebradas, cursos de agua no canalizados, napas freáticas o pantanos	Inundaciones litorales	MUY ALTA Cota 10 m s.n.m..	Sectores costeros ubicados por debajo de la cota 10 m s. n. m.	Riesgo (2.1.17) Zona de Protección Costera	Riesgo (2.1.17) Zona de Protección Costera Uso Espacio Público o Área Verde y Mitigación planes de emergencia comunal de evacuación temprana
		ALTA Cota 20 m s.n.m.	Sectores costeros ubicados entre las cotas 10 y 20 m s. n. m.	Riesgo (2.1.17) Zona de Protección Costera	Riesgo (2.1.17) Mitigación con Normas Urbanísticas Excluir equipamiento esencial
		MODERADA Cota 25 m s.n.m.	Sectores costeros ubicados entre las cotas 20 y 25 m s. n. m.	Mitigación con Normas Urbanísticas Excluir equipamiento esencial	Mitigación con Normas Urbanísticas Excluir equipamiento esencial
		BAJA Cota 30 m s.n.m.	Sectores costeros ubicados entre las cotas 25 y 30 m s. n. m.	Mitigación con Normas Urbanísticas	Mitigación con Normas Urbanísticas
2. Zonas propensas a avalanchas, rodados, aluviones o erosiones acentuadas	Remociones en masa (flujos de barro y/o detritos)	MUY ALTA	Cauces que presentan registros de haber sido afectadas por flujos, asociados a cuencas aportantes mayores que 1 km ² o con cuencas que presentan forma cóncava en el Acantilado Costero, en zonas con pendiente mayor que 4°. En las cuencas modeladas corresponden a las áreas con altura de inundación mayor a 50 cm y su continuación geomorfológica.	Riesgo (2.1.17) Zona Excluida de la Edificación Uso Espacio Público y Área Verde	Riesgo (2.1.17) Zona Excluida de la Edificación Uso Espacio Público y Área Verde Mitigación con Normas Urbanísticas Excluir equipamiento esencial
		ALTA	Cauces que no presentan registros de haber sido afectadas por flujos, están asociados a cuencas aportantes menores que 1 km ² y con cuencas que no presentan forma cóncava en el Acantilado Costero, en zonas con pendiente mayor que 4°, excepto en aquellos casos en que el cauce atraviesa depósitos eólicos (PIHe). Cauces que presentan registros de haber sido afectadas por flujos, asociados a cuencas aportantes mayores que 1 km ² o con cuencas que presentan forma cóncava en el Acantilado Costero, en zonas con pendiente entre 2 y 4°. Sectores del Acantilado Costero con alta concentración de pequeños cauces paralelos. En las cuencas modeladas corresponden a las áreas con altura de inundación entre 30 y 50 cm y su continuación geomorfológica.	Riesgo (2.1.17) Uso Área Verde	Riesgo (2.1.17) Uso Área Verde Mitigación con Normas Urbanísticas Excluir equipamiento esencial
		MODERADA	Cauces que presentan registros de haber sido afectadas por flujos, asociados a cuencas aportantes mayores que 1 km ² o con cuencas que presentan forma cóncava en el Acantilado Costero, en zonas con pendiente menor que 2°. Zonas en que los cauces atraviesan depósitos eólicos (PIHe). Zonas de los abanicos aluviales ubicadas fuera de las zonas más favorables para que exista escurrimiento. En las cuencas modeladas corresponden a las áreas con altura de inundación menor a 30 cm y su continuación geomorfológica.	Riesgo (2.1.17) Mitigación con Normas Urbanísticas Excluir equipamiento esencial	Riesgo (2.1.17) Mitigación con Normas Urbanísticas Excluir equipamiento esencial
	Remociones en masa (procesos de ladera)	MUY ALTA	Áreas ubicadas topográficamente bajo zonas de generación de susceptibilidad muy alta; es decir bajo sectores de ladera natural o taludes de pendiente sobre 35° en la mayoría de las unidades geológicas del área de estudio, y bajo pendientes mayores a 25° en los estratos pertenecientes a las formaciones Punta Barranco, Oficina Viz, y El Godo. Considerando una distancia de alcance promedio de 200 metros, modificada en base a la posición de los sitios de acumulación de caídas de rocas, rodados y desprendimientos, y a los cambios de pendiente.	Zona Excluida de la Edificación Uso Espacio Público y Área Verde	Zona Excluida de la Edificación Uso Espacio Público y Área Verde
		ALTA	Corresponden a: (1) zonas ubicadas topográficamente bajo zonas de susceptibilidad de alcance y generación alta, considerando una distancia de alcance condicionada por la altura del talud en la zona de origen, las características morfológicas y pendiente de la planicie, en general esta distancia de alcance se encuentra en zonas de pendientes mayores a 15° en promedio; y (2) áreas ubicadas directamente bajo zonas de generación de susceptibilidad alta en los casos en que topográficamente sobre ellos no existen afloramientos de susceptibilidad de generación muy alta, es decir, bajo sectores de ladera natural o taludes cuya pendiente es de entre 25° y 35° en la mayoría de las unidades geológicas del área de estudio, y entre 15 y 25° en los estratos pertenecientes a las formaciones Punta Barranco, Oficina Viz, y El Godo. En este caso se considera una distancia de alcance promedio de 200 metros, modificada en base a la posición de los sitios de acumulación de caídas de rocas, rodados y desprendimientos, y a los cambios de pendiente.	Riesgo (2.1.17) Zona Excluida de la Edificación Uso Espacio Público y Área Verde	Riesgo (2.1.17) Zona Excluida de la Edificación Uso Espacio Público y Área Verde
		MODERADA	Corresponde a: (1) zonas ubicadas topográficamente bajo zonas de susceptibilidad de alcance y generación alta, considerando una distancia de alcance condicionada por la altura del talud en la zona de origen, las características morfológicas y pendiente de la planicie, en general esta distancia de alcance se encuentra dentro de la planicie en zonas de pendientes mayores a 10° en promedio; y (2) en las zonas no correspondientes a sitios de alcance de susceptibilidad mayores, a sectores de ladera natural o taludes cuya pendiente entre 15 y 25° en la mayoría de las unidades geológicas del área de estudio, y menores a 15° en los estratos pertenecientes a las formaciones Punta Barranco, Oficina Viz, y El Godo.	Mitigación con Normas Urbanísticas Excluir equipamiento esencial	Mitigación con Normas Urbanísticas Excluir equipamiento esencial

Fuente: Elaboración propia. Equipamiento esencial corresponde a las instalaciones de salud, educación, seguridad e instituciones estatales.

A partir de la zonificación de la susceptibilidad para los diferentes peligros reconocidos, se proponen restricciones a los criterios de zonificación urbana. Estos criterios, que se sistematizan en el Cuadro 9.2-1, deben tener en cuenta las siguientes recomendaciones:

- Se considera deseable que las áreas de susceptibilidad 'muy alta' y 'alta' no se utilicen, aun cuando se entiende que muchas veces las áreas expuestas a algunos peligros en particular pueden parecer las más atractivas desde otros puntos de vista (por ejemplo, las áreas expuestas a maremotos).
- En caso de las áreas que actualmente se encuentran utilizadas, se recomienda que, si son susceptibles a ser afectadas por algún peligro, se establezcan normas urbanísticas destinadas a mitigar los peligros. Como criterio general, en la medida que la susceptibilidad sea más alta, las restricciones debieran ser más estrictas.
- Se recomienda evitar la instalación de equipamiento crítico en las áreas que se encuentren expuestas a susceptibilidad 'muy alta', 'alta' o 'moderada' para cualquiera de los peligros zonificados.

9.3 RECOMENDACIONES ESPECÍFICAS

A continuación, se presenta una serie de recomendaciones específicas que podrían permitir mejorar el análisis de algunos de los peligros analizados:

- En la actualidad, la información relativa a los ojos de mar se encuentra desordenada y, en el contexto de este trabajo, sólo se pudieron recopilar testimonios de personas y algunos datos aislados, pero no se encontró alguna fuente o conjunto de fuentes que permitiera sistematizar la información relativa a ellos. En este sentido, se recomienda realizar estudios destinados a catastrarlos y comprender su funcionamiento, para poder, posteriormente, protegerlos y evitar, al mismo tiempo, que éstos provoquen daños a personas u obras de infraestructura.
- La información que actualmente existe es insuficiente para zonificar el peligro de maremoto a una escala que se pueda aplicar a los Instrumentos de Planificación Territorial. Para obtener un mapa más preciso de inundaciones por maremotos resulta necesario realizar estudios más específicos, los que deben incluir levantamientos topográficos y batimétricos de detalle en los sectores costeros, y simulaciones basadas en modelos numéricos a escala local y que consideren varios escenarios basados los eventos más desfavorables posibles.
- Para mitigar los riesgos asociados a flujos de detrito y/o barro e inundaciones, se recomienda construir obras destinadas a controlar el escurrimiento de aguas superficiales, su intercepción, captación, conducción y descarga controlada hacia cauces establecidos. Todo esto con una asesoría técnica-profesional apropiada, tal como lo indica el artículo 2.1.17 de la OGUC.
- El análisis de los flujos de detrito y/o barro mediante modelación numérica requiere que se escoja un modelo adecuado a los propósitos perseguidos. En este sentido, los modelos unidimensionales pueden ser inadecuados, en especial sobre aquellas formas en que el escurrimiento de agua tiende a divergir, como son los abanicos aluviales. Se recomienda, en estos casos utilizar modelos en dos dimensiones, que no definan a priori hacia donde escurrirá el agua. Adicionalmente, se recomienda que, en caso de ocurrir un evento de precipitaciones que genere grandes flujos, se actualicen los modelos.
- Se recomienda realizar ensayos de las Gravas de Alto Hospicio destinados a comprender mejor su comportamiento. En primer lugar, se recomienda aplicar ensayos de tipo triaxial para corroborar los valores de ángulos de fricción, puesto que estos parámetros fueron obtenidos a través de ensayos *insitu* sobre comportamiento de cargas y deformaciones verticales. También se recomienda la aplicación de ensayos de corte, tanto para la condición seca normal como seca sin sales, a fin de determinar las variaciones de su resistencia y rigidez y su efecto en la estabilidad vertical del estrato.
- Se sugieren seguir las recomendaciones y consideraciones que se sintetizan en el Cuadro 9.3-1, priorizando las Canteras 7 y 8, debido a su potencial impacto sobre instalaciones. En términos generales las medidas de mitigación para la operación deben estar orientadas a la restricción de

instalaciones de plantas de clasificación u otras estructuras en sectores susceptibles de caída de rocas, como también a las operaciones intensivas en el área. Además, la operación de cargo de material se debería hacer no directamente desde el talud, sino de sectores de acopios establecidos los cuales aseguren que no se generan cornisas ni deslizamientos menores (secuenciales) de la pared por efecto “cuchara” de la excavación. En el caso de los botaderos, se debe tener especial atención a la aparición de grietas de tensión, llevando un monitoreo de los vaciados de reparación de estos a fin de poder evaluar el estado actual. Es importante desarrollar pretiles de contención que delimiten el área de descarga en botaderos, los cuales evitan que el personal realice desbordes directos que pueden proyectar material sobre otras instalaciones en la línea vertical, como también el potencial deslizamiento repentino por la aparición de grietas no identificadas. Finalmente, se sugiere requerir lineamientos operacionales para las empresas que trabajan en el sector a fin de aumentar la seguridad en la operación tanto para las personas como para las instalaciones, lo que en el largo plazo disminuiría las áreas de influencia de las canteras analizadas. Especial cuidado merece la Cantera 4, la que por su cercanía a una ruta de alto tránsito (Ruta 1) debería tener prioridad en los trabajos de mejoramiento, no solo del talud sino del sector de acumulación de Depósitos Antrópicos.

- Se sugiere generar estudios acabados de suelo fundacional caso a caso en función de lo requerido por las normas sísmicas NCh433 y NCh2369 para el diseño de cada proyecto en la zona con el fin de reconocer las características de los suelos de fundación de la comuna, y así determinar de mejor manera las características mecánicas de los suelos, y a la vez determinar variaciones o contrastes mecánicos de las unidades litológicas mapeadas en profundidad.
- Se sugiere realizar estudios paleosismológicos basados en la metodología propuesta por Becker et al. (2005) y Bryant y Hart (2007), que delimiten a una escala local (>1:10.000) las trazas de las fallas, incluyendo dataciones radiométricas y estimación de los terremotos asociados a la ruptura de estas fallas. Estos estudios deberían hacerse de manera prioritaria en la ciudad de Iquique, dado que se encuentra atravesada por una serie de fallas que han sido identificadas como potencialmente activas. Estos estudios que son de montos de inversión altos (cientos de miles de dólares) y de plazos de ejecución (mayores a un año) escapan a los alcances de lo que se puede desarrollar como parte de un estudio de riesgo de un plan regulador comunal. Una vez bien determinada las trazas (a la escala adecuada) y el nivel de actividad de las fallas, se sugiere como zona de restricción por fallas geológicas superficiales una franja de 150 m de ancho total centrada en la traza de la falla activa, evitando posteriormente la construcción de infraestructura crítica o equipamiento esencial y obligando el desarrollo de diseño de ingeniería específico que considere los efectos de una falla activa para el resto de la infraestructura.

Cuadro 9.3-1: Recomendaciones específicas por cantera.

Cantera	Caída de Rocas	Deslizamientos
Cantera 1	Resguardar operación del sector, protegiendo a personal y equipos de caída de rocas, mediante la generación de pretiles de contención que delimiten el área de caída de rocas y la prohibición de instalaciones de máquinas de clasificación de tamaño, lo que aumentaría la frecuencia de personal en el área.	Realizar una extracción orientada a disminuir el ángulo de talud y altura de la cantera. Operaciones de desborde donde el equipo elimina la cresta del talud desde la parte superior deben ser restringidas por una potencial activación de grietas de tensión y el consecuente deslizamiento de un bloque completo de la pared.
Cantera 2	Restringir operación a una distancia mayor a la que se delimita por caída de rocas. Generación de altos pretiles que generen una cuenca entre la zona de operación y el talud a fin de contribuir a la acumulación del material.	Extracción orientada a disminuir la inclinación del talud y generar una berma que permita una altura de talud menor y contención de material de niveles superiores.
Cantera 3	Debido a su estado no activo, se recomienda realizar cierre del sector para evitar ingreso de personas y equipos. El volumen de deslizamiento podría ser contenido en la plataforma de operación.	

Cantera	Caída de Rocas	Deslizamientos
Cantera 4	Operación se debe realizar fuera del sector demarcado por caída de rocas desde el talud. En el caso de la caída de rocas desde el botadero, se debe detener el vaciado en este sector ya que podrían seguir una trayectoria por sobre la Ruta 1.	Disminuir altura e inclinación del talud. Evitar la instalación de estructuras en el área de operación.
Cantera 5	Debido a su estado no activo, se recomienda realizar cierre del sector para evitar ingreso de personas y equipos. Previamente se recomienda realizar trabajos de mejoramiento de los botaderos, idealmente cortando las grietas de tensión para generar deslizamiento controlado los cuales deben ser coordinados con trabajos de limpieza en la Ruta 1.	
Cantera 6	El sector que delimita la plataforma de operación actúa como barrera para la caída de rocas, por lo que se debe evitar realizar la extracción de este sector, dejando la cantera encerrada en su condición actual, limitando el ingreso de personas y equipos.	Realizar trabajos orientados a disminuir la inclinación y altura del talud. Generación de bermas intermedias y extensión de la pata principalmente. Especial atención con caída de rocas desde niveles superiores al encontrarse en contacto con talud de roca la que puede formar bloques de 1[m] aprox.
Cantera 7	Generar pretil de contención de caída de rocas con material proveniente de talud.	Disminuir ángulo de inclinación y altura de talud, utilizando materiales para realizar pretil de contención de caída de rocas. Debido al largo alcance que potencialmente alcanza el escenario sísmico sobre sectores urbanos, se sugiere dar prioridad a trabajos de mitigación en esta cantera.
Cantera 8	Se recomienda eliminar cobertura de cantera, previo análisis de futuros deslizamientos gatillados por la remoción de este material. Posteriormente utilizar esa unidad para generar altos pretil de contención que generen una cuenca de acumulación en el sector. Otra opción es la ubicación de estructuras en la cresta del talud que contengan material de menor tamaño que proviene de las partes altas de la ladera. Se debe dar prioridad a estos trabajos.	

Fuente: Elaboración propia.

- Paralelamente, se recomienda realizar capacitaciones a la población con respecto a los peligros geológicos, considerando sus causas y consecuencias, en las que además se informe adecuadamente acerca de las medidas a adoptar frente a situaciones de emergencia (sistemas de alerta, vías de evacuación, zonas seguras), con el objetivo de promover el autocuidado. En caso de que la autoridad no pueda dar una alerta oportuna, la educación y conocimiento acerca de los diferentes peligros y riesgos geológicos pueden salvar vidas, ya que condiciona una reacción correcta y autónoma por parte de la población. Como ejemplo, se suele citar lo ocurrido durante el terremoto y maremoto del 27 de febrero de 2010, en la zona centro sur de Chile, donde la población de varias localidades se alejó de la costa por iniciativa propia una vez ocurrido el sismo.

10 REFERENCIAS

- Allmendinger, R., & González, G. (2009). *Neogene to Quaternary Tectonics of the Coastal Cordillera, northern Chile*. *Tectonophysics*. tecto.2009.04.019:18 pp.
- Allmendinger, R., & González, G. (2010). *Invited review paper: Neogene to Quaternary tectonics of the coastal Cordillera, northern Chile*. *Tectonophysics* 495: 93-110.
- Allmendinger, R., González, G., Yu, J., & Hoke, G. (2005). *Trench-parallel shortening in the northern Chilean forearc: tectonic & climatic implications*. *Geological Society of America Bulletin* 117: 89–104.
- Amigo, A., & Bertin, D. (2013). *Mapa preliminar de peligros volcánicos Volcán Irruputuncu. Región de Tarapacá. Escala 1:150.000*. Santiago, Chile: SERNAGEOMIN.
- Antinao, J., Fernández, J., Naranjo, J., & Villarroel, P. (2002). *Peligro de Remociones en Masa e Inundaciones en la Cuenca de Santiago*. Santiago: Servicio Nacional de Geología y Minería. Carta Geológica de Chile. Serie Geología Ambiental, No. 2, 1 mapa escala 1:100.000.
- ARCADIS-MOP. (2012). *Estudio de factibilidad "Construcción obras aluvionales en quebradas de Iquique y Alto Hospicio"*.
- Ayala, F. (1985). *Geología y prevención de daños por inundaciones*. Madrid: Instituto Geológico y Minero de España.
- Baker, V., Kochel, R., & Patton, P. (1988). *Flood Geomorphology*. John Wiley and Sons, Chichester, UK, 503 pp.
- Belmonte-Pool, J. (1997). *Análisis del contacto sismogénico interplaca a lo largo de Chile*. Santiago: Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias, mención Geofísica, Universidad de Chile.
- Bertin, D., & Amigo, A. (2015). *Peligros del Volcán San Pedro, Región de Antofagasta. Escala 1:50.000*. Santiago, Chile: SERNAGEOMIN.
- Bloch, W., Kummerow, J., Salazar, P., Wigger, P., & Shapiro, S. (2015). High resolution image of the North Chilean subduction zone: Seismicity, reflectivity and fluids. *Geophysical Journal International*, doi:10.1093/gji/ggu084.
- Bobadilla, H., Jara, C., Carrasco, F., & Marín, M. (2014). *Efectos geológicos de los sismos del 1 y 2 de abril de 2014: observación y evaluación de daños en los colegios. Inf-Tarapacá-07*. Sernageomin.
- Brüggen, J. (1950). *Fundamentos de la Geología de Chile*. Instituto Geográfico Militar, Santiago, Chile.
- Carrizo, D., González, G., & Dunai, T. (2006). *Coexistencia de acortamiento NS y EW durante el Neógeno en el antearco externo del norte de Chile*. *En Congreso Geológico Chileno: 375-378*. Antofagasta, Chile.
- Carrizo, D., González, G., & Dunai, T. (2008). *Constricción neógena en la Cordillera de la Costa, norte de Chile: neotectónica y datación de superficies con ²¹Ne cosmogénico*. *Revista Geológica de Chile*, 35(1), 1 - 38.

- Castro, C. (2004). *Duna cerro Dragón de Iquique (20°15'S): Un rasgo Geomorfológico singular del desierto costero chileno*. *Revista Terra Australis*: 29-46.
- Centeno, J., Fraile, M., Otero, M., & Pividal, A. (1994). *Geomorfología Práctica. Ejercicios de fotointerpretación y planificación geoambiental*. Madrid: Ed. Rueda.
- Centro Sismológico Nacional. (2014). *Sismos Importantes y/o Destructivos (1570 a la fecha), Magnitud Ms mayor o igual a 7.0*. Recuperado el 26 de mayo de 2017, de <http://www.sismologia.cl/links/terremotos/>
- CIGIDEN. (2017). *Elaboración de un escenario sísmico en Iquique. Caracterización de un posible terremoto y sus consecuencias en el entorno físico y social. Primera Edición. Santiago, Chile*.
- Costa, J. (1984). Physical geomorphology of debris flows. In Developments and Applications of Geomorphology. En J. E. Costa, & P. J. Fleisher (Edits.), *Developments and Applications of Geomorphology* (págs. 268-317). Berlin: Springer-Verlag.
- Cruden, D., & Varnes, D. (1996). *Landslide types and processes*. Washington D.C.: Special Report 247: Landslides: Investigation and Mitigation, Transportation Research Board.
- Cruz, C., & Calderón, J. (2008). *Guía Climática Práctica* (Dirección Meteorológica de Chile ed.). Santiago, Chile.
- David, C. (2007). *COMPORTEMENT ACTUEL DE L'AVANT-ARC ET DE L'ARC DU COUDE DE ARICA DANS L'OROGÉNÈSE DES ANDES CENTRALES*. Tesis doctoral, Université Paul Sabatier - Toulouse III.
- DeMets, C., Gordon, R., Argus, D., & Stein, S. (1994). Effect of recent revisions to the geomagnetic reversal time scale on estimates of current plate motions. *Geophysical Research Letters*, 21(20), 2191-2194.
- Díez Herrero, A. (2002). *Condicionantes geomorfológicos de las avenidas y cálculos de caudales y calados*. Barcelona, España: Ariel, Ariel Ciencia.
- Díez, A., & Pedraza, J. (1996). *Procesos fluviales*. Madrid: Ruda.
- Díez-Herrero, A., Lain-Huerta, L., & Llorente-Isidro, M. (2008). *Mapas de Peligrosidad por avenidas e inundaciones: Guía metodológica para su elaboración*. Madrid: Instituto Geológico y Minero de España. Serie Riesgos Geológicos/Geotecnia No. 1, 190 pág.
- Dunai, T., González, G., & Juez-Larré, J. (2005). *Oligocene-Miocene age of aridity in the Atacama Desert revealed by exposure dating of erosion-sensitive landforms*. *Geology* 33: 321-324.
- EIC Ingenieros - DOH, M. (2021). *Análisis de Riesgos Aluvionales, sector Altos de Playa Blanca, Comuna de Iquique*. Iquique.
- Esaki, T., Thapa, P., Mitani, Y., & Ikemi, H. (2005). Landslide and debris flow characteristics and hazard mapping in mountain hillslope terrain using GIS, Central Nepal.
- Fariás, V. (2017). *Remociones en masa asociadas a sismicidad en el Norte de Chile: Análisis multiescala en distintos ambientes morfotectónicos*. Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias, Mención Geología.

- Garrido, N., & Jara, C. (2015). *Minuta técnica: identificación de áreas afectadas por flujos de detritos en ruta 1, tramo Iquique - El Loa*. Sernageomin.
- Giraud, R., & Shaw, L. (2007). Landslide Suceptibility Map of Utah. *Utah Geological Survey*, 16 p. .
- Gonzalez de Vallejo, L., Ferre, M., Ortuño, L., & Oteo, C. (2002). *Ingeniería Geológica* (Segunda ed.). Madrid: Pearson Educación.
- González, G., Allmendinger, R., Casanova, C., & Carrizo, D. (2003). *Procesos tectónicos de antearco que intervienen en la deformación Neógeno-cuaternaria de la Cordillera de la Costa, norte de Chile*. X Congreso Geológico Chileno, S4. Universidad de Concepción, Concepción, Chile.
- González, G., Salazar, P., Loveless, J., Allmendinger, R., Aron, F., & Shrivastava, M. (2015). Upper plate reverse fault reactivation and the unclamping of the megathrust during the 2014 northern Chile earthquake sequence. *Geology*, doi:10.1130/G36703.1.
- González-Ferrán, O. (1995). *Volcanes de Chile*. Santiago: Instituto Geográfico Militar, 410 pág.
- Hartley, A., & Chong, G. (2002). *Late Pliocene age for the Atacama Desert: implications for the desertification of western South America*. *Geology* 30 (1): 43-46.
- Hasanzadeh Nafari, R., Ngo, T., & Mendis, P. (2016). An assessment of the effectiveness of tree-based models for multi-variate flood damage assessment in Australia. *Water*, v. 8(n. 282), p. 1-18.
- Hauser, A. (1985). Flujos aluvionales de 1870 y 1896 ocurridos en la ladera norte del volcán Yates, X Región: su implicancia en la evaluación de riesgos naturales. *Revista Geológica de Chile*, 25-26, 125-133.
- Hauser, A. (1997). *Los aluviones del 18 de Junio de 1991 en Antofagasta: un análisis crítico, a 5 años del desastre*. Santiago: Servicio Nacional de Geología y Minería, Boletín N° 49, 47 pág.
- Hauser, A. (2000). *Remociones en masa en Chile* (2da ed.). Santiago: Servicio Nacional de Geología y Minería, Boletín N° 59, versión actualizada, 89 pág.
- Hungr, O., Leroueil, S., & L., P. (2013). *The Varnes classification of landslide types, an update*.
- JTC-1. (2008). Guidelines for Landslide Susceptibility, Hazard and Risk Zoning for land use planning. *Engineering Geology*, 102(3-4), 85-98.
- Kausel, E., & Ramírez, D. (1992). Relaciones entre parámetros focales y macrosísmicos de grandes terremotos chilenos. *Revista Geofísica, Volumen 37*, pp. 36 - 194., 37, 36-194.
- Keefer, D. (1984). Landslides caused by earthquakes. *Geological Society of América Bulletin*, 95(4), 406-421.
- Keller, E., & Blodgett, R. (2004). *Riesgos Naturales*. Madrid: Pearson Education S.A., 448 pág.
- Khazaradze, G., & Klotz. (2003). Short and long-term effects of GPS measured crustal deformation rates along the South-Central Andes. *Journal of Geophysical Research*, 108, 1–13.

- Kreibich, H., Piroth, K., Seifert, I., Maiwald, H., Kunert, U., Schwartz, J., . . . Thieken, H. (2009). Is flow velocity a significant parameter in flood damage modelling? *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* (n. 9), p. 1679-1692.
- Lara, L., Orozco, G., Amigo, A., & Silva, C. (2011). *Peligros Volcánicos de Chile. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Ambiental, No.13: 34 p., 1 mapa escala 1:2.000.000. Santiago.*
- Lastra, J., Fernández, E., Díez-Herrero, A., & Marquínez, J. (2008). *Flood hazard delineation combining geomorphological methods: an example in the Northern Iberian Peninsula. Natural Hazards, 45(2), 277-293.*
- Lay, R., Yue, H., Brodsky, E., & An, C. (2014). The April 1, 2014 Iquique, Chile Mw 8.1 earthquake rupture sequence. *Geophys. Res. Lett.*, 41, 3818 - 3825.
- Marín, M. (F). *Sepúlveda.*
- Marín, M., & Bobadilla, H. (2014). *Efectos geológicos de los sismos del 1 y 2 de abril de 2014: observación de daños en casas ubicadas en los sectores Altos del Mar, Matilla 2, Las Dunas 1 y Población Carol Urzúa. Sernageomin.*
- Marín, M., & Ramírez, P. (2013). *Geología para el ordenamiento territorial y la gestión ambiental en el área de Iquique - Alto Hospicio, Región de Tarapacá. Mapa 2: Peligro de inundación por tsunami y remoción en masa. Escala 1:20.000. Informe Registrado IR-13-53. 5 Mapas. SERNAGEOMIN.*
- Marín, M., Arenas, M., & Venegas, C. (2014a). *Efectos geológicos de los sismos del 1 y 2 de abril de 2014: observaciones de daños en el sector portuario y evaluación de peligros geológicos en el monumento al mariner desconocido. In-Tarapacá_05. Sernageomin.*
- Marín, M., Sepúlveda, F., Arenas, M., & Venegas, C. (2014b). *Efectos geológicos de los sismos del 1 y 2 de abril de 2014: efectos del tsunami en las playas Ike-Ike y Ñajo y las caletas Chanavaya, Caramucho, Chanvayita y Cañamo. Inf-Tarapacá_06. Sernageomin.*
- Marquardt, C., & Naranjo, J. (2005). *Informe final sobre efectos del sismo del 13 de junio 2005 en la región de Tarapacá. Servicio Nacional de Geología y Minería. Inédito: 14.*
- Marquardt, C., Marinovic, N., & Muñoz, V. (2008). *Geología de las Ciudades de Iquique y Alto Hospicio, Región de Tarapacá. Escala 1:25.000. Sernageomin, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica 133: 33 pp. Santiago.*
- Marquínez, J., & Lastra, J. F. (2006a). *Metodología utilizada para cartografiar la peligrosidad de inundaciones en las cuencas del Norte. Madrid: Instituto Geológico y Minero de España, Serie Medio ambiente, Riesgos Geológicos nº7.*
- Marquínez, J., & Lastra, J. F. (2006b). *Estudio de inundabilidad en la ciudad de Sarria (Lugo). Tecnoambiente, 160, 76-79.*
- Martin, G., & Lew, M. (1999). *Recommended Procedures for Implementation of DMG Special Publication 117: Guidelines for Analyzing and Mitigating Liquefaction Hazards in California. Los Angeles: Southern California Earthquake Center, University of Southern California, 63 pág.*

- Mather, A., Hartley, A., & Griffiths, J. (2014). *The giant coastal landslides of Northern Chile: Tectonic and climate interactions on a classic convergent plate margin*. *Earth and Planetary Science Letters*, 388, pp. 249–256. ISSN 0012821X. doi: 10.1016/j.epsl.2013.10.019.
- Merz, B., Kreibich, H., & Lall, U. (2013). Multi-variate flood damage assessment: a tree-based data mining approach. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, v. 13, p. 53-64.
- Mortimer, C. (1980). *Drainage evolution in the Atacama Desert of Northernmost Chile*. *Revista Geológica de Chile*, N° 11, v. 2, p. 3-28.
- Mpodozis, C., & Ramos, V. A. (1989). *The Andes of Chile and Argentina* In: *Ericksen, G. E.; Cañas, M. T.; Reinemund, J. A. (eds) Geology of the Andes and its Relation to Hydrocarbon and Energy Resources. Circum-Pacific Council for Energy and Hydrothermal Resources, American Association of Pet (11 ed.)*. Houston, Texas: Earth Science Series.
- Myers, B., & Brantley, S. (1995). *Hazardous phenomena at volcanoes*. Vancouver, Washington.: USGS Open File Report, pág. 95-231.
- Naranjo, J., & Varela, J. (1996). *Debris and mud flows that affected the eastern area of Santiago on May 3, 1993*. Santiago: Servicio Nacional de Geología y Minería. Boletín No. 47, 42 pág.
- NEIC. (2017). *National Earthquake Information Center, U.S. Geological Survey*. Disponible en: <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>.
- Niemeyer, H., & Cereceda, P. (1984). Hidrografía. (I. G. Militar, Ed.) *Geografía de Chile*, VIII.
- ONEMI. (2009a). *Sismo destructivo de Tarapacá, 13 junio 2005*.
- ONEMI. (2009b). *Sismo destructivo de Tocopilla, 14 de noviembre 2007*.
- ONEMI. (2014). <http://www.onemi.cl/informate/director-nacional-entrega-reporte-actualizado-por-sismo-de-mayor-intensidad/>. Recuperado el 2017
- ONEMI. (2017a). *Plan regional de emergencia 2017-2018*. Dirección Regional de Tarapacá.
- ONEMI. (2017b). *Plan específico de emergencia por variable de riesgo aluvional*. Región de Tarapacá.
- ONEMI. (2017c). *Plan Específico de Emergencia por Variable de Riesgo Sismo/Tsunami y Remoción en Masa, Región de Tarapacá*. Dirección de Protección Civil y Emergencia. Dirección Regional de ONEMI Tarapacá.
- ONU/EIRD. (2004). *Vivir con el Riesgo, Informe mundial sobre iniciativas para la reducción de desastres, Versión en español 2004*. Nueva York: Organización de las Naciones Unidas.
- Opazo, E. (2014). *Evaluación y zonificación de peligro de remociones en masa en la Ruta A-16, vía de acceso principal a la ciudad de Iquique (Región de Tarapacá)*. Memoria para optar al Título de Geólogo.

- Opazo, E. (2015). *Evaluación y zonificación de peligro de remociones en masa desencadenadas por terremoto en la ruta A-16, vía de acceso a la ciudad de Iquique (Región de Tarapacá)*. XIV Congreso Geológico de Chile.
- Opazo, E., Sepúlveda, N., Marín, M., Ramírez, P., & Neira, H. (2018). *Peligros geológicos del área de Iquique-Alto Hospicio. Región de Tarapacá. Escala 1:20.000*. Santiago: SERNAGEOMIN.
- Orozco, G., & Bertin, D. (2013). *Mapa preliminar de peligros volcánicos del Complejo volcánico Olca-Paruma. Regiones de Tarapacá y Antofagasta. Escala 1:75.000*. Santiago, Chile: SERNAGEOMIN.
- Ortega, J., & Garzón, G. (2006). *Interpretación de los depósitos de avenida como clave para establecer la dinámica de la llanura de inundación. Actas de la IX Reunión Nacional de Geomorfología, Universidad de Santiago de Compostela*.
- Pain, C. (1986). *Scarp Retreat and Slope Development Near Picton, New South Wales, Australia*. Braunschewig.
- Peyrat, S., Campos, J., de Chabaliér, J.-B., Pérez, A., Bonvalot, S., Bouin, M.-P., . . . Vilotte, J.-P. (2006). Tarapacá intermediate-depth earthquake (Mw 7.7, 2005, northern Chile): A slab-pull event with horizontal fault plane constrained from seismic and geodetic observations. *Geophys. Res. Lett.*, 33(L22308), doi:10.1029/2006GL027710, 2006.
- Pierson, T., & Scott, K. (1985). Downstream dilution of Lahar: transition from debris flow to hyperconcentrated streamflow. *Water Research*, 21(10), 1511-1524.
- PMA-GCA. (2007). *Movimientos en Masa en la Región Andina: Una guía para la evaluación de amenazas*. Santiago: Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para las Comunidades Andinas, Servicio Nacional de Geología y Minería, Publicación Geológica Multinacional, No. 4, 432 p.
- Quezada, J., Cerda, J., & Jensen, A. (2010). *Efectos de la tectónica y el clima en la configuración morfológica del relieve costero del norte de Chile. Andean Geology* 37 (1): 78-109.
- Sancho, C. (1997). Los mapas de riesgos. En J. Peña (Ed.), *Cartografía geomorfológica básica y aplicada* (págs. 181-200). Zaragoza: Geomorfa.
- Scholz, C. (1990). *The Mechanics of Earthquakes and Faulting*. Cambridge: Cambridge University Press, 439 pág.
- Sepúlveda, F., Vásquez, P., & Quezada, A. (2014). *Cartas Patillos y Oficina Victoria, Región de Tarapacá. Escala 1:100.000. Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica : 167-168. SERNAGEOMIN. Santiago*.
- Sepúlveda, N. (2014). *Caracterización de estructuras con evidencia de deformación cuaternaria para la estimación del peligro sísmico en las ciudades de Iquique y Alto Hospicio. Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad de Concepción. Concepción-Chile. 105p*.
- Sepúlveda, N., & Quezada, J. (2015). *Evidencias de deformación cuaternaria a partir del análisis morfológico de escarpes, ciudades de Iquique y Alto Hospicio. XIV Congreso Geológico Chileno. La Serena, Chile*.

- Sepúlveda, S., Murphy, W., Jibson, R., & Petley, D. (2005). Seismically-induced Rock Slope Failures Resulting from Topographic Amplification of Strong Ground Motions: The Case of Pacoima Canyon, California. *Engineering Geology*, 80, 336-348.
- Sepúlveda, S., Serey, A., Lara, M., Pavez, A., & Rebolledo, S. (2010). Landslides induced by the April 2007 Aysén Fjord earthquake, Chilean Patagonia. *Landslides*, doi: 10.1007/s1034VI-010-0203-2.
- SERNAGEOMIN. (2003). *Mapa Geológico de Chile: Versión Digital. Publicación Geológica Digital, N°4*. Santiago: Servicio Nacional de Geología y Minería.
- SERNAGEOMIN. (2013). *Geología para el Ordenamiento Territorial y la Gestión Ambiental en el área de Iquique-Alto Hospicio, Región de Tarapacá. Servicio Nacional de Geología y Minería, Informe Registrado IR-13-53, 41 p., 5 mapas a diferentes escalas*. Santiago.
- SERNAGEOMIN. (2015). Primer Registro Nacional de Desastres de Origen Geológico (1980 - 2015).
- SERNAGEOMIN. (2015). *Ranking de los 90 volcanes activos de Chile*. Recuperado el 14 de junio de 2017, de <http://www.sernageomin.cl/archivos/Ranking-de-Volcanes.pdf>
- SHOA. (2012). *Carta de Inundación por Tsunami referida al evento del año 1877, Iquique. Escala 1:15.000. TSU-104, 3a Ed. Junio 2012*.
- SHOA. (2015). http://www.shoa.cl/servicios/tsunami/data/tsunamis_historico.pdf. Recuperado el 2017
- Somoza, R. (1998). Updated Nazca (Farallon)- South America relative motions during the last 40 My: implication for mountain building in the central Andean region. *Journal of South American Earth Sciences*(11), 211-215.
- Sruoga, P. (2002). *El volcanismo reciente y riesgo asociado en la Provincia de Mendoza*. Mendoza: IANIGLA, 30 Años de Investigación Básica y Aplicada en Ciencias Ambientales, pág. 255-259.
- Suárez, G., & Comte, D. (1993). Comment on "Seismic coupling along the Chilean subduction zone" by B.W. Tichelaar and L.R. Ruff. *Journal of Geophysical Research*, 98, 15825-15828.
- SUBDERE. (2011). *Guía Análisis de Riesgos Naturales para el Ordenamiento Territorial*. Santiago: Subsecretaría de Desarrollo Regional.
- Tassara, A., Götz, H.-J., Schimdt, S., & Hackney, R. (2006). Three dimensional density model of the Nazca plate and the Andean continental margin. *Journal of Geophysical Research*, 111.
- Thomas, A. (1970). *Cuadrángulos Iquique y Caleta Molle, Provincia Tarapacá. Instituto de Investigaciones Geológicas, Carta Geológica de Chile N°21-22, 2 mapas escala 1:50.000, 52p*. Santiago.
- Tichelaar, B. W., & Ruff, L. J. (1993). *Depth of seismic coupling along subduction zones*, *Jour. Geoph. Res.*, 98, pp. 2017-2037.
- Tosdal, R., Clark, A., & Farrar, E. (1984). *Cenozoic polyphase landscape and tectonic evolution of the Cordillera Occidental, southernmost Peru*. *Geol. Soc. Amer. Bull.* 95, 1318– 1332.

- Urbina, S., Adán, L., Morgas, C., Olmos, S., & Ajata, R. (2011). Arquitectura de asentamientos de la costa de Tarapacá, Norte de Chile. *Estudios atacameños*, 63-96.
- Urrutia, R., & Lanza, C. (1993). *Catástrofes de Chile 1542-1992*.
- USGS. (2008). *The landslide handbook—A guide to understanding landslides*. Reston, Virginia: U.S. Geological Survey Circular 1325, 129 p.
- Uyeda, S., & Kanamori, H. (1979). *Back-arc opening and the mode of subduction*. Journal of Geophysical Research.
- Varnes, D. (1978). *Slope movement types and processes*. Washington, D.C.: Special report 17VI: Landslides: Analysis and Control, Transportation Research Board.
- Varnes, D. (1984). Hazard Zonation: A Review of Principal and Practice. Commission of Landslide of IAEG, UNESCO. *Natural Hazards*, 3, 1-61.
- Vásquez, P., & Sepúlveda, F. (2013). *Cartas Iquique y Pozo Almonte, Región de Tarapacá. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica Nos. 162-163, 103 pp., 1 mapa escala 1:100.000. Santiago*.
- Veloso, L., & Sánchez, M. (1991). *Características geomorfológicas. Área litoral: Iquique-Caleta Molle. Revista de Geografía Norte Grande 18: 3-8*.
- Western Washington University. (2011). *RELIEF GLOBE SLIDES*. Recuperado el 28 de 11 de 2011, de <http://www.smate.wvu.edu/teched/geology/GeoHaz/global/globe-17.jpg>
- Yugsi Molina, F., Hermanns, R., Dehls, J., Crosta, G., Sossio, R., & Sepúlveda, S. (2012). *Large rock avalanches in northern Chile, an integrated analysis towards regional hazard assessment*.

11 APÉNDICES

11.1 DEFINICIONES DE PELIGRO Y RIESGO USADAS EN ESTE ESTUDIO

Los procesos geodinámicos producen modificaciones de diversas magnitudes en la superficie terrestre que constituyen peligros geológicos que afectan de forma directa o indirecta las actividades humanas. Se entiende como **Peligro Natural** a cualquier fenómeno de origen natural que puede tener efectos negativos en el territorio (personas, infraestructura, medio ambiente, etc.). Los peligros naturales pueden subdividirse en distintas categorías: geológicos, hidrológicos, climáticos, incendios, etc.

Asociados a los peligros naturales se reconocen cuatro conceptos principales: **susceptibilidad**, **vulnerabilidad**, **amenaza** o peligrosidad (hazard) y **riesgo** (risk).

La **susceptibilidad** corresponde a una estimación cualitativa o cuantitativa de la distribución espacial de un fenómeno dado que existe o que potencialmente podría ocurrir en un área. Aunque se espera que un cierto fenómeno peligroso ocurra con mayor frecuencia en las áreas de mayor susceptibilidad, debe tenerse en cuenta que el análisis de susceptibilidad no considera el período de retorno de los eventos, es decir, el factor tiempo (JTC-1, 2008). La susceptibilidad depende directamente de los factores que controlan o condicionan la ocurrencia de los procesos, como la geomorfología o factores intrínsecos de los materiales geológicos, y de factores externos que pueden actuar como desencadenantes (por ejemplo, precipitaciones intensas, sismos, etc.). Para la construcción de mapas de susceptibilidad se utilizan los mapas de catastro, en los que se identifican las áreas que han sido afectadas por determinados procesos, y mapas de factores condicionantes que favorecen o entorpecen el desarrollo de estos procesos. Además, los mapas de susceptibilidad apuntan a cubrir el peor escenario posible en el área de estudio.

El concepto de **amenaza** o **peligrosidad** (hazard*) corresponde a la probabilidad de ocurrencia de un proceso, con una magnitud determinada dentro de cierto período de tiempo y en un área específica (Varnes, 1984). La estimación de la amenaza o peligrosidad implica necesariamente una consideración de la variable temporal, es decir, el período de recurrencia de un evento (período de retorno). Por otro lado, la amenaza para períodos de retorno infinitos tiende a ser similar que la susceptibilidad. Por lo anterior, cuando no se cuenta con datos suficientes para estimar períodos de retorno, resultan útiles los mapas de susceptibilidad, que consideran solo las variables intrínsecas del material para la zonificación de peligros geológicos.

Los **elementos expuestos** pueden ser personas, bienes, propiedades, infraestructuras, servicios, actividades económicas, etc., que pueden sufrir las consecuencias directas o indirectas de un proceso geológico en una determinada zona (Gonzalez de Vallejo, Ferre, Ortuño, & Oteo, 2002).

La **vulnerabilidad** corresponde al grado de pérdidas o daños potenciales de un elemento o conjunto de elementos dados, como consecuencia de la ocurrencia de un fenómeno de magnitud determinada. Se expresa en una escala de 0 (sin daños) a 1 (pérdida o destrucción total del elemento) o entre 0% y 100% de daños (Varnes, (1984); González de Vallejo et al., (2002); JTC1, (2008)).

Por otro lado, el concepto de **riesgo** (risk) incorpora consideraciones socioeconómicas, y se define como las potenciales pérdidas debidas a un fenómeno natural determinado, por ejemplo, vidas humanas, pérdidas

* La traducción literal corresponde a peligro, pero de acuerdo con la ONEMI y al proyecto Multinacional de Geociencias Andino (MAP-GAC) para evitar confusiones se utiliza Amenaza o Peligrosidad

económicas directas o indirectas, daños en infraestructura, etc. (Gonzalez de Vallejo, Ferre, Ortuño, & Oteo, 2002).

Según Varnes (1984), se denomina riesgo específico al grado de pérdidas esperado durante un período de tiempo dado, como consecuencia de la ocurrencia de un determinado proceso, expresado en términos de probabilidad. Puede ser expresado como el producto $A \times V$, donde A corresponde a la amenaza y V a la vulnerabilidad. En este caso no es posible obtener una evaluación cuantitativa de las pérdidas (Gonzalez de Vallejo, Ferre, Ortuño, & Oteo, 2002).

De acuerdo con las definiciones de la UNESCO (Varnes, 1984) el riesgo total corresponde al número esperado de vidas, personas heridas, daños a la propiedad, o a las actividades económicas debido a un fenómeno natural específico y se expresa como el producto del riesgo específico y los elementos expuestos, esto es:

$$R_t = R_e \times E = A \times V \times E$$

Donde R_t corresponde al riesgo total, R_e al riesgo específico y E a los elementos expuestos considerados. La Ilustración 11.1-1: Etapas de evaluación de un evento geológico peligroso. muestra la relación entre el conocimiento y la estimación de la susceptibilidad, amenaza y riesgo.

La definición de riesgo, o áreas de riesgo, utilizadas internacionalmente difieren a la nomenclatura propuesta por la Ordenanza General de Urbanismo y Construcción en su artículo 2.1.17. En la OGUC, el concepto utilizado de riesgo corresponde a la definición de “Peligro Natural” definida internacionalmente.

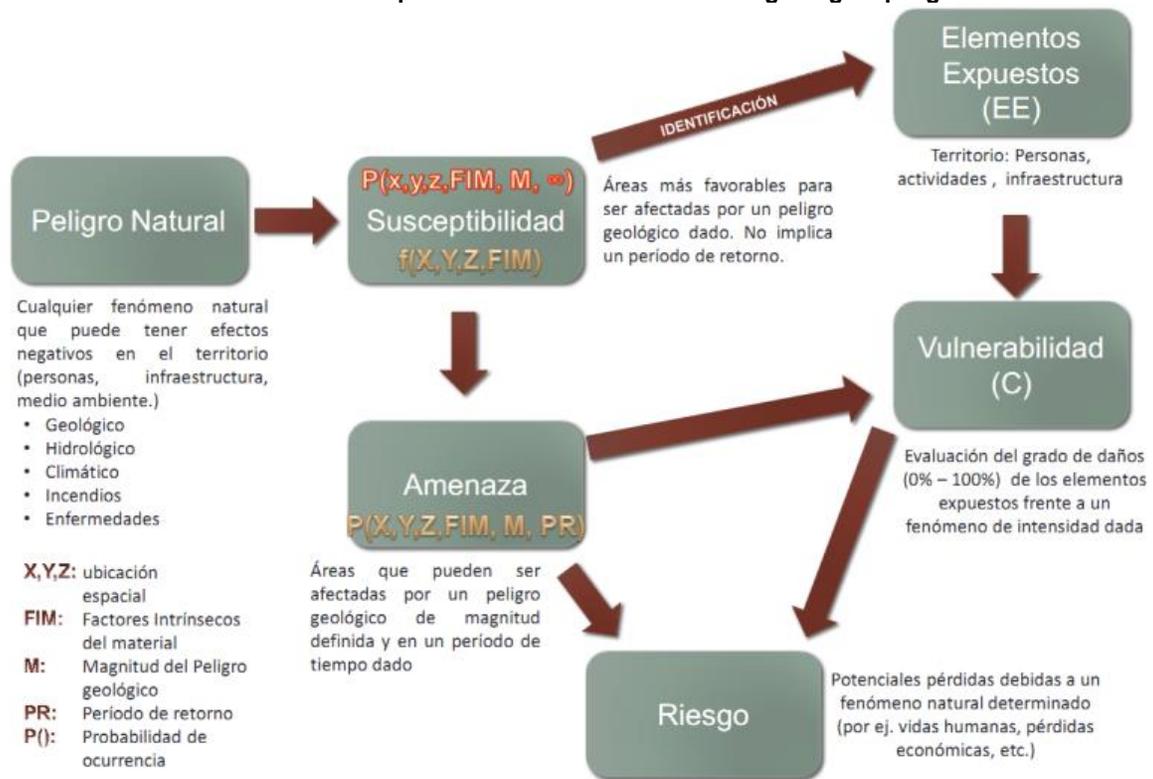
En resumen, los peligros geológicos pueden analizarse desde el punto de vista de las condiciones intrínsecas del material (estudios de susceptibilidad o determinísticos) y desde el punto de vista de los factores desencadenantes de un fenómeno (estudios de amenaza o probabilísticos). Considerando que para un estudio probabilístico es necesario contar con set de datos históricos de los procesos desencadenantes, los que normalmente no se encuentran registrados de manera adecuada, y que para períodos de retornos infinitos los mapas de amenaza tienden a ser similares a los mapas susceptibilidad, se considera que los mapas de susceptibilidad corresponden al escenario más conservador y adecuado para ser aplicado en la Planificación Territorial.

Finalmente, la reducción y mitigación de los riesgos vinculados a los diversos peligros geológicos presenta igual o mayor importancia que el manejo de las emergencias y la respuesta posterior al evento catastrófico. El desarrollo sustentable de la urbanización está directamente asociado a la reducción y mitigación de estos riesgos. La generación de conciencia a partir del conocimiento de los peligros y riesgos geológicos es fundamental para reducir y mitigar las consecuencias de estos eventos sobre la población (ONU/EIRD, 2004).

Es importante destacar que las definiciones previamente presentadas corresponden a una terminología aceptada y utilizada a nivel internacional, tanto en el ámbito científico (ver por ejemplo JTC-1, (2008)) como en instituciones públicas de diversos países. Estas definiciones son usadas por la Estrategia Internacional para la reducción de Desastres de la ONU (ONU/EIRD, 2004), por UNESCO (ver por ejemplo Varnes, (1984)) y por los servicios geológicos de diversos países (ver por ejemplo USGS, (2008) y PMA-GCA (2007)). A nivel nacional, estas definiciones han sido adoptadas por la Subsecretaría de Desarrollo Regional y Administrativo en la “Guía Análisis de Riesgos Naturales para el Ordenamiento Territorial” (SUBDERE, 2011) y por el Servicio Nacional de Geología y Minería (ver por ejemplo PMA-GCA (2007)).

Se recomienda incorporar esta terminología en el ejercicio de los instrumentos de planificación territorial, lo que permitirá que exista concordancia en la terminología y las metodologías adoptadas, tanto a nivel nacional, entre los diferentes servicios públicos relacionados, como a nivel internacional.

Ilustración 11.1-1: Etapas de evaluación de un evento geológico peligroso.



Fuente: Elaboración propia basado en Varnes (1984).

11.2 DESCRIPCIÓN DE LOS PELIGROS GEOLÓGICOS ANALIZADOS

En este capítulo se detallan los peligros geológicos que potencialmente podrían afectar o han afectado al área de estudio, constituyendo un riesgo de catástrofe permanente o potencial, amenazando el emplazamiento de población.

Para cada peligro, se describe en qué consiste, cuáles son sus factores condicionantes, y los principales efectos para la población y sus actividades. El análisis se realiza dividiendo los peligros geológicos en dos grupos, procesos internos o endógenos de la tierra (peligro sísmico y volcánico), y los procesos externos o exógenos (remociones en masa, inundaciones).

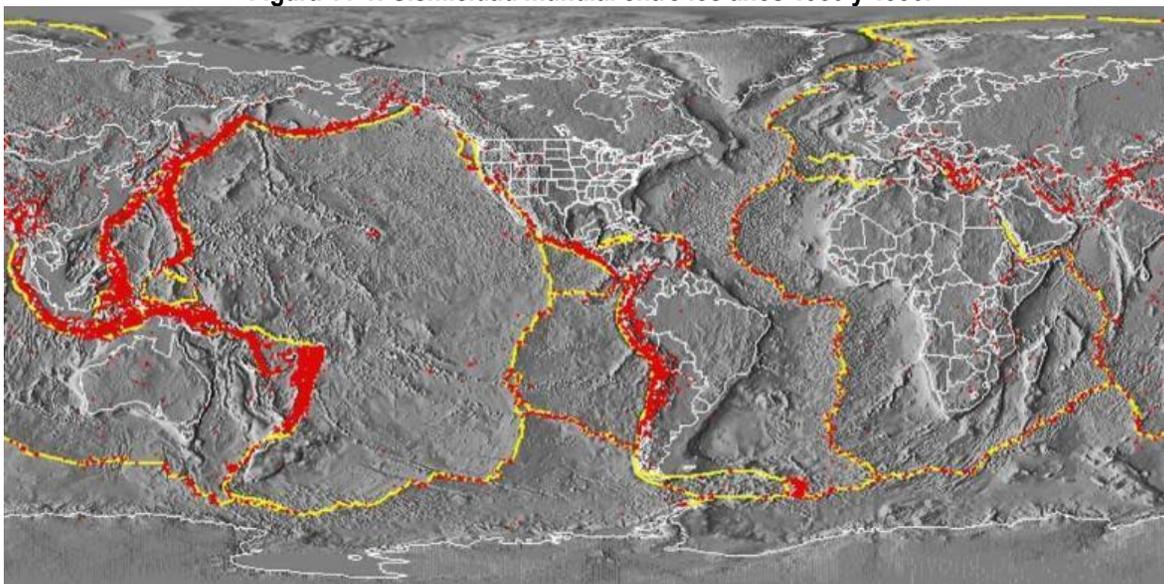
11.2.1 Procesos internos o endógenos de la Tierra

a) Sismicidad

i) Tipos de sismos en Chile

La costa Oeste de Sudamérica está delineada por el borde occidental de la placa Sudamericana y se caracteriza por una intensa sismicidad debido a su convergencia con la placa de Nazca. En planta se aprecia una banda sísmica activa muy angosta (100-150 km) y de profundidad variable (~5-200 km) entre el cordón montañoso de los Andes y la fosa Perú-Chile. La Figura 11-1 ilustra la sismicidad mundial que resalta los márgenes de las placas tectónicas y muestra, además, cómo Chile se encuentra en un ambiente de gran producción sísmica.

Figura 11-1: Sismicidad mundial entre los años 1980 y 1990.

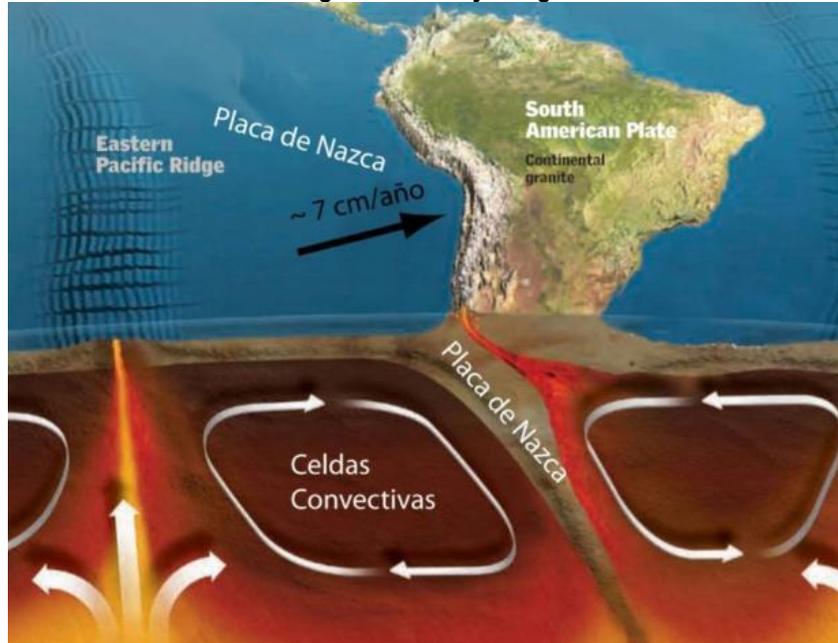


Fuente: Western Washington University (2011).

El margen de subducción donde se ubica Chile está caracterizado por una convergencia del orden de 8 cm/año (DeMets, Gordon, Argus, & Stein, 1994). Una serie de fuerzas actúan sobre la Placa de Nazca, como por ejemplo el flujo convectivo de material del manto, que “mueve” a la placa en dirección al este generando la convergencia, o el mismo peso de la placa oceánica que “tira hacia abajo” esta placa, favoreciendo la subducción (Ilustración 11.2-1). Debido a sus distintas composiciones, la placa oceánica que es comparativamente más densa (de composición basáltica) tiende a introducirse bajo la corteza continental menos densa (de composición granítica). Las fuerzas que actúan sobre la interfaz entre ambas placas, así como las de interacción entre las placas y el manto generan el llamado acoplamiento sísmico interplaca, el que

puede entenderse como la resistencia al deslizamiento en la zona de contacto entre ambas. A mayor acoplamiento interplaca la capacidad de generar terremotos de gran magnitud aumenta (Scholz, 1990).

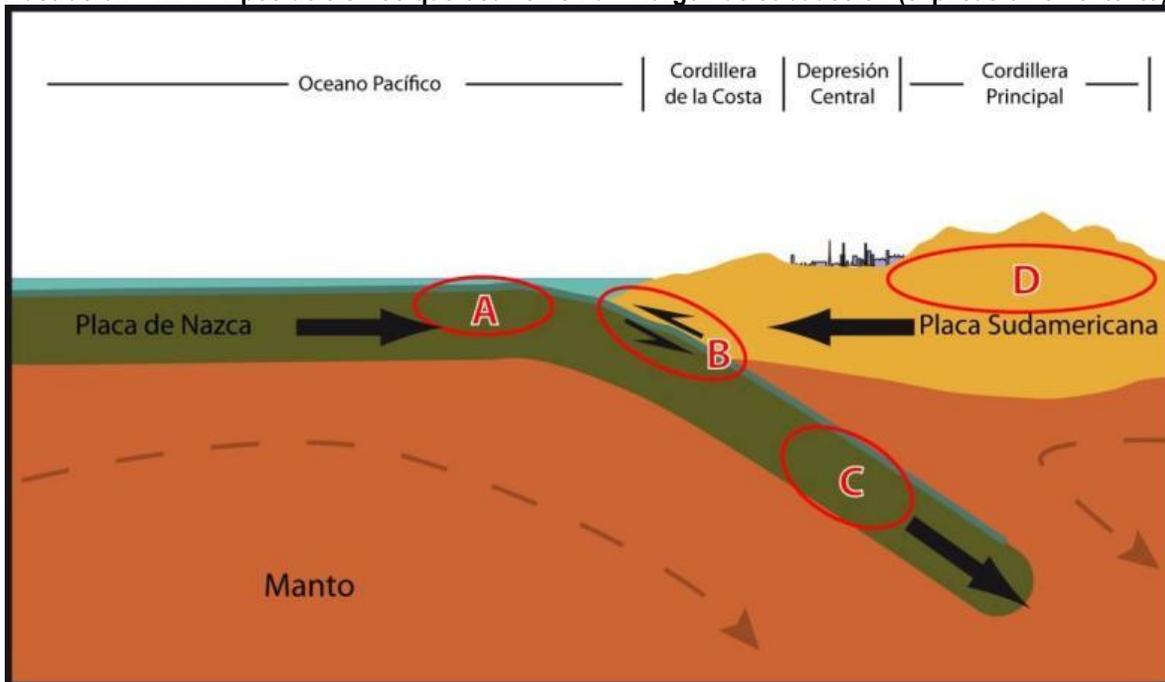
Ilustración 11.2-1: Contexto geodinámico y margen de subducción de Chile.



Fuente: Modificado de Enciclopedia Britannica (2008).

El sistema de subducción, además de acumular energía que se libera por sismos de interplaca, genera campos de esfuerzos en la placa continental, en la oceánica y en la zona de acople entre ambas. El método para descargar la energía acumulada es a través de diferentes tipos de sismos, ejemplificados en la Ilustración 11.2-2, que corresponde a:

2. Zona A: Sismos “Costa afuera”, que se producen por los esfuerzos extensivos por abombamiento en la placa subductante antes de la zona de contacto. A pesar de llegar a tener magnitudes cercanas a $M_w = 6$, prácticamente no causan efectos significativos en áreas pobladas debido a su ocurrencia en zonas mar adentro.
3. Zona B: Sismos asociados al contacto interplaca, como los ocurridos en Antofagasta 1995, Chile Central 1985, Mejillones 2005 y Constitución-Concepción en el 2010. Estos son producto de la liberación de energía acumulada por la convergencia de placas.
4. Zona C: Sismos intraplaca de profundidad intermedia, como los sismos de Punitaqui 1997, Copiapó 2002, Calama 1950, Tarapacá 2005 y Chillán 1939. Se producen por el fracturamiento tensional de la placa de Nazca (la placa se quiebra por su propio peso).
5. Zona D: Sismos superficiales intraplaca, cómo los sismos de Las Melosas en 1958, Aroma en 2001, Curicó en 2004 y Aysén, 2007. Son producto del esfuerzo intraplaca inducido por la subducción, que a la vez contribuye a la generación de relieve. En general, los sismos superficiales intraplaca se encuentran asociados a fallas superficiales que pueden tener movimientos normales, inversos y de rumbo, que responden a campos de esfuerzos compresivos o extensivos.

Ilustración 11.2-2: Tipos de sismos que ocurren en un margen de subducción (explicación en el texto).

Fuente: Elaboración propia.

ii) Mecanismos de daños asociados a los sismos

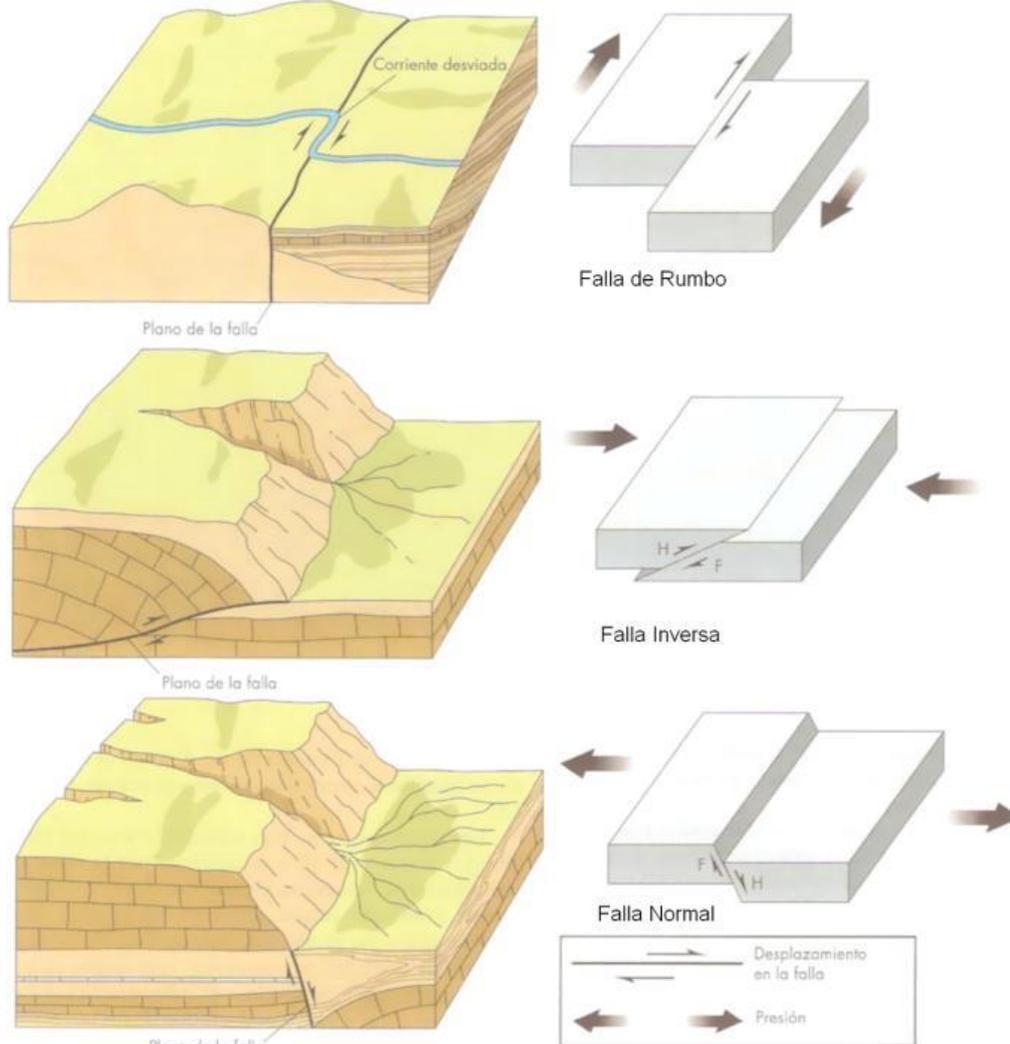
Independientemente de la ubicación particular de uno u otro sismo, todos ellos corresponden a un desplazamiento violento paralelo al plano de falla que libera la energía acumulada en la interfaz. La energía que se acumula producto de la convergencia de placas, tanto en el contacto interplaca como en la corteza, en algún momento supera la resistencia de las rocas. En dicho instante se produce una ruptura que se propaga a través de un plano de falla, el que, de acuerdo con su geometría, generará diferentes tipos de movimientos (Ilustración 11.2-3). A su vez, esta ruptura conlleva una liberación de energía que se propaga por medio de ondas sísmicas.

Las ondas que transmiten la energía sísmica se agrupan en dos tipos principales: ondas de cuerpo y ondas de superficie. Las primeras se dividen en ondas P (compresivas) y ondas S (ondas de corte o de cizalle), mientras que las segundas se dividen en ondas Rayleigh y Love (Ilustración 11.2-4). En las ondas P el movimiento de partículas se produce en forma paralela al de la propagación de la onda y en las ondas S es en dirección perpendicular a la dirección de propagación de la onda. Las ondas Rayleigh tienen un movimiento oscilatorio elíptico y las ondas Love tienen un movimiento oscilatorio horizontal. Con respecto a su impacto en superficie, debido a que las ondas S transportan la mayor cantidad de energía y a que las ondas superficiales tienden a tener movimientos de mayor frecuencia, ambos tipos corresponden a los de carácter más destructivo del movimiento sísmico. Aun así, a medida que las ondas se alejan de la fuente van perdiendo o disipando energía, siendo cada vez menos destructivas, fenómeno que se conoce como atenuación.

Para medir los sismos se utilizan, principalmente, dos escalas: *magnitud* e *intensidad*. La *magnitud* es una medida única y objetiva, que normalmente se relaciona con la escala de RICHTER (M_S). Actualmente para grandes sismos se utiliza la escala de magnitud de momento (M_W) que se calcula a partir del tamaño de la zona de ruptura y el desplazamiento medido para un sismo ocurrido, y da cuenta de la energía total liberada por el evento. La *intensidad* es una medida subjetiva del impacto de un sismo sobre la población, en términos de

percepción humana del evento y sus efectos en la infraestructura. Este parámetro se mide en la escala de MERCALLI-CANCANI, denominada también como Modificada de Mercalli (M.M.).

Ilustración 11.2-3: Tipos de falla y esfuerzos asociados



Fuente: Keller y Blodgett (2004).

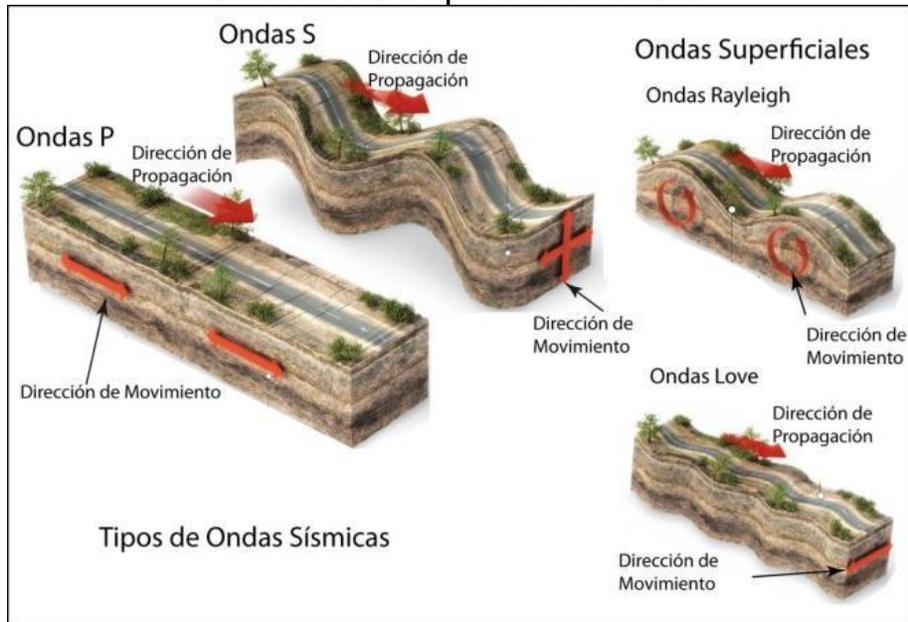
Finalmente, debe destacarse el llamado “efecto sitio”, que indica un condicionamiento de carácter local bajo el cual para un mismo terremoto y dependiendo del tipo de terreno donde uno se encuentra ubicado, las ondas sísmicas pueden amplificarse durante el desarrollo del terremoto (

Ilustración 11.2-5).

El principal efecto asociado a la ocurrencia de sismos son fuertes movimientos del terreno, que originan un peligro directo sobre las estructuras y sobre las personas, debido a las fuertes aceleraciones generadas por las ondas sísmicas. Sumado a lo anterior, la ocurrencia de estos fenómenos es generalmente sin previo aviso, por lo que la única manera de mitigar el riesgo es con campañas de educación y estrictas normas de construcción. Muchos de estos fenómenos son acompañados por asentamientos en las superficies, normalmente irregulares, dañando construcciones, infraestructura y cañerías. Esto implica en una alta vulnerabilidad estructural, económica y social. Particularmente con respecto a esta última se deben mencionar las potenciales pérdidas

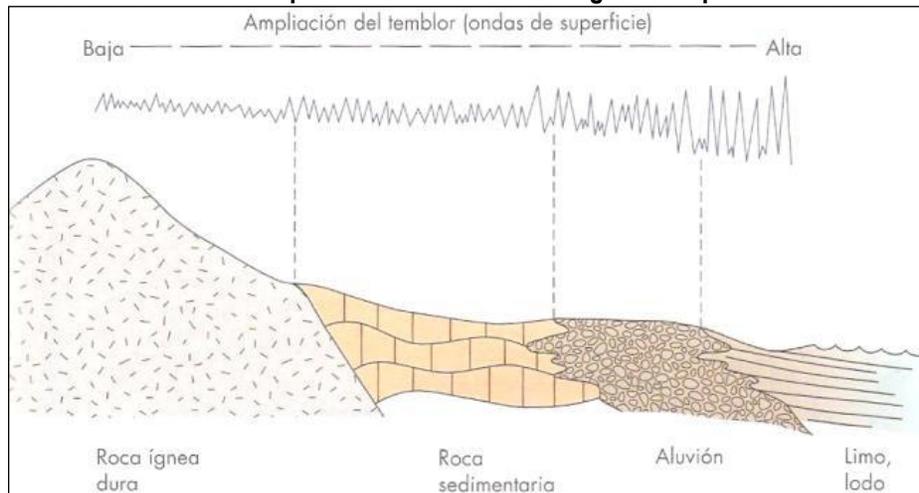
de vidas humanas y heridos por el derrumbe de estructuras, además de la vulnerabilidad a enfermedades gastrointestinales y epidemias por el colapso de los sistemas sanitarios y de conectividad, entre los innumerables efectos adversos para la sociedad que provocan este tipo de fenómenos.

Ilustración 11.2-4: Tipos de ondas sísmicas



Fuente: Modificado de Enciclopedia Britannica (2008).

Ilustración 11.2-5: Amplificación de la vibración generada por un terremoto.



Fuente: Keller y Blodgett (2004).

Más allá de los efectos directos mencionados anteriormente, los sismos pueden también inducir la ocurrencia de otros fenómenos, como es el caso de procesos de remoción en masa (caídas de bloques y deslizamientos), maremotos y licuefacción.

Los deslizamientos y derrumbes se dan en diversos tipos de suelos y bajo variadas condiciones sismotectónicas, incluso se han detectado en sismos de grado $M_w = 4.0$. La cantidad y severidad de estos están en directa relación con la cercanía al epicentro y la magnitud del evento causante Keeper (1984); Sepúlveda, et al. (2005); (2010). Sea cual sea su origen, los deslizamientos y derrumbes están asociados

principalmente a tres factores: las pendientes del terreno, la resistencia mecánica de los materiales involucrados y antecedentes de eventos anteriores (Centeno, et al. (1994); Sancho (1997)). Para más detalle acerca de estos procesos ver el Apéndice b) "Procesos de remociones en masa".

Los maremotos o tsunamis corresponden a una ola o un grupo de olas de gran energía y tamaño que se producen cuando algún fenómeno extraordinario desplaza verticalmente una gran masa de agua y en aproximadamente un 90% de los casos, estos fenómenos son provocados por terremotos. La energía de un maremoto depende de su altura (amplitud de la onda) y de su velocidad, y estará asociada a la magnitud del evento que lo generó.

Otro proceso que se asocia comúnmente a la actividad sísmica es la licuefacción del terreno, que corresponde al fenómeno donde un material sólido saturado en agua se comporta como líquido a causa de la intensa vibración. Las ondas sísmicas hacen aumentar la presión de agua presente en el sedimento, de forma que los granos de arena o limo pierden el contacto entre ellos causando una pérdida de resistencia del sólido y permitiendo que el depósito pueda fluir. Bajo estas condiciones, el suelo puede perder su capacidad de soporte de estructuras, producir deslizamientos (incluso en superficies con muy bajas pendientes) y formar volcanes de arena. Muchos de estos fenómenos son acompañados por asentamientos en las superficies, normalmente irregulares, dañando construcciones, infraestructura y cañerías.

Para la ocurrencia de licuefacción se requiere de tres factores (Martin & Lew, 1999):

- Depósitos o suelos, granulares poco consolidados (suelos y no cementados) de tamaño fino a medio (limo a arena, aunque en algunos casos se ha presentado en arcillas y en gravas). Típicamente pueden ser rellenos artificiales, especialmente aquellos creados por relleno hidráulico (ej. puertos y tranques de relaves), depósitos eólicos (dunas), depósitos de playas o de cursos de agua lo suficientemente jóvenes para estar sueltos. Los suelos con partículas de diferentes tamaños son menos propensos a sufrir licuefacción, debido a que las partículas menores tienden a rellenar los espacios entre las mayores, reduciendo así la tendencia a densificación del suelo y evitando los efectos del aumento de presión de agua. También influye la forma de las partículas que conforman el suelo, siendo un depósito de partículas redondeadas más susceptible de sufrir licuefacción.
- Saturación de los depósitos por aguas subterráneas, el agua debe rellenar los espacios entre los granos de limo o arena. Puede producirse en zonas donde el nivel de agua subterránea es somero como en desembocadura de cursos de agua, humedales, pantanos, vegas y zonas costeras.
- Fuertes movimientos sísmicos, durante los cuales las ondas sísmicas aumentan la presión del agua contenida en los depósitos. Cabe destacar, que todo Chile, en especial desde la península de Taitao al norte, tiene el potencial de ser afectado por grandes terremotos.

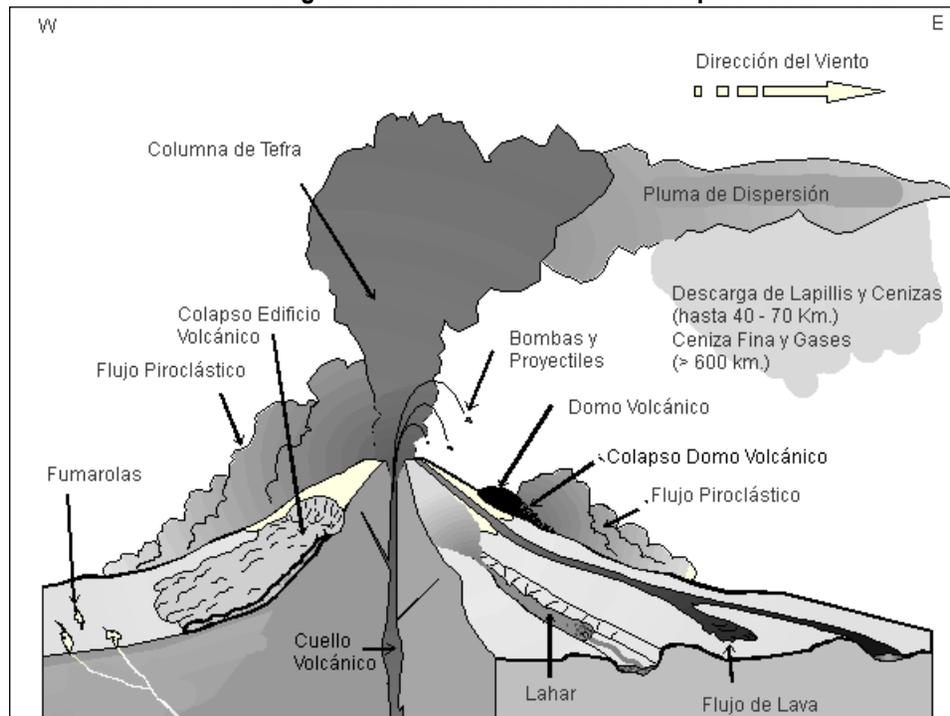
b) Volcanismo

El peligro volcánico deriva de los procesos asociados a la erupción de un volcán. En Chile el volcanismo activo se distribuye a los largos de la Cordillera de los Andes, pero de forma discontinua. En la zona entre los 18° y 27°S y aquella al sur de los 33°S se ubica el volcanismo activo, mientras que entre los 27°-33°S está ausente. Los principales peligros asociados a una erupción volcánica se resumen en la Ilustración 11.2-6 y en el Cuadro 11.2-1

La lluvia de ceniza y tefra se produce durante erupciones explosivas en las que una gran cantidad de material volcánico se inyecta en la atmósfera a gran altura, generando columnas de tefra, compuestas por piroclastos y gases. Estas columnas, ascienden velozmente alcanzando en pocos minutos alturas estratosféricas, siendo dispersadas por el viento y esparcidas las cenizas y piroclastos alrededor de una gran área. En caso de colapso de esta columna se producen flujos y oleadas piroclásticas que pueden alcanzar centenares de kilómetros, en

función de la altura de la columna de tefra (energía potencial transformada en energía cinética) y la dirección del viento, generando grandes depósitos de ceniza y piroclastos incandescentes. Adicionalmente, es común que se produzca contaminación de aguas superficiales en todo el sector afectado por la caída de cenizas, así como también de los acuíferos en los alrededores del volcán por la inyección de aguas hidrotermales, además del envenenamiento por dispersión de gases tóxicos hacia la atmósfera.

Ilustración 11.2-6: Peligros volcánicos asociados a la erupción de un volcán.



Fuente: Myers y Brantley (1995).

Los flujos de lava se producen cuando material magmático se desplaza aguas abajo del centro de emisión. El alcance que tendrán estos flujos está determinado por la tasa de efusión (emisión del centro volcánico), la pendiente del terreno sobre el cual la lava escurre y la viscosidad de la lava. Además, en las cercanías del centro de emisión se producen comúnmente temblores de magnitud inferior a 6 en la escala de Richter (M_w), pero a poca profundidad (entre 1 y 20 km), los que están asociados a intensidades mayores a VI en las cercanías del epicentro. Estos sismos provienen de diversos procesos, tales como ascenso del magma y fracturamiento de la corteza, explosiones volcánicas y esfuerzos tectónicos compresivos y expansivos asociados al ciclo eruptivo (González-Ferrán, 1995).

Los procesos de remoción en masa asociados a una erupción volcánica se pueden clasificar en tres grandes grupos: lahares, colapso parcial o total del edificio volcánico y deslizamientos de laderas (González-Ferrán, 1995). Los lahares se producen por el brusco derretimiento de hielos y nieve durante una erupción volcánica. Corresponden a una mezcla de rocas fragmentadas preexistentes en las laderas de un volcán con materiales efusivos frescos y una gran cantidad de agua. Esta mezcla desciende aguas abajo a altas velocidades y de manera turbulenta, arrasando e incorporando a su flujo todo lo que encuentra en su trayecto (árboles, casas, etc.). Reportes históricos describen que las velocidades que alcanzan estos flujos van desde los 1,3 m/s hasta los 40 m/s, recorriendo decenas de kilómetros aguas abajo del valle, y en casos en que la velocidad sea mayor a 150 Km/h pueden remontar barreras topográficas.

El colapso, total o parcial, del edificio volcánico puede producirse como consecuencia de una gran cantidad de energía liberada durante la erupción. Este proceso puede provocar tsunamis si ocurre en la cercanía de lagos o embalses, ya que puede producir el desplazamiento de volúmenes importantes de agua en pocos minutos generando olas destructivas de gran energía. Finalmente, asociado a la sismicidad producida por la erupción, pueden generarse deslizamientos de terreno en la cercanía del centro eruptivo, lo que puede dar paso a flujos de barro y/o detritos aguas abajo.

El impacto en la población y sus actividades es muy alto en las cercanías de los centros volcánicos, ya que los procesos asociados a una erupción (caída de ceniza, flujos piroclásticos, contaminación de aguas superficiales), pueden generar grandes catástrofes en la vida diaria e infraestructura de las comunidades. Los efectos más directos para la población, aunque la erupción se encuentre a distancia, son:

- Pérdida de tierras cultivables
- Colapso de techos y obras civiles
- Pérdidas de vidas humanas y forraje
- Contaminación de aguas y problemas sanitarios derivados.

Se debe destacar que, la duración de una catástrofe por actividad volcánica puede ser considerable dado que un ciclo eruptivo puede extenderse por meses o años (por ejemplo, el ciclo eruptivo del volcán Chaitén), y pueden afectar grandes áreas de terreno, como por ejemplo la erupción del volcán Quizapú en el año 1932, cuya pluma de ceniza alcanzó la ciudad de Johannesburgo, Sudáfrica o la erupción del Complejo Volcánico Puyehue-Cordón Caulle, cuya pluma de ceniza dio la vuelta al mundo.

Cuadro 11.2-1: Peligros asociados al volcanismo.

Peligro	Factores de Peligro	Tipo de Daño	Alcance	Condicionantes
Lluvia de Tefra y Proyectiles Balísticos	Proyección de Bombas y Escorias Incandescentes	Daños por impacto, incendios.	Alrededores del volcán (<10 km)	Tamaño de proyectiles. Mayor tamaño, menor alcance; menor tamaño, mayor alcance
	Caída de Piroclastos y Dispersión de Cenizas	Recubrimiento de cenizas, colapso de estructuras, daños a la agricultura, daños a instalaciones industriales y viviendas, problemas de tráfico aéreo, falta de visibilidad, contaminación de aguas.	Centenares de kilómetros	Dirección del viento
	Flujos y Oleadas Piroclásticas	Daños a estructuras, incendios, recubrimiento por cenizas.	Decenas a centenares de kilómetros*	Dirección del viento y hacia donde colapsa la columna de tefra
	Gases	Envenenamiento, contaminación aire y agua.	Decenas a centenares de kilómetros	Dirección del viento y hacia donde colapsa la columna de tefra
	Inyección de Aerosoles a la Estratósfera	Impacto en el clima, efecto a largo plazo y/o a distancia.		Dirección del viento
Lavas y Edificio Volcánico	Lavas y Domos	Daño a estructuras, incendios, recubrimiento por lavas.	Alrededores del volcán (<10 km)	
	Deformación del Terreno	Fallas, daños a estructuras.	Alrededores del volcán (<10 km), puede ser de cientos de kilómetros	
	Terremotos y Temblores Volcánicos	Colapso del edificio volcánico, remociones en masa, daños a estructuras.	Alrededores del volcán (<10 km), puede ser de cientos de kilómetros	Geomorfología
Remociones en masa	Lahares	Daños a estructuras, arrastres de materiales, recubrimiento por barros.	Decenas a centenares de kilómetros	Red de drenaje
	Colapso Parcial o Total del Edificio volcánico	Daños estructuras, recubrimiento por detritos, avalanchas, tsunami inducido.	Alrededores del volcán (<10 km), puede ser de cientos de kilómetros	Geomorfología y cuerpos de agua cercanos
	Deslizamiento de Laderas	Arrastre de materiales, recubrimiento por detritos, daños a estructuras.	Alrededores del volcán (<10 km), puede ser de cientos de kilómetros	Geomorfología y cuerpos de agua cercanos
Otros	Ondas de Choque	Rotura de cristales y paneles.	Decenas de kilómetros	Dirección del viento y geomorfología
	Variaciones en el Sistema Geotérmico de Acuíferos	Cambios de temperatura y calidad del agua.	Alrededores del volcán (<10 km), puede ser de cientos de kilómetros	Red de drenaje

Fuente: Elaboración propia a partir de González-Ferrán (1995), Myers y Brantley (1995) y Sruoga (2002). (*) El peligro de Flujos y Oleadas Piroclásticas, si bien presenta un alcance de hasta centenares de kilómetros, este se restringe únicamente a las hoyas hidrográficas que drenan cada aparato volcánico.

11.2.2 Procesos externos o exógenos de la Tierra

a) Inundaciones terrestres y litorales

Las inundaciones, sin considerar aquellas generadas por causas antrópicas, pueden ser de dos tipos (Ilustración 11.2-7): (1) terrestres, en el sentido de “tierra adentro”, en las que aguas dulces anegan territorios al interior de los continentes, y (2) litorales o costeras, en las que aguas marinas o lacustres-palustres invaden los sectores limítrofes con el dominio terrestre. Los procesos de inundación pueden originarse por varios factores, tales como lluvias intensas durante temporales, pero también pueden originarse por colapso o desbordamiento de represas y canales, marejadas en zonas costeras, o como afloramiento de aguas subterráneas en zonas pantanosas.

Cabe notar que existe una estrecha relación entre los fenómenos pluviométricos estacionales y los fenómenos de avalanchas, rodados, aluviones o erosiones. Los últimos se ven acentuados por el aumento de la capacidad de arrastre de material, por inundación y por desborde de cauces, todos ellos asociados a la activación de quebradas por lluvias ocasionales y que ponen en riesgo a la población en los alrededores.

A continuación, se presenta una breve descripción de los distintos tipos de inundaciones.

i) Inundaciones por desborde de cauces

Como su nombre lo indica, estos tipos de fenómenos ocurren cuando ríos o esteros desbordan su cauce natural anegando las terrazas fluviales laterales o adyacentes, debido a la ocurrencia de caudales extremos. Estos fenómenos se producen generalmente debido a eventos de precipitaciones líquidas intensas y/o prolongadas en el tiempo. Los valores que pueden alcanzar los caudales, así como el tamaño del cauce, dependen también de otros factores como del área de la cuenca correspondiente, su forma, la diferencia de cota, la presencia de rocas o sedimentos permeables, etc.

Para este tipo de inundaciones, se pueden identificar dos tipos principales de cauces:

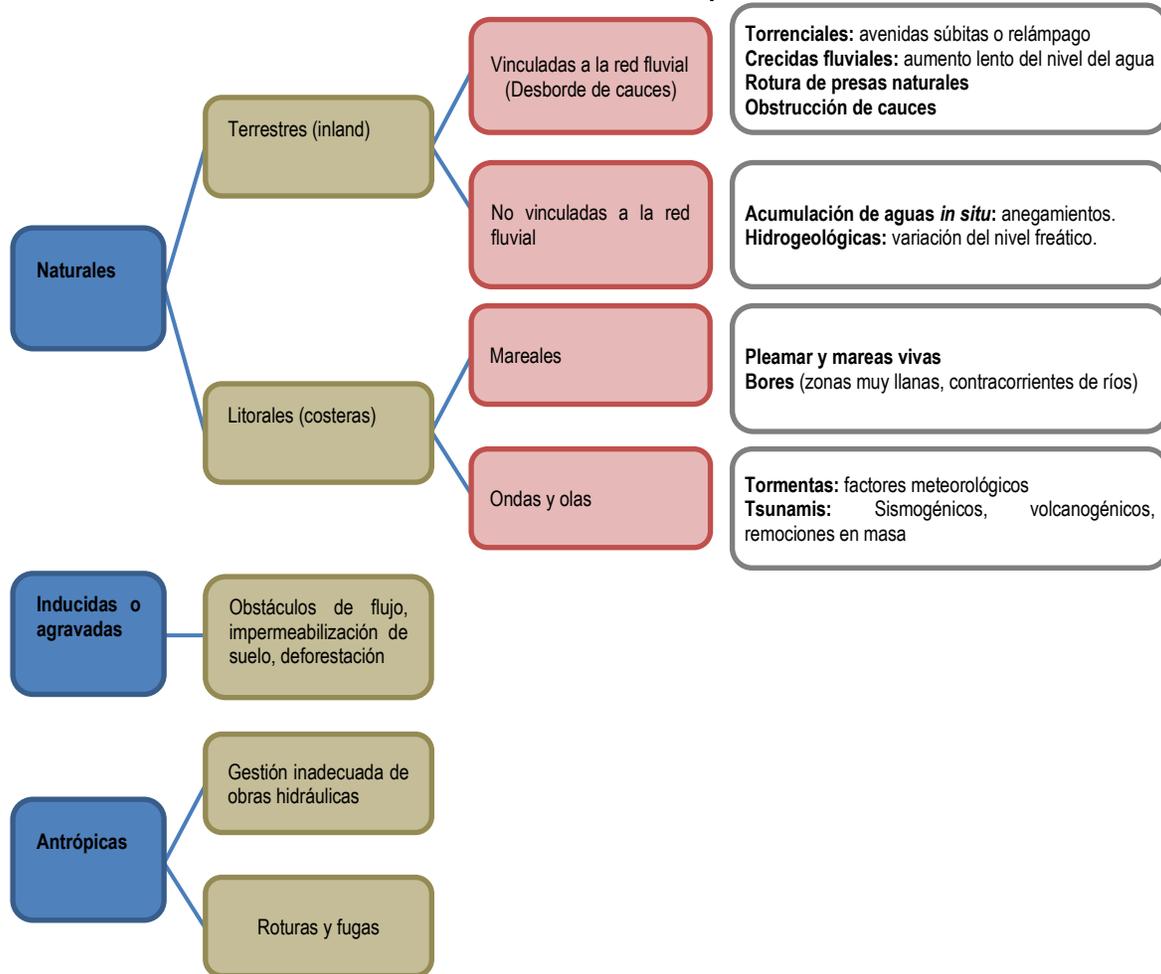
- Perennes: ríos o esteros con cuencas que abarcan grandes áreas y que tienen sus cabeceras en zonas cordilleranas. Aunque no presenten necesariamente una escorrentía superficial continua, se consideran como perennes dado que la mayoría del flujo escurre en el acuífero ubicado bajo la superficie. Estos presentan cauces de gran extensión, bien definidos, con diferentes niveles de terrazas fluviales, y fácilmente identificables a partir del análisis estereoscópico de fotos aéreas. Las terrazas más altas generalmente están ocupadas por actividades agrícolas o asentamientos humanos.
- Intermitentes: Esteros y quebradas de escurrimiento temporal como consecuencia directa de precipitaciones intensas. En general, algunas de estas quebradas pueden presentar amenaza por fenómenos de remociones en masa del tipo flujos de detritos, existiendo una estrecha relación entre estos fenómenos e inundaciones por escorrentía torrencial de gran velocidad. Como se explicará posteriormente, los flujos de detritos, al perder su carga sólida, van transformándose paulatinamente en inundaciones torrenciales. Normalmente no existen estaciones fluviométricas en estos cauces, por lo que la estimación de caudales máximos se debe hacer con modelos matemáticos y estadísticas de precipitaciones máximas de gran intensidad.

Los efectos que se pueden generar como consecuencia de una inundación estarán dados por varios factores. Naturalmente, los efectos dependen de la intensidad de la inundación, sin embargo, se deben diferenciar los efectos sobre los edificios, que se correlacionan mejor con la altura de inundación, de la afectación a la infraestructura vial, que se correlaciona mejor con la velocidad de escurrimiento (Kreibich, y otros, 2009), aunque, se debe tener en consideración que existe una buena correlación entre ambas variables. Por otra parte,

existen otras variables que inciden en el nivel de daño que generan las inundaciones (Merz, Kreibich, & Lall, 2013; Hasanzadeh Nafari, Ngo, & Mendis, 2016):

- Superficie de las construcciones (que se correlaciona con la densidad de población y con el nivel socioeconómico de los habitantes), valor de las propiedades y calidad de la construcción.
- Medidas preventivas, asociadas a la construcción.

Ilustración 11.2-7: Clasificación de los tipos de inundación.



Fuente: Modificado de Diez Herrero et al. (2008).

ii) Inundación por acumulación de aguas lluvia en zonas llanas o anegamiento

Este tipo de inundaciones se producen en zonas deprimidas, de baja permeabilidad, con niveles freáticos someros y deficiente drenaje del terreno, frecuentemente inundadas debido a lluvias intensas y/o prolongadas. Este tipo de inundaciones se asocia a la zona de desembocadura de algunas quebradas, las que son “embalsadas” por caminos y obstrucciones antrópicas. Estas barreras no permiten que el río escurra fácilmente hacia el mar, sino solo de forma subterránea, provocando el ascenso de los niveles freáticos y la formación de zonas pantanosas y humedales. Solo en eventos de pluviosidades extremas, el caudal transportado por las

quebradas tiene la suficiente fuerza para romper esta barrera, atravesándola y provocando inundaciones por desborde de cauces.

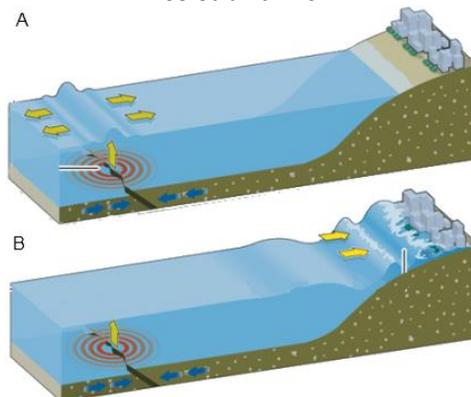
En las zonas urbanas consolidadas, las acumulaciones de aguas lluvia ocurren especialmente en cruces viales, donde la evacuación de las aguas lluvias es insuficiente, ya sea por el colapso de los sistemas de colección, acumulación de basuras que obstruyen los desagües, la no existencia de redes de evacuación y vialidad pavimentada, por la diferencia de nivel de las carpetas de rodado en las intersecciones de las calles existentes, o por diseñar las obras de mitigación para un período de retorno no adecuado.

iii) Inundaciones costeras asociadas a maremotos

Los tsunamis o maremotos corresponden a una ola o un grupo de olas de gran energía y tamaño que se producen cuando algún fenómeno extraordinario desplaza verticalmente una gran masa de agua. Se conocen tres orígenes posibles:

Maremotos generados producto de un sismo mayor: durante un terremoto se genera una rápida elevación o hundimiento del fondo marino, provocando un gran movimiento vertical de agua que es propagado en forma de olas que se alejan radialmente desde la zona de ruptura, movimiento que puede considerarse lineal (Ilustración 11.2-8). A diferencia de las olas generadas por el viento, en las cuales las partículas tienen un movimiento circular ondulante, las olas generadas por un maremoto fluyen en línea recta hacia adelante (Ilustración 11.2-9).

Ilustración 11.2-8: Mecanismo de formación de un maremoto asociado a un terremoto cuyo epicentro es submarino.

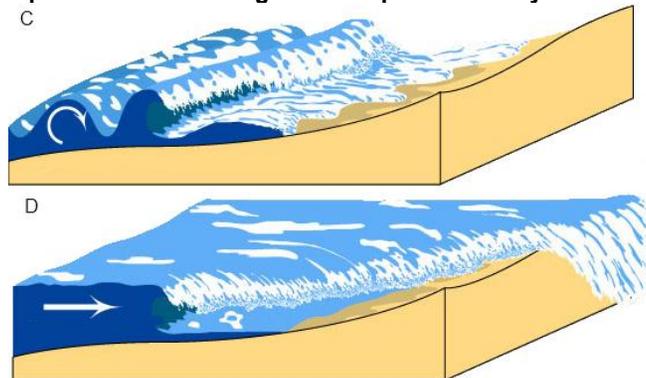


Fuente: Modificado de Keller y Blodgett (2004).

NOTAS: A. Sismo genera un pulso vertical que mueve las aguas superficiales.

B. Corresponde al momento en que arriba la onda a la costa.

Ilustración 11.2-9: Comparación entre olas generadas por el viento y frente de olas de un maremoto.

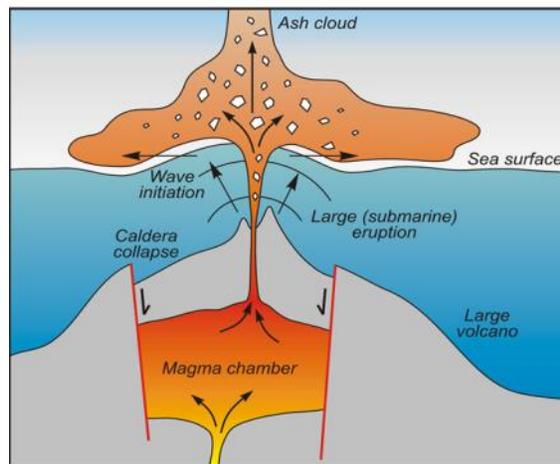


Fuente: Modificado de Department of Earth and Space Sciences. University of Washington, en <http://www.ess.washington.edu/tsunami/images/tsulg.jpg>.

Se pueden definir dos tipos de maremotos: (1) los de “origen cercano”, donde la población siente el terremoto que generará el maremoto, y (2) los de “origen lejano”, donde la población no es alertada por un movimiento sísmico previo al arribo del maremoto. Se debe recalcar que, aun cuando los maremotos están generalmente relacionados a sismos de magnitud mayor a 8.0° con un epicentro bajo la superficie marina ésta no es la única forma de generación de este tipo de fenómenos.

Maremotos generados por erupción volcánica submarina: Se producen por erupciones volcánicas submarinas, las que generan un pulso de agua vertical que es disipado en forma de olas (Ilustración 11.2-10). Cómo la generación es puntual, la energía liberada es menor a la generada por sismos.

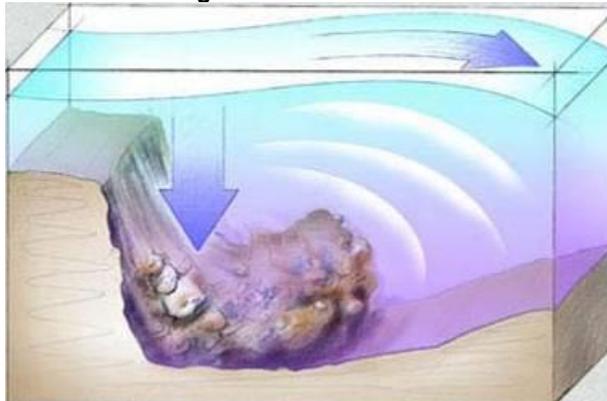
Ilustración 11.2-10: Mecanismo de generación de maremotos por erupciones volcánicas submarinas.



Fuente: Tomado de Natural Resources of Canadá, de http://atlas.nrcan.gc.ca/auth/english/maps/environment/naturalhazards/tsunami/fig4_tsunami_volcano_eruption.jpg

Maremotos generados por deslizamientos: Corresponden a deslizamientos submarinos o superficiales, que generan perturbaciones en el nivel del mar o en lagos (Ilustración 11.2-11). Ejemplos de este tipo se han registrado en el fiordo de Aysén asociado al ciclo sísmico desarrollado durante abril de 2007 (Sepúlveda & Serey, 2009).

Ilustración 11.2-11: Mecanismo de generación de maremotos asociados a deslizamientos.



Fuente: Tomado de Universidad de Santa Cruz, California. <http://scicom.ucsc.edu/scinotes/9901/kill/images/slidesfinal.jpg>

La propagación del frente de ondas del maremoto se produce superficial y concéntricamente, similar al efecto en la superficie de un estanque de agua al lanzar una piedra. En aguas abiertas, la altura de la ola es casi imperceptible (menores a un metro) y se desplaza a velocidades que llegan a los 800 km/h, pero esta velocidad disminuye a menos de 60 km/h al acercarse las olas al continente transformando así la energía cinética (velocidad) en energía potencial (altura de ola). La altura máxima de la ola (medido sobre el nivel medio del mar) y su penetración en el continente estará condicionada por la distancia al epicentro del terremoto, así como también por la morfología, pendiente y profundidad del fondo marino, pudiendo alcanzar hasta 30 metros de elevación sobre el nivel del mar en el continente.

Aun cuando la mayoría de los maremotos son generados por sismos, su impacto e intensidad están determinados en primer lugar por la topografía submarina del sitio donde se produce el sismo (por ejemplo, profundidad y consistencia del suelo marino). De esta forma, según los estudios científicos, se sabe que ante un temblor de epicentro poco profundo y cuya intensidad sea inferior a los 6.4 grados en la escala de Richter, existen pocas probabilidades de que se genere un maremoto. Aquellos con magnitudes superiores a los 7.5 grados son los principales causantes de maremotos de alto riesgo.

Dadas estas características, es preciso señalar que los maremotos son muy frecuentes en el Océano Pacífico, pues el margen de su cuenca oceánica alberga en conjunto una de las zonas con mayor actividad sísmica en el planeta: el Cinturón de Fuego del Pacífico. Basta decir que, por ejemplo, entre los años de 1900 y 1986, fueron registrados en esta cuenca 247 maremotos de los cuales 29% incidieron en las costas japonesas.

Se han definido diversas escalas para medir la magnitud e intensidad de los maremotos. Una de las más conocidas es la escala Inamura (1942, 1949) que en función de la altura de las olas y los daños que estas producen en la costa clasifica el impacto y la intensidad de estos fenómenos, de manera similar a la medición de la Escala de Mercalli de los eventos sísmicos (Cuadro 11.2-2).

Cuadro 11.2-2: Escala de grados de maremotos, según Inamura

Grado de maremotos m	Altura de la ola H (en metros)	Descripción de los daños
0	1-2	No produce daños.
1	2-5	Casas inundadas y botes destruidos son arrastrados.
2	5-10	Hombres, barcos y casas son barridos.
3	10-20	Daños extendidos a lo largo de 400km de la costa.
4	>30	Daños extendidos sobre más de 500km a lo largo de la línea costera.

Fuente: Inamura (1942, 1949).

Posteriormente, Iida (1963) relacionó la energía liberada por un terremoto con la energía del maremoto asociado, estimando el desplazamiento vertical de agua de este último (Cuadro 11.2-3). Esta metodología en, en términos generales, análoga a la escala de Richter (que mide la magnitud del sismo) con la energía del maremoto. Por último, Wiegel (1970) combinó las escalas de Inamura e Iida con lo cual logró identificar y diferenciar con mayor claridad la magnitud de un maremoto (

Cuadro 11.2-4).

Los parámetros considerados por Wiegel (1970) son los siguientes (

Ilustración 11.2-12): la altura de la ola (H) como la diferencia de nivel entre la cresta y el valle; altura máxima de inundación (R), corresponde al lugar de la costa donde los efectos del maremoto son mayores.

Cuadro 11.2-3: Escala de grados de maremotos según lida

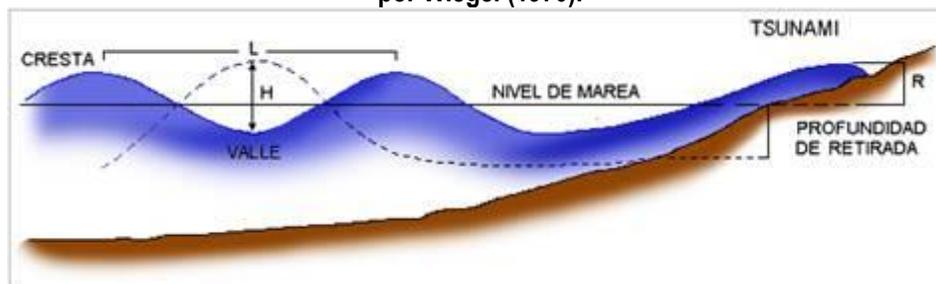
Grado de maremoto m	Energía (Erg) x 10 ²³	Máxima altura de inundación R (metros)
5.0	25.6	> 32
4.5	12.8	24 - 32
4.0	6.4	16 - 24
3.5	3.2	12 - 16
3.0	1.6	8 - 12
2.5	0.8	6 - 8
2.0	0.4	4 - 6
1.5	0.2	3 - 4
1.0	0.1	2 - 3
0.5	0.05	1.5 - 2
0.0	0.025	1 - 1.5
-0.5	0.0125	0.75 - 1
-1.0	0.006	0.50 - 0.75
-1.5	0.003	0.30 - 0.50
-2.0	0.0015	< 0.30

Fuente: lida (1963).

Cuadro 11.2-4: Escala de grados de maremoto según Inamura e lida, transcrita por Wiegel

Grado maremoto m	Altura de la ola H (metros)	Altura máxima de inundación R (metros)	Descripción de los daños.
0	1 - 2	1 - 1.15	No produce daños.
1	2 - 5	2 - 3	Casas inundadas y botes destruidos son arrastrados.
2	5 - 10	4 - 6	Hombres, barcos y casas son barridos.
3	10 - 20	8 - 12	Daños extendidos a lo largo de 400km de la costa.
4	> 30	16 - 24	Daños extendidos sobre más de 500km a lo largo de la línea costera.

Fuente: Wiegel (1970)

Ilustración 11.2-12: Elementos básicos considerados en la escala de magnitud Inamura-lida, definida por Wiegel (1970).

Fuente: Modificado de Wiegel (1970)

En resumen, los efectos de un maremoto a lo largo de una línea costera dependerán de la magnitud del sismo o manifestación que lo origina, la topografía del suelo marino a lo largo y ancho de la zona de propagación del maremoto (existencia de arrecifes, malecones, etc.), la distancia de la costa al epicentro, y la orientación y forma de la bahía afectada respecto al epicentro. Existen relaciones directas entre la magnitud del sismo y del maremoto: a mayor magnitud del sismo, mayor el tamaño de la ola. Sin embargo, de acuerdo con la morfología de la costa, la extensión de la inundación puede crecer o verse disminuida, variar en los tiempos de llegada a puerto, o simplemente perder energía y afectar a la costa con menor intensidad.

El daño en el continente será proporcional a población que habita y a la infraestructura presente en la zona afectada, y puede verse amplificado en aquellas zonas de la costa que actúan como concentradoras de la energía de maremotos, esto es, aquellos sectores con líneas de costa que presenten cañones submarinos como la desembocadura de los grandes ríos hacia el mar y en bahías.

- Tiempo de Aviso: Lamentablemente, el daño a la infraestructura es inevitable, pero puede salvarse una cantidad considerable de vidas si de alerta adecuadamente a la población.
- Maremoto de origen cercano: es de aproximadamente 15 minutos a una hora si el sismo fue percibido por la población, la que debe dirigirse hacia los sectores altos inmediatamente después de ocurrido el terremoto.
- Maremoto de origen lejano: el tiempo de aviso puede ser nulo si no se activa una alerta de maremoto de origen lejano, como el ejemplo presentado de la Península de Kamchatka o los eventos ocurridos en el océano Índico durante el 2004.
- La distancia al origen del maremoto, así como la morfología, pendiente y profundidad del fondo marino. En este sentido, científicos japoneses han determinado que a menor pendiente de la ola (relación entre altura y longitud de onda), mayor será la altura máxima de inundación. Por ello, una costa que presente una plataforma continental escalonada (como si fuera una gran escalera), reduce la energía cinética del maremoto y con ello sus potenciales riesgos; mientras que una línea costera con una plataforma continental de pendiente suave permite que la energía del maremoto sea recibida en su totalidad.
- El daño será proporcional a la población y la infraestructura presente en la zona afectada y puede verse amplificado en aquellas zonas de la costa que actúan como concentradoras de la energía de maremotos, esto es, aquellos sectores con líneas de costa que presenten cañones submarinos, como la desembocadura de los grandes ríos hacia el mar y en bahías.

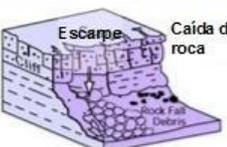
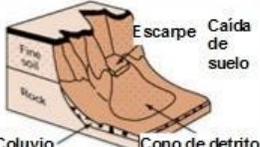
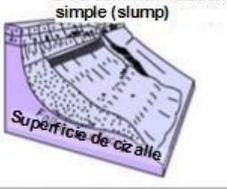
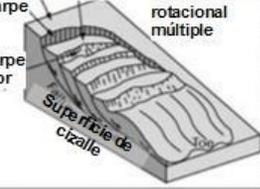
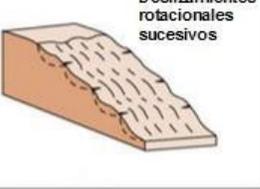
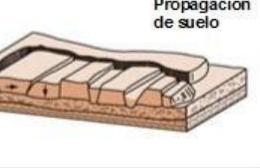
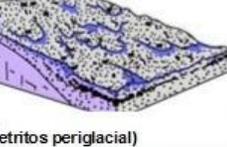
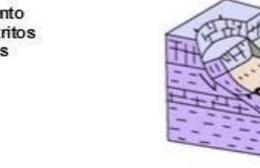
El grado de daño producido por una inundación, dependerá de varios factores:

- Tiempo de aviso: Los sistemas de emergencia y aviso a la población disminuyen considerablemente la vulnerabilidad social. Por lo demás, en general los procesos de inundación son paulatinos y permiten evacuar a la población.
- La intensidad y velocidad con que ocurre el fenómeno
- Densidad de población: En caso de que la población se encuentre directamente en la zona de inundación, pueden ocurrir muertes, heridos, enfermedades, daños estructurales, etc. Si la inundación no afecta directamente a la población, puede producir cortes de camino, daños a la infraestructura sanitaria (por ejemplo, destruir captaciones de agua para el consumo humano) o un costo económico en reparaciones y medidas de mitigación.

b) Procesos de remociones en masa

El término “remoción en masa” incluye una amplia variedad de procesos que generan el movimiento aguas abajo de los materiales que constituyen las laderas, incluyendo roca, suelo, relleno artificial o una combinación de las anteriores (Ilustración 11.2-13). El movimiento de estos materiales puede ser por caída, volcamiento, deslizamiento, propagación lateral o flujo (PMA-GCA, 2007).

Ilustración 11.2-13: Clasificación de tipos de remociones en masa con relación al movimiento que lo origina y el tipo de material constituyente de la dadera.

Material		ROCA	DETRITO	SUELO
Tipo de movimiento				
CAIDA		 Caída de roca	 Caída de detritos Guijarros Cono de detrito	 Escarpe Caída de suelo Coluvio Cono de detrito
	VOLCAMIENTO	 Volcamiento de roca	 Volcamiento de detrito Cono de detrito	 Fracturas Volcamiento de tierra Cono de detrito
DESPLAZAMIENTO	Rotacional	 Deslizamiento rotacional simple (slump) Superficie de cizalle	 Cima Cabeza Escarpe Escarpe menor Superficie de cizalle Deslizamiento rotacional múltiple	 Deslizamientos rotacionales sucesivos
	Traslacional (planar)	 Deslizamiento de roca	 Deslizamiento de detrito	 Deslizamiento de suelo
PROPAGACION	 Estructura subhorizontal normal Cobertura de roca Limolita arcillosa Adelgazamiento de estratos Sustrato competente Quebradas Estructura inclinada		 Levantamiento del valle (arassado por erosión)	 Propagación de suelo
FLUJO	 Solifluxión (Flujo de detritos periglacial)	 Flujo de detritos		 Flujo de suelo (flujo de barro)
COMPLEJO	 p.ej.: Deslizamiento de suelo con detritos de caída de rocas		 p.ej.: Deslizamiento rotacional/traslacional compuesto, gradando a flujo de suelo hacia el pie	

Fuente: Clasificación utilizada por el British Geological Service, modificada de (Varnes, 1978) y (Cruden & Varnes, 1996). Disponible en: http://www.bgs.ac.uk/landslides/how_does_BGS_classify_landslides.html

i) Flujos de detritos y barro

Los flujos de detritos, referidos comúnmente como 'aluviones', son remociones en masa que ocurren cuando una masa de sedimentos con mala clasificación, agitados y saturados con agua, se movilizan pendiente abajo

como flujos viscosos de sedimentos concentrados (Antinao, Fernández, Naranjo, & Villarroel, 2002). Los flujos de detritos usualmente son descritos como fluidos no-newtonianos o plásticos de Bingham, donde la fracción sólida varía generalmente entre 50 a 90% en volumen (Costa, 1984). En los casos en que la granulometría del material transportado sea predominantemente fina estos flujos se conocen como flujos de barro.

Las partículas sueltas que cubren pendientes desnudas y otros depósitos detríticos no consolidados, disponibles dentro de la cuenca de recepción, son transportadas hacia el cauce principal donde continúa su movimiento. Se remueven así depósitos de gravas y arenas sueltas del lecho, hasta alcanzar el área de depositación, que corresponde al sitio de salida de dichas quebradas a zonas más llanas donde se forman abanicos aluviales. Con la disminución de la pendiente, a medida que aumenta la distancia desde su fuente, los flujos van perdiendo su carga sólida de mayor granulometría, por lo que van pasando paulatinamente a flujos de barro y finalmente a inundaciones o flujos hiperconcentrados donde la fracción sólida varía generalmente entre 1 a 25% en volumen (Pierson & Scott, 1985).

Para la ocurrencia de flujos de detritos es necesario que exista una cuenca donde se colecten los aportes de lluvia y una zona de acumulación de material donde los detritos se acopien para ser posteriormente transportados en el caso de que se cumpla alguna condición desencadenante.

En Chile, el factor desencadenante más común de flujos de detritos son las lluvias esporádicas, de corta duración y de intensidad excepcional. Por otro lado, en nuestro país existen muy pocos estudios que relacionen las intensidades de precipitaciones y este tipo de fenómenos, debido, principalmente, a los escasos registros de intensidad de precipitaciones y de flujos de detritos históricos. Solo durante las últimas décadas se han instalados pluviógrafos que miden la intensidad instantánea u horaria de precipitaciones (mm por hora). Solo se disponen de registros más sostenidos en el tiempo de precipitaciones diarias (mm en 24 horas). Esto dificulta los análisis de relación a estas variables ya que a veces basta una lluvia “corta” pero extremadamente intensa para generar un flujo de detritos.

Los flujos o “aluviones” del 18 de junio de 1991 en Antofagasta y del 3 de mayo de 1993 en la Quebrada de Macul en Santiago Oriente son ejemplos de eventos que han suscitado el interés nacional tanto por el alto grado de daños materiales como el costo de vidas humanas. Estos eventos han sido, por otra parte, un aporte para el conocimiento de los umbrales de intensidad de precipitaciones mínimas para la generación de flujos de detritos en Chile. En el caso de Antofagasta, en una de las zonas más secas del país, se estimaron precipitaciones mínimas de 30 mm en 24 horas para la generación de flujos de detritos (Hauser, 1997). En el caso de Santiago Oriente, se contó con datos pluviográficos más precisos, donde se registraron casi 10 mm en una sola hora (Naranjo & Varela, 1996). Anteriormente, para la Región Metropolitana se estimó un mínimo de 60 mm en 24 horas para la generación de flujos de detritos (Hauser, 1985).

Si bien los casos anteriores se encuentran fuera del área de estudio, cabe destacar que corresponden a los pocos eventos donde se ha relacionado cuantitativamente la ocurrencia de estos fenómenos y la intensidad de precipitaciones. Sin embargo, estos constituyen datos valiosos en cuanto a los umbrales de intensidad de precipitaciones en las que se podrían generar flujos de características catastróficas.

El grado de daño producido por un flujo dependerá de varios factores:

- Tiempo de aviso: Los sistemas de emergencia y alerta a la población disminuyen considerablemente la vulnerabilidad social. Si se tienen mediciones continuas de la intensidad de precipitación, será posible alertar a la población de que existe la posibilidad de que se genere un flujo, entregando quizás minutos valiosos que podrían salvar vidas.
- Distancia al origen del fenómeno: Mientras más alejado sea el origen, y si se cuenta con sistemas de emergencia y alerta a la población, se puede disminuir la vulnerabilidad social.

- La intensidad y velocidad con que ocurre el fenómeno (tamaño del flujo): Un flujo de mayor tamaño y rápido tiene mayor capacidad de afectar a una población que uno más pequeño y lento.
- Densidad de población en la zona susceptible a ser afectada: En caso de que la población se encuentre directamente en el cauce del flujo, los daños pueden ser catastróficos, ya que pueden producirse muertes, heridos, enfermedades, daños estructurales mayores, etc., tal como ocurrió en los casos de Antofagasta (1991) y Quebrada de Macul (1993). Si el cauce no afecta directamente a la población, pueden producirse cortes de caminos y daños a la infraestructura sanitaria (por ejemplo, destrucción de captaciones de agua para el consumo humano), lo que se traduce en un costo económico en reparaciones y medidas de mitigación.

Este peligro geológico será tratado en conjunto con el peligro de inundación por desborde de cauce, ya que estos dos fenómenos comparten una serie de características comunes que permiten estudiarlos como un mismo proceso.

ii) Desprendimientos o caídas de rocas

Los desprendimientos o caída de rocas son remociones en masa en las cuales bloques de rocas o suelo se desprenden a partir de laderas de altas pendientes, como cornisas o acantilados rocosos, para luego desplazarse en caída libre, al menos en parte de su trayectoria (Hauser, 2000). Estos ocurren cuando existe una discontinuidad en la roca (por ejemplo, fracturas, planos de estratificación u otras estructuras propias de las características de la roca) cuya inclinación es superior a su ángulo de fricción interna, con proyección libre a la cara del talud. Entre las zonas susceptibles a sufrir desprendimientos o caídas de rocas destacan los flancos de quebradas profundas, labradas en secuencias estratificadas con niveles más duros hacia el techo, expuestas a erosión fluvial, o acantilados costeros expuestos a erosión marina.

La gravedad es el principal motor del peligro de caída de rocas. Como este es un proceso gravitacional depende de leyes de fricción y es, por consiguiente, caótico. Dentro de los factores desencadenantes destacan los grandes sismos que pueden generar numerosos desprendimientos a partir de laderas con fuerte inclinación y con condiciones geológicas y estructurales favorables.

La caída de bloques o desprendimientos puede producir una serie de efectos en personas, desde contusiones menores hasta la muerte, dependiendo del tamaño del bloque y la fuerza con que este cae. En el caso de estructuras, por lo general los daños son casi nulos, pero puede producirse la rotura de vidrios o daños a muros en función del tamaño del bloque y la distancia recorrida por este. Además, al caer un bloque en el camino puede producirse un accidente debido a maniobras de conducción para evitarlo.

En general, este peligro presenta una vulnerabilidad social, económica y estructural menor que otros peligros geológicos. Además, afecta a escala local, pero tiene una mayor incidencia debido a que su recurrencia es alta. En este peligro, el tiempo de aviso es mínimo, pero se puede mitigar indicando que la zona es susceptible a ser afectada por caída de bloques.

iii) Deslizamientos

Los deslizamientos son remociones en masa en las cuales las masas de suelo o roca se deslizan principalmente a lo largo de superficies de ruptura, al superarse la resistencia al corte, generando el movimiento del material en su conjunto (Hauser, 2000). Los volúmenes incluidos en estas remociones varían desde algunas decenas hasta varios millones de metros cúbicos y pueden adquirir magnitud catastrófica.

Estos fenómenos pueden ocurrir de varias formas dependiendo de las propiedades del material y las características geológicas y geomorfológicas del entorno, siendo principalmente divididos en rotacionales y

traslacionales (Ilustración 11.2-14). Esto implica que las superficies de ruptura son ya sea curvas y cóncavas o a lo largo de un plano o superficie ondulada, respectivamente.

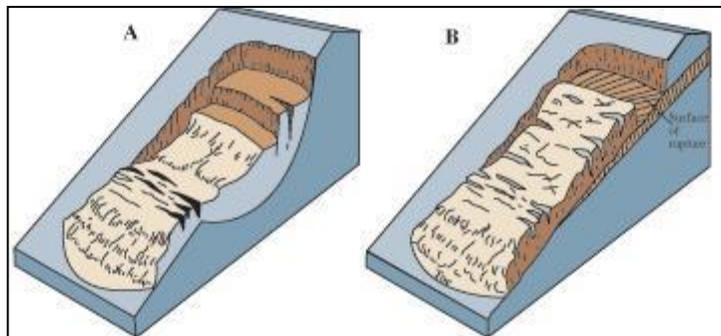
Adicionalmente, los deslizamientos que ocurren en escarpes de terrazas fluviales producto de la erosión fluvial, o el retroceso de acantilados costeros por erosión marina basal, se les denomina como “Retroceso de laderas”, que corresponde a la retirada del escarpe en dirección aguas arriba, sin que esta sufra cambios en sus rasgos geométricos, es decir, con posterioridad al movimiento de material, la forma del escarpe permanece constante (Pain, 1986).

Los factores condicionantes de un deslizamiento corresponden principalmente a: los factores intrínsecos del suelo y la roca, las características geológicas (litología, estructuras, grado de alteración y meteorización, etc.), los factores geomorfológicos (pendiente, aspecto, curvatura, elevación, entre otros), la cantidad y tipo de vegetación y el grado de humedad y posición del agua subterránea.

Por otro lado, estos fenómenos pueden ser generados por factores externos, denominados factores desencadenantes o gatillantes, tales como eventos hidrometeorológicos, sísmicos y actividad antrópica (excavaciones para caminos, canales, terraplenes, etc.).

Los daños en el medio antrópico producto de un deslizamiento que afecta a un área determinada, estarán dados por el volumen de material desplazado durante el proceso y la velocidad con la que se produce el deslizamiento.

Ilustración 11.2-14: Ejemplos de deslizamientos. A Deslizamiento rotacional. B Deslizamiento traslacional.



Fuente: Modificado de Landslide Types and Process, USGS. Fact Sheet 2004-3072. Disponible en: <http://pubs.usgs.gov/fs/2004/3072/images/fig3grouping-2LG.jpg>

El grado en que un deslizamiento afecta a la población depende de:

- Distancia al origen del fenómeno: Por lo general, los deslizamientos son procesos que afectan un área limitada (radios menores a 1 km., incluso menores a 500 m). Hay que considerar que este punto depende directamente del tamaño de volumen desplazado.
- La intensidad y velocidad con que ocurre el fenómeno: En general, dado que estos procesos son de alta velocidad los daños potenciales son altos.
- Densidad de población: A mayor densidad de población y área expuesta susceptible de ser afectada, mayores serán los daños esperados. Si la población se encuentra directamente en el área de alcance de un deslizamiento, la vulnerabilidad, estructural y económica es muy alta ya que la pérdida de vidas, viviendas y productividad son efectos típicos de este peligro geológico. Por otro lado, si un deslizamiento afecta a caminos, acueductos o líneas eléctricas puede producir aislamiento, enfermedades gastrointestinales y pérdidas económicas en general para la población.
- Tiempo de aviso: Sin estudios de detalle no hay forma de predecir este tipo de procesos. Si se realizan estudios específicos, es posible conocer el o los factores gatillantes de las remociones en masa en un

área determinada. Si estos factores gatillantes pueden ser monitoreados, es posible generar sistemas de alerta. Por ejemplo, si el factor gatillante son las precipitaciones sobre un cierto nivel umbral de intensidad, es posible generar sistemas de alerta que se activen cuando se sobrepasa dicho umbral.

11.3 METODOLOGÍAS CONSIDERADAS PARA EL ANÁLISIS DE LA SUSCEPTIBILIDAD DE INUNDACIONES Y REMOCIONES EN MASA

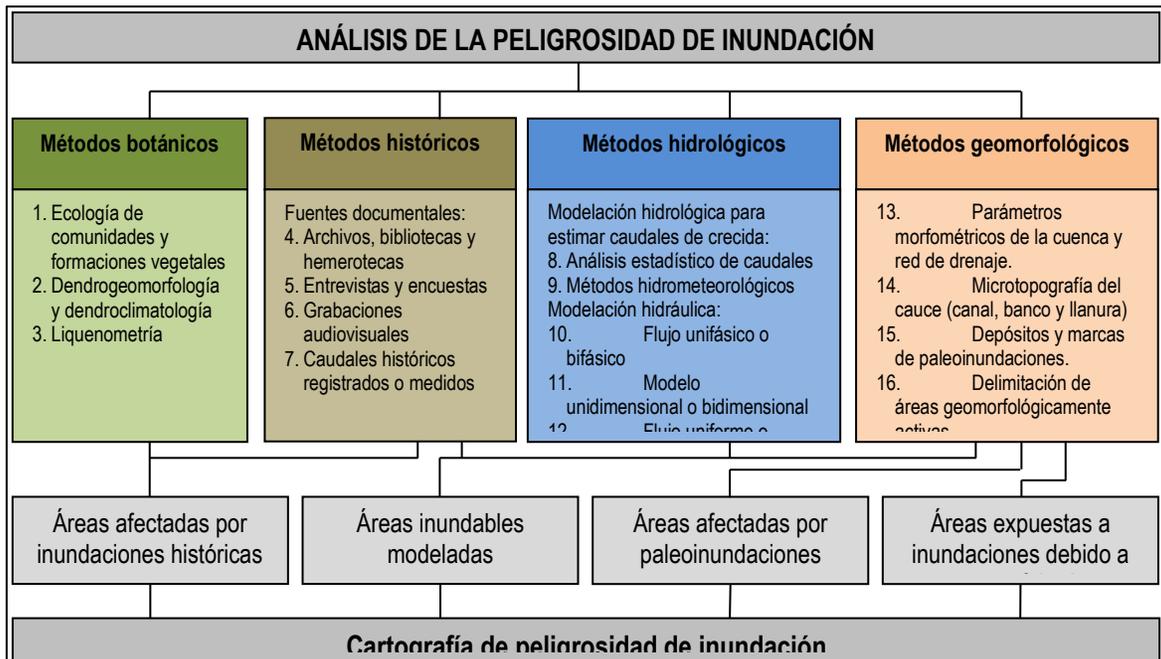
11.3.1 Metodologías consideradas para el análisis de la susceptibilidad de inundación

Según Díez-Herrero *et al.* (2008), el método de análisis de la peligrosidad de inundaciones se debe realizar según los criterios que se muestran en la Ilustración 11.3-1. Para este informe, se utilizaron los siguientes métodos:

Los **métodos históricos** emplean marcas y placas sobre elementos artificiales (edificaciones, vías de comunicación, obras públicas, etc.), documentación histórica (manuscritos e impresos de archivos, bibliotecas y hemerotecas) y testimonios (orales o audiovisuales) para reconstruir la extensión cubierta o la cota alcanzada por las aguas durante una crecida desencadenada en el periodo histórico. Una aplicación simple de esta metodología consiste en suponer que si el agua alguna vez ha alcanzado ciertos niveles puede alcanzarlos también en un futuro no muy lejano, determinando esta zona como “de crecida histórica”.

Los **métodos geológicos-geomorfológicos** emplean la disposición y tipología de las formas del terreno y los depósitos generados durante o tras el evento de avenida. Con ello se pueden delimitar las áreas geomorfológicamente activas dentro del cauce fluvial y sus márgenes y, por tanto, susceptibles de ser inundadas en el marco de la dinámica natural de la corriente fluvial, su frecuencia cualitativa de inundación, e incluso inferir órdenes de magnitud de parámetros como la profundidad, velocidad de la corriente o carga sólida transportada. Estas técnicas consideran fenómenos naturales difícilmente modelizables con otras técnicas, como avulsiones, migraciones del canal o el transporte de sólidos, y tener en cuenta las tendencias evolutivas naturales del sistema fluvial. Estos métodos y sus aplicaciones son usados por muchos autores, podemos encontrar estudios Ayala, (1985), Baker, et al., (1988), Díez & Pedraza (1996), Díez Herrero (2002), Marquínez & Lastra (2006a), Marquínez & Lastra (2006b), Ortega & Garzón (2006), Lastra, et al. (2008).

Ilustración 11.3-1: Análisis de la peligrosidad de inundaciones o inundabilidad



Fuente: Modificado de Diez-Herrero, et al., (2008).

11.3.2 Metodologías consideradas para el análisis de la susceptibilidad de remociones en masa

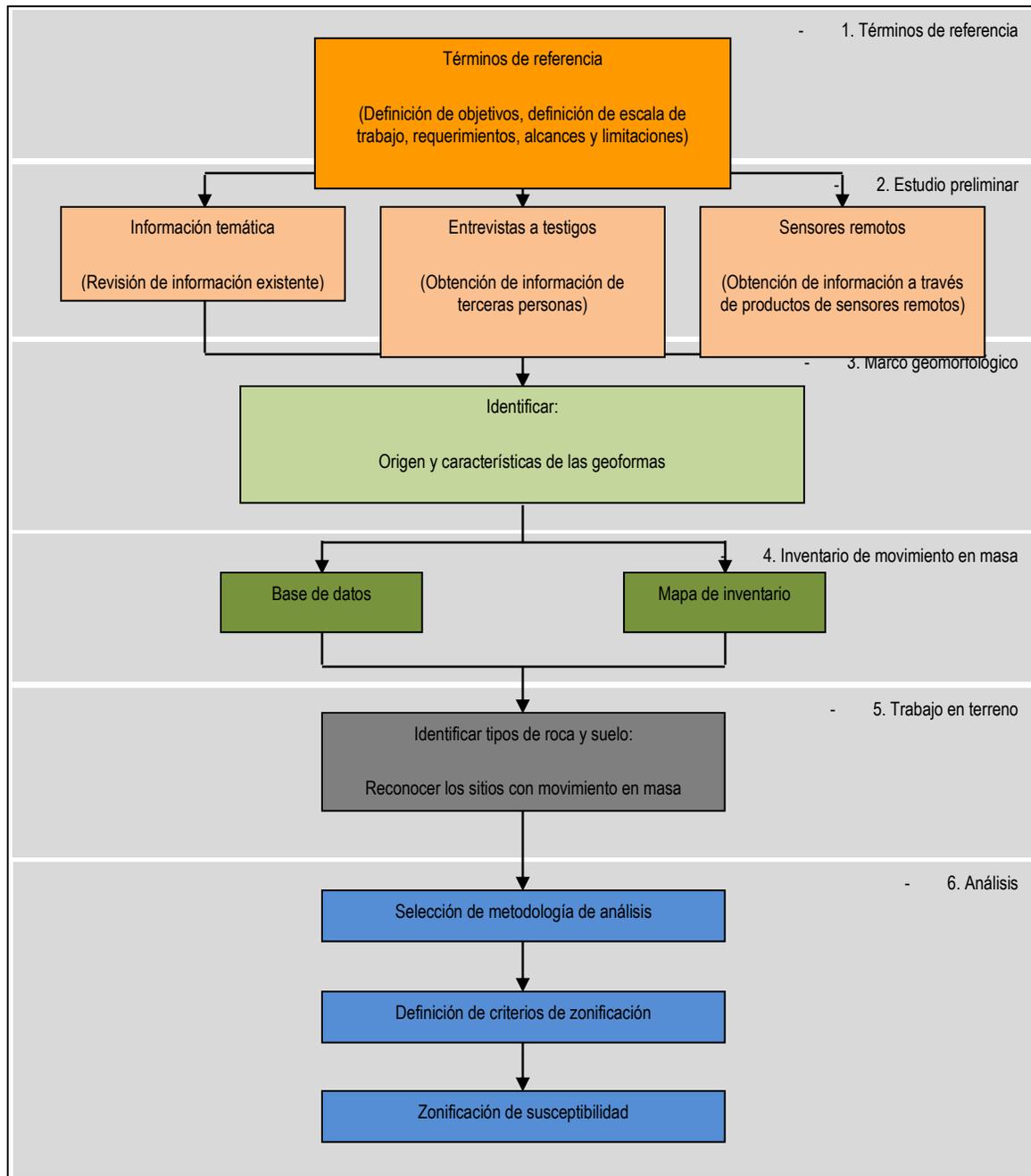
Para la zonificación de susceptibilidad de fenómenos de remoción en masa, se seguirán las recomendaciones de la *International Association of Engineering Geology* (IAEG) y la guía para zonificación de amenazas de remociones en masa propuesta por el PMA-GCA (2007).

En el estudio de riesgo de un Plan Regulado Comunal no se contempla la investigación de subsuelo (Métodos directos y Geofísica), ni mediante instrumentación, que son etapas incluidas en la metodología descrita por el PMA-GCA (2007), ya que queda fuera del alcance de un estudio de estas características, por la escala del estudio, y por el tiempo y presupuesto destinado a este. Por otra parte, en general, no existe información suficiente para zonificar la amenaza de los procesos de remoción en masa, de manera que en la metodología que se presenta a continuación sólo se zonifica susceptibilidad.

En consideración a lo descrito en el párrafo anterior, los pasos para zonificar la susceptibilidad asociada a los procesos de remoción en masa se resumen en las siguientes etapas (Ilustración 11.3-2):

- Términos de referencia: En esta etapa se incluye la definición del objetivo de la investigación, la escala de trabajo, los requerimientos de la institución que la realiza, de los clientes y del público, y de los alcances y las limitaciones.
- Estudio preliminar: Durante esta etapa se recopila la información temática (mapas topográficos, informes geológicos, etc.), de ser posible se entrevista a testigos y analizan fotografías aéreas e imágenes satelitales de distintos períodos de tiempo (para evaluar la temporalidad de los eventos y el estado de conservación de los depósitos).
- Marco geomorfológico: El objetivo es establecer el marco geomorfológico de cada lugar, para lo cual se necesita identificar las características y origen de las geoformas en el área, los tipos de materiales que se pueden esperar, y los procesos geomorfológicos que han ocurrido o puedan ocurrir.
- Inventario de movimientos en masa: Todas las ocurrencias de movimientos en masa próximas a la localidad son registradas en un mapa de inventario y en una base de datos que incluya: tipo de movimiento en masa, magnitud, tiempo de ocurrencia o de su reactivación y datos similares. En la próxima etapa, el inventario se actualizará para incorporar la información recogida durante el trabajo en terreno.
- Trabajo en terreno: Durante el reconocimiento, se identificarán los tipos de suelos y de rocas y los sitios con movimientos en masa, con el objetivo de validar la información recopilada, y se cubrirán los vacíos de información.
- Análisis: En función de la información recopilada en las etapas anteriores y del alcance y el propósito del estudio, se escoge un método de análisis, que se traduce en criterios de zonificación de las áreas susceptibles a ser afectadas por procesos de remoción en masa. Con estos criterios, se zonifica el área de estudio.

Ilustración 11.3-2: Adaptación de la metodología propuesta por PMA-CGA (2007) para la evaluación de la susceptibilidad asociada a los movimientos en masa.



Fuente: Elaboración propia en base a PMA-GCA (2007).

11.4 ANTECEDENTES HIDROLÓGICOS

11.4.1 Valores de precipitación diaria

Evento	Año	Mes	Día	Iquique	Tocopilla	Cuya	Huara en Fuerte Baquedano	Esmeralda	Quillagua
1	1972	2	12	s/r	s/r	0,0	s/r	20,0	s/r
2	1972	2	19	s/r	s/r	0,0	s/r	8,0	s/r
3	1984	6	7	s/r	s/r	s/r	s/r	s/r	0,4
4	1984	10	30	0,0	s/r	s/r	s/r	s/r	0,2
5	1986	7	18	0,2	s/r	s/r	s/r	s/r	0,0
6	1987	9	13	0,1	s/r	s/r	s/r	s/r	0,0
7	1989	7	21	0,3	s/r	s/r	s/r	s/r	0,0
8	1991	1	3	0,8	s/r	s/r	s/r	s/r	0,0
9	1992	1	1	0,5	s/r	s/r	s/r	s/r	0,0
10	1992	1	10	1,0	s/r	s/r	s/r	s/r	0,0
11	1992	1	12	1,0	s/r	s/r	s/r	s/r	0,0
12	1992	1	14	4,5	s/r	s/r	s/r	s/r	0,0
13	1992	5	27	3,5	s/r	s/r	s/r	s/r	0,0
	1992	5	28	7,0	s/r	s/r	s/r	s/r	1,0
14	1992	12	23	1,4	s/r	s/r	s/r	s/r	0,0
	1992	12	24	0,5	s/r	s/r	s/r	s/r	0,0
15	1993	8	10	0,5	s/r	s/r	s/r	s/r	0,0
16	1996	8	29	0,1	0,0	s/r	3,0	s/r	0,0
17	1997	7	14	0,1	0,0	s/r	s/r	s/r	0,0
18	1997	8	8	0,1	0,0	s/r	0,0	s/r	0,0
19	1997	9	27	0,2	0,0	s/r	0,0	s/r	0,0
20	2001	1	11	0,0	0,0	s/r	0,0	s/r	3,0
21	2001	2	1	0,1	0,0	s/r	0,0	s/r	0,0
22	2002	7	1	0,8	0,0	s/r	0,0	s/r	0,2
	2002	7	2	3,7	11,5	s/r	0,0	s/r	0,0
	2002	7	3	0,5	0,0	s/r	0,0	s/r	0,0
23	2002	8	27	0,1	4,5	s/r	0,0	s/r	0,0
24	2003	7	20	0,1	0,0	s/r	0,0	s/r	0,0
25	2003	8	2	0,1	0,0	s/r	0,0	s/r	0,0
26	2005	1	12	0,0	0,0	s/r	0,0	s/r	0,5
27	2005	1	14	0,0	0,0	s/r	0,0	s/r	0,5
28	2005	4	25	0,0	0,0	s/r	0,0	s/r	0,5
	2005	4	26	0,1	0,0	s/r	0,0	s/r	0,0
	2005	4	27	0,4	0,0	s/r	0,0	s/r	0,0
29	2006	6	2	1,0	0,0	s/r	0,0	s/r	0,0
30	2008	1	3	0,0	0,0	s/r	0,3	s/r	0,0
31	2008	1	13	0,0	0,0	s/r	1,5	s/r	0,0
32	2008	8	11	1,0	0,0	s/r	0,0	s/r	0,0
33	2009	7	2	3,0	0,0	s/r	0,0	s/r	0,0
34	2011	1	23	0,0	0,0	s/r	1,7	s/r	0,0
35	2011	1	25	0,0	0,0	s/r	1,2	s/r	0,0
36	2011	2	5	1,0	0,0	s/r	0,0	s/r	0,0
	2011	2	6	0,6	0,0	s/r	0,0	s/r	0,0
	2011	2	7	0,0	0,0	s/r	4,0	s/r	0,0
37	2011	6	28	0,2	0,0	s/r	0,0	s/r	0,0
38	2011	7	3	0,5	0,0	s/r	0,0	s/r	0,0
	2011	7	4	0,2	0,0	s/r	1,0	s/r	0,0
	2011	7	5	0,1	0,0	s/r	0,0	s/r	0,0
39	2011	7	7	3,0	0,0	s/r	0,0	s/r	0,0
40	2012	1	25	0,0	0,0	s/r	0,0	s/r	0,6
41	2012	1	27	0,0	0,0	s/r	1,0	s/r	0,0
42	2012	2	20	0,0	0,0	s/r	0,7	s/r	0,0
43	2012	12	19	0,0	0,0	s/r	0,5	s/r	0,0
44	2013	5	16	0,0	0,0	s/r	0,0	s/r	0,5
45	2014	1	6	0,0	0,0	s/r	0,1	s/r	0,0
46	2014	4	1	0,0	0,0	s/r	1,1	s/r	0,0
	2014	4	2	0,0	0,0	s/r	0,4	s/r	0,0

Evento	Año	Mes	Día	Iquique	Tocopilla	Cuya	Huara en Fuerte Baquedano	Esmeralda	Quillagua
47	2014	5	21	0,0	0,8	s/r	0,0	s/r	0,0
48	2014	11	22	0,0	0,0	s/r	0,1	s/r	0,0
49	2015	3	23	0,0	0,5	s/r	0,0	s/r	2,4
	2015	3	24	0,0	10,5	s/r	3,9	s/r	2,0
50	2015	8	8	1,3	0,0	s/r	0,0	s/r	0,0
	2015	8	9	7,7	5,0	s/r	0,0	s/r	0,0
51	2016	7	8	0,0	0,0	s/r	2,0	s/r	0,0

s/r: Sin registro. La estación no tiene mediciones en la fecha señalada.

11.4.2 Registro de las precipitaciones mensuales en la estación meteorológica Iquique

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1984								0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1985	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1986	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1987	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0
1988	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1989	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1990	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1991	0,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1992	7,0	0,0	0,0	0,0	10,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,9
1993	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0
1994	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1995	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1996	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0
1997	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,2	0,0	0,0	0,0
1998	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1999	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0			0,0	0,0
2000	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2001	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2002	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	5,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0
2003	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0
2004	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2005	0,0	0,0	0,0	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2006	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2007	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2008	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2009	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2010	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2011	0,0	1,6	0,0	0,0	0,0	0,2	3,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2012	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2013	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2014	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2015	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	9,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2016	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2017	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0					

	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
N° Datos	33	33	33	33	33	33	33	33	32	32	33	33
Promedio	0,2	0,1	0,0	0,0	0,3	0,0	0,4	0,3	0,0	0,0	0,0	0,1
Máximo	7,0	1,6	0,0	0,5	10,5	1,0	5,0	9,0	0,2	0,0	0,0	1,9
Mínimo	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

11.5 CATASTRO DE PELIGROS QUE HAN AFECTADO A LA COMUNA DE IQUIQUE

11.5.1 Catastro de maremotos

Cuadro 11.5-1: Registro de eventos de maremotos que han afectado a las costas de Iquique desde 1868.

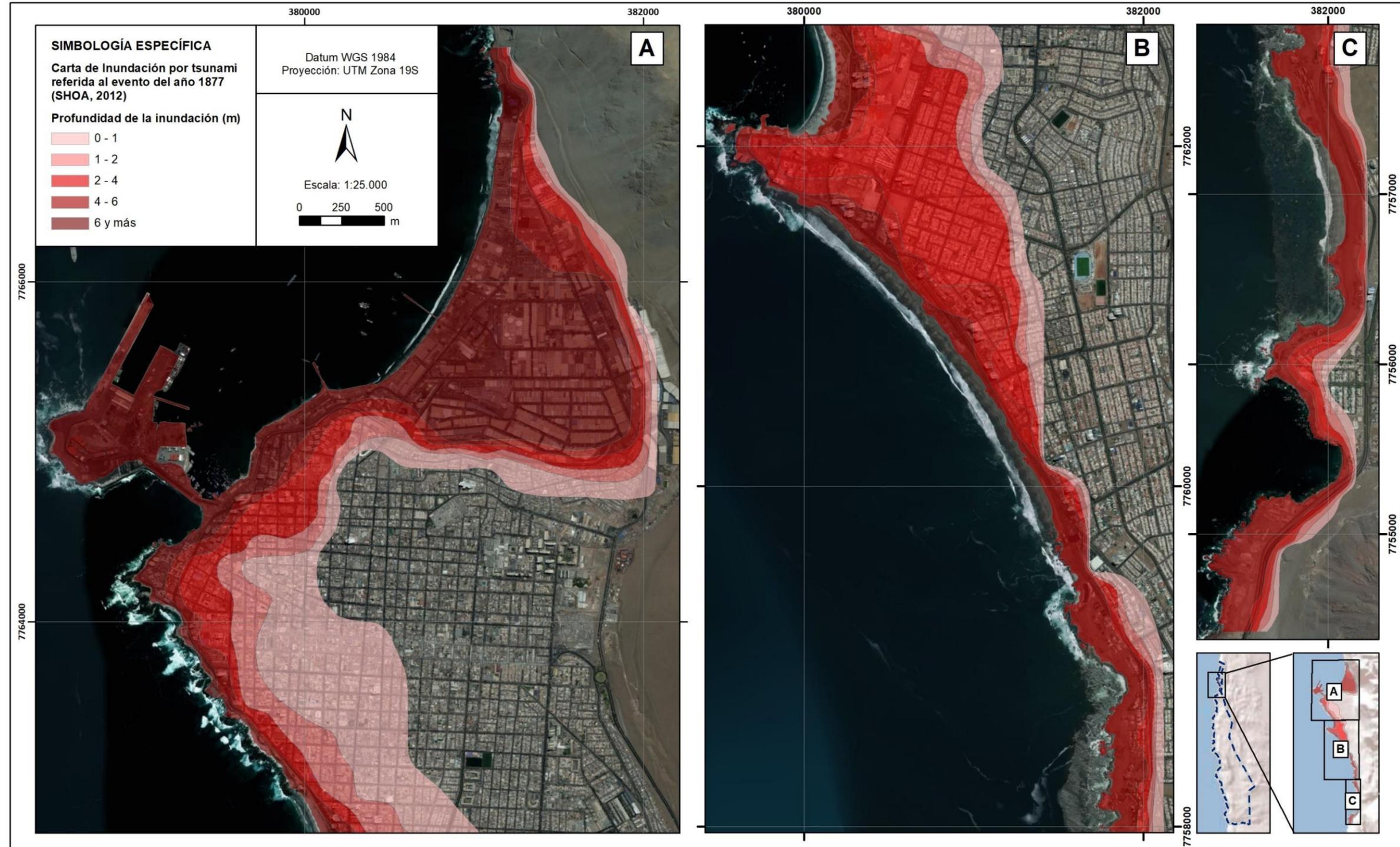
Año	Mes	Día	Hora GMT	Latitud (°S)	Longitud (°W)	Magnitud Sismo	Profundidad (km)	Fuente Sísmica ³⁰	Lugar Observación (altura de ola en metros)
1868	Agosto	13	20:45	17,7	71,6	8,8	NR	CERESIS	Arica (14,0), Iquique (12,0) , Talcahuano (5,0)
1877	Mayo	9	01:00	21,1	70,3	8,8	25	CERESIS	Arica (18,0) Iquique (21,0) , Cobija (6,0-9,0), Mejillones (9,0), Caldera (11,0)
2011	Marzo	11	05:46	38,3°N	142,4°E	9,0	32	USGS	(*) Arica (2,23), Iquique (2,13) , Pisagua (0,77), Antofagasta (0,9), Tocopilla (0,79), Taltal (1,86), Caldera (2,19), Huasco (2,13), Coquimbo (2,19), Pichidangui (1,35), Isla de Pascua (0,78), San Félix (0,63), Valparaíso (1,50), Juan Fernández (0,65), San Antonio (1,26), Constitución (2,23), Talcahuano (2,23), Lebu (1,80), Corral (1,44), Puerto Montt (0,09), Ancud (0,79), Puerto Chacabuco (0,19), Puerto Williams (0,09), Puerto Soberanía (0,16)
2014	Abril	1	23:46	19,6	70,9	8,2	39	CSN	(*) Arica (2,01), Pisagua (2,12), Iquique (2,59) , Patache (1,66), Tocopilla (0,87), Mejillones (1,03), Antofagasta (0,41), Paposo (0,31), Taltal (0,31), Chañaral (0,45), Caldera (0,26), Huasco (0,18), Coquimbo (0,33), Pichidangui (0,23), Quintero (0,19), Valparaíso (0,24), San Antonio (0,27), San Félix (0,67), Juan Fernández (0,24), Constitución (0,34), Quiriquina (0,29), Talcahuano (0,36), Coronel (0,28), Lebu (0,12), Corral (0,11), Bahía Mansa (0,18)
2014	Abril	2	02:43	20,5	70,4	7,6	28	CSN	(*) Arica (0,75), Pisagua (0,31), Iquique (0,47) , Patache (0,53), Tocopilla (0,27), Mejillones (0,38), Antofagasta (0,23)
2015	Septiembre	16	22:54	31,5	71,8	8,4	11,1	CSN	(*) Arica (0,64), Pisagua (0,20), Iquique (0,30) , Patache (0,31), Tocopilla (0,20), Mejillones (0,30), Antofagasta (0,50), Paposo (0,23), Taltal (0,40), Chañaral (1,20), Caldera (1,14), Huasco (0,80), Coquimbo (4,61), Pichidangui (1,77), Quintero (1,83), Valparaíso (2,20), San Antonio (1,01), San Félix (0,67), Juan Fernández (1,00), Bucalemu (0,70), Constitución (1,34), Quiriquina (0,90), Talcahuano (1,20), Coronel (0,70), Lebu (0,40), Queule (0,32), Corral (0,40), Bahía Mansa (0,41)

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos obtenidos a partir de SHOA (2015).

(*) Amplitud Máxima Observada: Se refiere a la altura máxima observada en el registro de la estación del nivel del mar filtrado, con la componente de marea eliminada. Este valor de amplitud es medido desde el Nivel Medio del Mar.

³⁰ CERESIS: Centro Regional de Sismología para América del Sur (Catálogo de terremotos para América del Sur, 1985); USGS: Servicio Geológico de Estados Unidos; CSN: Centro Sismológico Nacional.

Figura 11-2: Zonas de inundación modeladas por el SHOA para la parte urbana de la ciudad de Iquique, basadas en el evento del año 1877.



Fuente: Elaboración propia a partir de la Carta de Inundación por Tsunami en Iquique, publicada por el SHOA (2012).

11.5.2 Catastro de remociones en masa

Cuadro 11.5-2: Registro de eventos de remociones en masa en la comuna de Iquique a partir de recopilación bibliográfica.

N° en Figura 6-8	Coord. W	Coord. N	Tipo	Descripción	Fuente
1	382971	7764735	Flujo de detritos	1940, quebradas se activaron con aluviones. Qda. Zofri	SNGM, 2013
2	382189	7764716	Deslizamiento en relleno antrópico	Desplazamiento en relleno/ FUERA DEL ÁREA	Farías, 2017
3	382889	7764653	Caída de rocas	Antigua cantera, punto de generación de remociones en masa	Opazo, 2014
4	382667	7764309	Flujo de detritos	1940, quebradas se activaron con aluviones. Qda. Esmeralda	SNGM, 2013
5	381831	7763973	Deslizamiento en relleno antrópico	Desplazamiento en relleno/ FUERA DEL ÁREA	Farías, 2017
6	382377	7763953	Caída de rocas	Caída de roca, afloramiento en la parte alta	Opazo, 2014
7	381965	7763800	Caída de rocas	Zonas de generación y alcance de caídas de rocas	Opazo, 2014
8	382014	7763609	Caída de rocas	Caída de rocas de 50 cm2 y 30 cm de alto	Opazo, 2014
9	381878	7763415	Caída de rocas	Caída de roca (coluvial), volumen 40x60x40 cm generada por extracción de Áridos	Opazo, 2014
10	389850	7763354	Flujo de detritos	1940, aluvión qda- Obispo	SNGM, 2013
11	382037	7763295	Deslizamiento en relleno antrópico	Desplazamiento en relleno/ FUERA DEL ÁREA	Farías, 2017
12	389407	7762585	Flujo de detritos	1940, aluvión qda Huantajaya	SNGM, 2013
13	382496	7762449	Caída de rocas	Caída de rocas (alóctonas) alto redondeamiento y esfericidad	Opazo, 2014
14	383000	7762394	Caída de rocas	Afloramiento roca Formación Punta Barranco, caída de roca	Opazo, 2014
15	382639	7761718	Caída de rocas	Alcance de caída de roca (hasta 1 m ³)	Opazo, 2014
16	383004	7761379	Caída de rocas	Zona de generación de caída de roca	Opazo, 2014
17	382746	7761055	Flujo de detritos	Se observan varios depósitos de flujos detríticos mal seleccionados	Opazo, 2014
18	382752	7761042	Grieta evidencia de deslizamiento de suelo	Grieta	Opazo, 2014
19	382773	7761007	Flujo de detritos	Flujo detrítico y caída de roca	Opazo, 2014
20	383313	7760908	Deslizamiento de suelo	Zanja o plano de debilidad, punto de deslizamiento de suelo	Opazo, 2014
21	384629	7760854	Flujo de detritos	1940, aluvión Quebrada Seca hacia Sector El Boro	SNGM, 2013
22	383548	7760583	Caída de rocas	Generación de caída de roca en la ruta	Opazo, 2014
23	383013	7760523	Caída de rocas	Tubería que suministran el agua en Iquique amenazada por caída de rocas	Opazo, 2014

N° en Figura 6-8	Coord. W	Coord. N	Tipo	Descripción	Fuente
24	383853	7760507	Caída de rocas	Caída de depósitos coluviales de 3 m de ancho	Opazo, 2014
25	383169	7760488	Caída de rocas	Generación de remociones en masa y alcance a la ruta A-16	Opazo, 2014
26	388487	7756848	Flujo de detritos	1940, activación con aluviones en qda Santa Rosa	SNGM, 2013
27	383195	7755088	Flujo de detritos	Activación Qda. Molle	SNGM, 2013
28	381773	7753046	Deslizamiento de suelo	Desplazamiento leve de suelo en mezcla de duna con suelo.	Farías, 2017
29	382624	7752209	Superficie de ruptura de RM	DZ: depletion zone	Mather, 2014
30	382290	7750234	Superficie de ruptura de RM	DZ: depletion zone	Mather, 2014
31	379460	7747820	Superficie de ruptura de RM	DZ: depletion zone	Mather, 2014
32	380068	7746906	Superficie de ruptura de RM	DZ: depletion zone	Mather, 2014
33	381788	7745743	Superficie de ruptura de RM	DZ: depletion zone	Mather, 2014
34	382984	7743225	Avalancha de roca	RA: Rock avalanche	Mather, 2014
35	381057	7742534	Avalancha de roca	Avalancha escarpe y depósitos	Farías, 2017
36	380557	7742204	Avalancha de roca	Avalancha escarpe y depósitos	Farías, 2017
37	382882	7741846	Avalancha de roca	RA: Rock avalanche	Mather, 2014
38	383732	7738214	Superficie de ruptura de RM	DZ: depletion zone	Mather, 2014
39	378983	7738005	Deslizamiento de roca	Landslide accumulation zone	Mather, 2014
40	381707	7737348	Avalancha de roca	Avalancha escarpe y depósitos	Farías, 2017
41	383849	7737053	Superficie de ruptura de RM	DZ: depletion zone	Mather, 2014
42	383459	7735614	Superficie de ruptura de RM	DZ: depletion zone	Mather, 2014
43	381211	7734299	Avalancha de roca	Avalancha escarpe y depósitos	Farías, 2017
44	383898	7733381	Superficie de ruptura de RM	DZ: depletion zone	Mather, 2014
45	380966	7732957	Avalancha de roca	Avalancha escarpe y depósitos	Farías, 2017
46	378717	7725902	Superficie de ruptura de RM	DZ: depletion zone	Mather, 2014
47	379389	7725493	Superficie de ruptura de RM	DZ: depletion zone	Mather, 2014
48	379705	7724590	Superficie de ruptura de RM	DZ: depletion zone	Mather, 2014
49	379995	7722107	Superficie de ruptura de RM	DZ: depletion zone	Mather, 2014
50	380131	7711684	Flujo de detritos	Fotointerpretación	Farías, 2017
51	380564	7711426	Superficie de ruptura de RM	DZ: depletion zone	Mather, 2014
52	380255	7710904	Caída de rocas	Eólico sobre roca en pendiente larga. Caída activa de rocas desde afloramiento de arriba.	Farías, 2017
53	378724	7709669	Caída de rocas	Banda de depósito de las caídas de rocas, pie	Farías, 2017
54	380026	7708012	Superficie de ruptura de RM	DZ: depletion zone	Mather, 2014
55	379266	7706821	Flujo de detritos	Flujo de detritos	Farías, 2017
56	379932	7706437	Caída de rocas	Aparente fractura en talud. Caídas de rocas (deslizamiento)	Farías, 2017

N° en Figura 6-8	Coord. W	Coord. N	Tipo	Descripción	Fuente
				superficial) hacia camino Salar Grande. Espesor de suelo 2-4m. Morfología de estructura NWW-SEE en sup.	
57	379690	7705939	Flujo de detritos	Flujo de detritos	Farías, 2017
58	379484	7702690	Deslizamiento de roca y grietas de tensión	Características de creep (grietas de tensión) en la corona del deslizamiento, actividad en escarpe	Farías, 2017
59	378953	7697673	Superficie de ruptura de RM	DZ: depletion zone	Mather, 2014
60	378226	7697252	Caída de rocas	Zona de caída de rocas. Mezcla de duna y roca. Afloramientos con estratificación a 70° SW (¿SE?)	Farías, 2017
61	382839	7694137	Superficie de ruptura de RM	DZ: depletion zone	Mather, 2014
62	382032	7694046	Deslizamiento de suelo	Deslizamientos superficiales en duna, mezclados con niveles de caída de rocas.	Farías, 2017
63	383695	7691747	Superficie de ruptura de RM	DZ: depletion zone	Mather, 2014
64	377046	7705741	Flujo de detritos	Flujo de detritos	Garrido y Jara (2015)

Fuente: Elaboración propia a partir de referencias citadas en el cuadro.

Cuadro 11.5-3: Registro de eventos de remociones en masa observados en terreno.

Coordenada X	Coordenada Y	Peligro geológico identificado	Descripción	Unidad Geológica afectada
383596	7751824	Caída de bloques	Alcance máximo de caída de bloques. Los bloques tienen hasta 2 metros de diámetro, brecha volcánica, parecen ser antiguos, de hecho, están muy meteorizados. En varios casos, se están desmoronando y en otros, están completamente deshechos.	-
384140	7751699	Caída de bloques	Otro punto de alcance de caída de bloques. Los bloques tienden a rodar hasta la línea del tren aprox.	-
381138	7767457	Caída de bloques	Cantera. Rocas muy fracturadas. Riesgo de CB hasta el mar.	-
381708	7764687	Caída de bloques	Escarpe de la F. Zofri. Se ven afloramientos de rocas muy fracturados y alterados también (arcillas, ox.Fe), bloques caídos con corto alcance (15 m, 45 m) equivalente a una reja de protección. Hay grietas de tensión. El escarpe va decreciendo hacia el S (10-15 m a 6 m)	-
381450	7753792	Caída de bloques	La ladera del farellón en esta parte se ve aluvial, pero también se ven bloques caídos de unos 2-3 m.	-
377605	7729199	Caída de bloques	En esta parte de la carretera se ve una RM hacia el E y se ven caída de bloques en la ladera.	-
387554	7652673	Caída de bloques	Zona de bloques caídos	-
381785	7690519	Caída de bloques	Dunas sobre afloramientos con abanicos menores que se apoyan sobre ellas y caída de roca hasta al menos el camino. En algunos sectores los rodados se asocian más al cuerpo del abanico que a caída. Abanico son roca de hasta 1,5 m en promedio.	-
379494	7694413	Caída de bloques	Rodados a 136 m del camino, diámetro > 3 m en promedio.	-
378029	7695607	Caída de bloques	Caída de rocas antiguas.	-
379253	7708176	Caída de bloques	Estratificación a favor de la pendiente, condiciones de caída de bloques (Más fracturado)	-
381975	7755240	Deslizamiento	Si se cae el talud cubriría la calle abajo. Rocas de hasta 1 m sueltas dentro de la arena.	-
383450	7752153	Flujo	En el abanico de una quebrada que hay que marcar para flujos.	-
385367	7750867	Flujo	Una de las quebradas más importantes para flujos. Tiene una gran área de drenaje.	-
388664	7753901	Flujo	Considerada como quebrada grande para flujos. Tiene flujos pequeños. Hay barro. Se ve erosión. Se ve un pequeño cauce en el costado N de la qda. de 50-60 cm de prof.; en ÚI se ven dep. aluviales.	-
388160	7754950	Flujo	En una quebrada. muy intervenida por caminos, que tiene un cauce de 40 cm de prof y 80-100 cm de ancho aprox., con depósitos finos. Este cauce se ve intervenido por cerritos que evidencian actividad antrópica tratando de detener el agua cuando llueve mucho.	-

Coordenada X	Coordenada Y	Peligro geológico identificado	Descripción	Unidad Geológica afectada
389426	7756095	Flujo	En esta quebrada no se ven evidencias de flujos, pero la morfología de la quebrada es peligrosa, porque la pendiente es muy alta.	-
383842	7764790	Flujo	Estamos en la cabecera de la qda. Zofri. Se ve mucho material aluvial suelto. Rocas alteradas (verdes, como alt. propilítica). Se ven bloques caídos de la misma composición litológica. Quebrada muy profunda. En 1940, hubo un aluvión que afectó al sector Zofri.	-
380681	7768698	Flujo	Fin de la ruta, inmediatamente al N de una quebrada importante que ante mucha lluvia los flujos se van hacia el mar directamente (pasando por la ruta 1).	Jimov
378113	7747921	Flujo	Extremo norte sector Los Verdes, al frente de la construcción de nuevas viviendas sociales. Se ven evidencias de flujos en la ladera del farellón, justo sobre las casas.	-
381773	7689727	Flujo	Antiguo abanico sobre conchal. Potencia de 0,5 m aprox. disminuyendo hacia el sur. Bloques de hasta 1.5 m.	-
380688	7693021	Flujo	Depósito de poco espesor tipo flujo tipo laminar con material fino rojizo y salobre (forma costras con sales). Vino desde cárcavas locales, no llega hasta el camino, unidades horizontales de arenas finas y limos rojizos.	Kipb(b)
376464	7698278	Flujo	Aluvión tipo flujo laminar en cerro del frente.	Jimov
378194	7699037	Flujo	Posible escarpe de gran avalancha con bloques <2m en ladera y en el suelo. Los bloques no parecen caídos (despeje o relicto de avalancha antigua). Abanico activo tipo flujo laminar, Limitar moderada.	-
378816	7748838	Flujo	Flujo más extendido	Jimov
378504	7707307	Flujo	Flujo que podría bajar por ladera o por camino	-
380862	7693496	Flujo	Los abanicos llegan casi hasta el camino.	Jmseg(a) - Kipb(a)
383168	7690464	Flujo	Dunas sobre afloramientos con abanicos menores que se apoyan sobre ellas	Kipb(b)
378719	7747776	Flujo	Flujo	PIHe
390194	7631655	Flujo	Peligro de flujos, abanicos.	Jimov
379813	7751134	Mega-avalancha de roca	Fin de la ruta de Playa Blanca. Se ve un relieve lobular al W de la carretera e inmediatamente al S de esta parada. Puede ser una RM antigua cubierta por arenas.	-
377068	7746231	Mega-avalancha de roca	Hacia el S se ve una de las 2 RM en este sector Los Verdes.	-
377478	7696138	Procesos de ladera	Los depósitos de avalancha, tipo RM. Con caída de roca.	Kipb(a)
378666	7741823	Procesos de ladera	Sector del camino de entrada a Los Verdes, al norte se ven restos de remoción, caídas de bloques o deslizamientos en la ruta.	-
378177	7748035	Procesos de ladera	Caída de bloque y flujo en ladera al este del condominio tres islas	-
376743	7697805	Procesos de ladera	Caída de rocas o avalancha	-

Fuente: Elaboración propia a partir de referencias citadas en el cuadro

11.5.3 Catastro de sismos

Cuadro 11.5-4: Registro de eventos de sismos que han afectado a la comuna de Iquique desde el s/XVII.

Fecha	Hora Local	Lat (S)	Long (W)	Magnitud Ms	Magnitud Mw	Prof. [km]	Efecto	Descripción	Referencias
24-11-1604	12:30	18,500	70,400	8,5	S/D	30	TD	Primer sismo con registros históricos, identificado por expertos como un evento mayor con un tsunami destructor asociado (Comte et al., 1986). Se estima una magnitud de $M \approx 8,4$ (Comte et al., 1988) y $M_s \approx 8,5$ (NEIC, GUC). Los datos históricos de daños hablan de una destrucción prácticamente completa de la ciudad San Marcos de Arica y, debido al tsunami, se reconstruyó a los pies del Morro de Arica (Urrutia & Lanza, 1993). Se estima que por generación de tsunami no puede tener una profundidad mayor de 80km, asignándole un a profundidad superficial -sismo interplaca- de 10km (Comte, et al., 1988).	Urrutia & Lanza, 1993; Comte et al., 1988; Comte et al., 1986 CSN (2014)
16-09-1615	23:30	18,500	70,350	8,8	S/D	S/D	TM	Un fuerte terremoto sacudió a Arica. Según los registros, este evento fue muy destructivo para la zona sur del actual Perú y zona norte del actual Chile, acabando con la mayoría de las construcciones; sin embargo, no se reportaron víctimas fatales (Urrutia & Lanza, 1993). La magnitud de este sismo se estima en $M \approx 8,0$ (Comte et al., 1988). Existen varias localizaciones para el terremoto no difiriendo de manera importante entre ellas. Se registró la presencia de un importante tsunami, aunque menor que el producido en 1604 (Lockridge, 1985, Comte, et al., 1988). Según el catálogo de los principales tsunamis que han afectado a la costa de Chile del SHOA, el tsunami no habría llegado a las costas de Iquique.	Urrutia & Lanza, 1993; Comte et al., 1988 CSN (2014) SHOA (2015)
10-03-1681	S/D	18,500	70,350	7,3	S/D	S/D	-	Un fuerte sismo destruyó en Arica muchas casas y algunas murallas del fuerte.	Urrutia & Lanza, 1993 Comte et al., 1989
1768	S/D	20,500	69,300	-	8	S/D	-	Este evento ubicó su epicentro aproximadamente en Pica, y habría tenido una zona de ruptura no superior a 250 km, con una magnitud máxima estimada de $M_w=8$ (FONDEF, 2015) [1]. Si bien no se encontraron mayores detalles de los efectos sobre el territorio, su gran magnitud estimada resulta importante de señalar.	[1] Disponible en: http://web.ing.puc.cl/fondefD10I1027/mas/eventossismicos/subduccion.html
13-05-1784	S/D	16,500	72,000	8,5	S/D	S/D	-	Históricamente, este sismo es conocido como el gran terremoto de Arequipa, ya que afectó severamente a esa localidad y a los poblados situados dentro de un radio de 100 kilómetros (no se informa de daños en la región). El sismo se estimó en una magnitud de $M = 8,5$ ubicación 16.5 S y 72W (Comte, et al., 1988). No hay información de que este evento haya generado un tsunami, lo cual es razonable considerando que el epicentro no fue costero (Comte et al., 1988; Monge & Mendoza, 1993).	Comte et al., 1988 ; Monge & Mendoza, 1993
09-10-1831	06:00	18,500	71,000	7,8	S/D	S/D	-	Sismo bastante fuerte afectó a Arica y también se sintió en Arequipa, Tacna, Chuquisaca y Potosí. Las crónicas no consignan daños, a pesar de que los periódicos lo señalaron como casi terremoto.	Urrutia & Lanza, 1993
18-09-1833	05:45	18,500	70,400	7,7	S/D	S/D	-	El Terremoto de Arica de 1833 ocurrió el 18 de septiembre de 1833, y afectó todo el extremo sur del Perú: Arequipa, Moquegua, Tacna y actual norte de Chile. Este movimiento sísmico fue muy violento. Había transcurrido menos de dos años de la ocurrencia del último terremoto en la región, el del año 1831, pero esta vez la destrucción fue mayor. La ciudad de Tacna queda reducida a escombros y se produjeron daños en Moquegua, Arequipa, Sama, Arica, Torata, Locumba e Ilabaya. Se sintió en Bolivia, en ciudades como La Paz y Cochabamba.	
13-08-1868	16:45	18,500	70,350	8,5	S/D	S/D	TD	Terremoto que afectó al sur de Perú y norte de Chile, desde Ica hasta Tarapacá, con el desarrollo de un tsunami asociado que dejó varado al barco Watere 800 m tierra adentro. Este es un evento muy bien documentado y de datos certeros, por haber sido estudiado en extenso. Los reportes indican que en Iquique se destruyeron cerca de 100 casas, incluso las más sólidas, las máquinas para moler, las estiladores de agua y los hornos de la fundición. El mar subió más de 10 metros, varándose todas las embarcaciones menores. Los peces desaparecieron de la costa más de un mes. La cifra de muertos estimada alcanzaría las 200 personas en Iquique.	Urrutia & Lanza, 1993; Comte, et al., 1988 CSN (2014)
24-08-1869	13:30	19,600	70,230	7,5	S/D	S/D	TM	Sismo con epicentro en Pisagua acompañado de tsunami de categoría moderada. No existen registros de los daños producidos en la comuna de Iquique. Se registró la presencia de un importante tsunami, aunque menor que el producido en 1604 (Lockridge, 1985, Comte, et al., 1988). Según el catálogo de los principales tsunamis que han afectado a la costa de Chile del SHOA, el tsunami no habría llegado a las costas de Iquique.	CSN (2014) SHOA (2015)
05-10-1871	05:00	20,200	70,170	7,3	S/D	S/D	T	En Iquique se cayeron muchas casas. En Tarapacá, la iglesia y más de 100 viviendas se derrumbaron. Hubo daños en los pueblos de Pica, Matilla, Sibaya, Chiapa, Usmagama, Limaciña, Pachica, Purca y Mamiña. Según el catálogo de los principales tsunamis que han afectado a la costa de Chile del SHOA, el tsunami no habría llegado a las costas de Iquique.	Urrutia & Lanza, 1993 CSN (2014)

Fecha	Hora Local	Lat (S)	Long (W)	Magnitud Ms	Magnitud Mw	Prof. [km]	Efecto	Descripción	Referencias
09-05-1877	21:16	19,600	70,230	8,5	S/D	10	TD	Un fuerte terremoto y luego maremoto asolaron desde Arica hasta Copiapó. Considerando los daños reportados, más el tsunami generado, se estimó una profundidad de 10 kilómetros (Comte et al., 1988). Con respecto a los daños materiales y humanos, se informó de 5 muertos y de una destrucción parcial, aunque importante, de la ciudad. El tsunami arribó a las costas ariqueñas una hora después del terremoto con olas de 20 metros, arrastrando al Watere de vuelta hacia la costa, dejándolo varado en la playa Las Machas (Urrutia & Lanza, 1993). En Pisagua, el terremoto ocasionó daños en las líneas y durmientes del ferrocarril. En Iquique, hubo daños de consideración en gran parte de los edificios de material sólido, en los hoteles, pulperías y almacenes de loza. Luego, el maremoto prácticamente barrió con todo el barrio desde la Puntilla hasta El Morro. Fallecieron alrededor de 30 obreros, desaparecieron los muelles, las bodegas, los establecimientos industriales y dos bombas que se habían ubicado en la playa, para tener agua con qué extinguir los incendios. Hubo también marejadas hasta Puerto Montt, las que incluso alcanzaron a Australia, Nueva Zelanda y Japón. La destrucción asociada al tsunami generado por el terremoto se encuentra bien reportada en el sur de Chile. Este arribó a las costas de Concepción la mañana del día siguiente. En Tomé, a partir de las 12:30 horas, se sucedieron bajamares y pleamares que oscilaban 1.2 m con respecto a las mareas ordinarias. En Talcahuano, el mar se retiró 200 m y vino un flujo que subió 1.1 m sobre la línea de alta marea, sucediendo un oleaje lento que alcanzó una altura máxima a 1.95 m. El mar permaneció con oscilaciones repetidas por espacio de 3 días.	Urrutia & Lanza, 1993; Comte, et al., 1988 CSN (2014)
23-01-1878	08:00	20,000	70,300	7,9	S/D	40	-	Un nuevo sismo se sintió en la provincia de Tarapacá. Chui Chui fue prácticamente reducida a escombros y hubo daños en varias oficinas salitreras y otros pueblos del interior.	Urrutia & Lanza, 1993
15-09-1911	08:10	20,000	72,000	7,3	S/D	S/D	-	Un fuerte temblor en Iquique y la Pampa dejó algunos heridos en Iquique y Huara, y daños bastante serios en diferentes lugares de la zona. En Iquique, el muelle se agrietó, los terrenos donde estaba ubicada la gobernación marítima se hundieron, el edificio quedó levantado más de una pulgada, en el cementerio se deterioraron más de sesenta tumbas, en el hospital se agrietaron algunas murallas, la línea férrea tuvo deterioros entre Iquique y Carpa, a la altura de San Juan y de Iquique a la Pampa, por deslizamientos de tierra y caída de enormes peñascos, que después hubo que romper con dinamita. También hubo daños en Cavanca y se cortaron las comunicaciones telefónicas con Pisagua.	Urrutia & Lanza, 1993
23-02-1933	04:09	20,000	71,000	7,6	S/D	40	-	Un fuerte temblor acompañado de ruidos subterráneos afectó a Iquique. Se cayeron los cables del telégrafo y de la energía eléctrica, se rompieron focos del alumbrado público y se derrumbaron algunas murallas de concreto. El ferrocarril longitudinal sufrió deterioros en varios puntos como consecuencia de rodados y derrumbes en los cerros.	Urrutia & Lanza, 1993
14-03-1943	14:37	20,000	69,500	7,2	S/D	150	-	Sismo con epicentro en sector Quebrada Tarapacá. No existen registros de los daños producidos en la comuna de Iquique.	CSN (2014)
25-04-1949	09:54	19,750	69,000	7,3	S/D	110	-	Sismo con epicentro en sector Pampa de Sur. No existen registros de los daños producidos en la comuna de Iquique.	CSN (2014)
06-12-1953	16:18	22,100	68,700	7,4	S/D	128	-	El Terremoto de Calama de 1953 fue un movimiento telúrico que se percibió desde Tacna hasta Talca; las ciudades más afectadas fueron Calama, Tocopilla, Chuquicamata y Antofagasta. Murieron 3 personas, 15 quedaron heridas y 1.850 personas quedaron sin hogar. Se considera uno de los terremotos más grandes que están archivados en la historia de Chile, a pesar del poco material registrado.	El Mercurio Calama (http://www.mercuriocalama.cl/prontus4_notas/site/artic/20100328/pags/20100328000724.html)
08-01-1956	16:54	19,000	70,000	7,1	S/D	11	-	Sismo con epicentro en sector Quebrada Camarones. No existen registros de los daños producidos en la comuna de Iquique.	CSN (2014)
29-07-1957	13:15	23,500	71,500	7,0	S/D	S/D	-	Sismo con epicentro frente a las costas de Antofagasta. No existen registros de los daños producidos en la comuna de Iquique.	CSN (2014)
13-06-1959	20:12	20,420	69,000	7,5	S/D	83	-	Se sintió un fuerte sismo en el norte de Chile, con epicentro en Arequipa (Perú). Los poblados chilenos de Huara, Quillegua y Pozo Almonte sufrieron daños de alguna envergadura. No se registran daños en la comuna de Iquique.	Urrutia & Lanza, 1993
21-12-1967	22:25	21,800	70,000	7,5	S/D	33	-	Un sismo grado siete de intensidad en la escala de Mercalli (Urrutia & Lanza, 1993) remeció a Tocopilla. Ubo 1 muerte y 2 heridos graves. No se registraron daños en la comuna de Iquique.	Urrutia & Lanza, 1993
29-11-1976	21:40	20,520	68,919	7,3	S/D	82	-	Un sismo con epicentro en Pozo Almonte, a 60 km al este de Iquique, se sintió entre Arica y Taltal. Hubo derrumbes de viviendas, interrupción del tráfico ferroviario y 19 personas heridas. En la ciudad de Iquique, sólo se detectaron temblores por varios días; no hay daños registrados.	Urrutia & Lanza, 1993
08-08-1987	11:48	19,092	70,006	7,2	S/D	71,2	-	El terremoto de Tarapacá de 1987, también conocido como terremoto de Arica de 1987, se percibió entre Monquegua (Perú) y La Serea-Coquimbo (Chile). Se trató de un fenómeno «intraplaca», es decir, no produjo un rompimiento en el borde convergente ni desató alarmas de tsunami. Este terremoto dejó sueltas algunas edificaciones y partes del Morro de Arica, que colapsaron posteriormente con el terremoto de 2005, ocurrido cerca de este lugar. El sismo dejó un saldo de 3 personas fallecidas, 44 heridas y 923 damnificados.	USGS (http://web.archive.org/web/20140407085146/http://comcat.cr.usgs.gov/earthquakes/eventpage/centennial19870808154858#summary)
30-07-1995	01:11	23,360	70,310	7,3	8,0	47	T	Sismo con epicentro en sector Quebrada El Desesperado acompañado de tsunami. Según el catálogo de los principales tsunamis que han afectado a la costa de Chile del SHOA, el tsunami no habría llegado a las costas de Iquique (solamente a las ciudades de Arica, Antofagasta y Caldera).	CSN (2014) SHOA (2015)

Fecha	Hora Local	Lat (S)	Long (W)	Magnitud Ms	Magnitud Mw	Prof. [km]	Efecto	Descripción	Referencias
23-06-2001	15:33	15,910	73,620	S/D	8,2	33	T	Tras largas décadas de silencio sísmico, se produjo este devastador evento que causó muchas pérdidas humanas y materiales en el sur de Perú. Según los datos de RESISTE ARICA (Red Sismográfica Telemática de Arica), el epicentro tuvo las siguientes coordenadas: 15° 54.4' S, 73° 37.3' W, 33 km de prof. y una mag. M = 8,2. El sismo causó un tsunami que arribó sólo a algunas localidades de la costa peruana, causando pequeñas anomalías en el nivel del mar en las costas chilenas (Boroschek, et al., 2001). Según el catálogo de los principales tsunamis que han afectado a la costa de Chile del SHOA, el tsunami no habría llegado a las costas de Iquique. Este sismo causó mayores daños en territorio peruano, aunque en la Primera Región también fueron cuantiosos. En Arica: 500 personas afectadas, 20 damnificadas, 5 heridas, 159 casas destruidas, 240 con daño mayor, corte de caminos y daños en la estructura vial y portuaria, cuyo monto de reparación ascendió a los 397 millones de pesos (ONEMI, 2001). Un mes después del terremoto, el 24 de Julio de 2001 ocurrió un sismo superficial (Mw=6.3, ~10 km de profundidad) en la falla asociada a la Flexura Aroma, el cual, a su vez, habría tenido una réplica el 14 de enero del 2002 (Mw=5.9), que causó daños localizados (Fariás, et al., 2005).	Red Sismográfica Telemática de Arica Boroschek, et al., 2001 ONEMI, 2001 Fariás, et al., 2005 CSN (2014) SHOA (2015)
13-06-2005	22:44	19,895	69,125	7,8	7,8	108	-	Sismo de profundidad intermedia, epicentro a 53 km al NE de Pozo Almonte, a 111 kilómetros de profundidad y tuvo magnitud de M = 7,9. El movimiento telúrico causó la muerte de 11 personas y 6018 personas damnificadas, principalmente en las localidades rurales de Iquique. Los mayores daños estructurales lo sufrieron las casas y construcciones de adobe. En toda la región se generaron deslizamientos que cortaron las comunicaciones terrestres y dejaron a muchos pueblos aislados, además de provocar cortes en el suministro de energía eléctrica y agua potable (ONEMI, 2005). Fallecieron 6 personas producto de deslizamientos de tierra y roca en la ladera del cerro; la ruta A-16 presentó variados cortes producto de rodados y derrumbes de la ladera (ONEMI, 2009). Sernageomin reporta daños en casas y edificio - Marquard y Naranjo (2005).	ONEMI, 2005 Marquard y Naranjo (2005).
14-11-2007	12:40	22,314	70,078	7,5	7,7	108	-	El epicentro de este evento se ubicó aproximadamente a 40 km al Sureste de Tocopilla, abarcando desde las localidades de Tarapacá a Valparaíso. La mayor intensidad se percibió en Tocopilla. Según el reporte de este evento realizado por la ONEMI (2009), en la comuna de Iquique se presentaron cortes de energía eléctrica. La red vial presentó variados cortes fundamentalmente por rodados y derrumbes de laderas; en el tramo Tocopilla - Iquique, sector del Túnel Galleguillos, se presentaron derrumbes generando que 49 trabajadores quedaran aislados, y otras 40 personas aisladas en el sector de La Playa, las que fueron evacuadas por personal y embarcaciones de La Armada. El mayor daño en infraestructura vial se presentó en la Ruta 1, Antofagasta – Tocopilla– Iquique, particularmente en el sector del Túnel Galleguillo, lados sur y norte. El tránsito en la ruta se mantuvo interrumpido por varios días, con permanentes deslizamientos, lo que retardó el trabajo de despeje y reparación del camino.	ONEMI, 2005 ONEMI, 2009 CSN (2014)
01-04-2014	20:46	19,572	70,908	S/D	8,2	38,9	T	Conocido como el "terremoto de Iquique de 2014" o "terremoto del Norte Grande del 2014". Afectó a las regiones de Arica y Parinacota, Tarapacá y Antofagasta (Chile) y al departamento de Tacna (Perú) y tuvo una magnitud de 8,2 a 8,3 MW. Se elevó la alerta de tsunami, siendo evacuadas cerca de 1.000.000 de personas a lo largo de todo el borde costero de Chile (ONEMI, 2014) [1]. El Sernageomin hizo reportes de daños en casas - Marín y Bobadilla (2014), colegios - Bobadilla et al (2014), el puerto y el monumento al marinero desconocido – Marín et al (2014a) y de efectos del tsunami sobre las playas Marín et al (2014b).	ONEMI (2014) CSN (2014)

Fuente: Elaboración propia a partir de referencias citadas en el cuadro.

Fecha: día, mes y año en que ocurrió el evento catastrado.

Hora local: hora local aproximada a la que habría ocurrido el sismo. Si está registrada esta información, se indica como S/D (Sin Datos).

Lat (°): latitud del epicentro del sismo medida en grados sexagesimales.

Long (°): longitud del epicentro del sismo medida en grados sexagesimales.

Magnitud Ms: magnitud del sismo según escala de Richter. Si no está registrada esta información, se indica como S/D (Sin Datos).

Magnitud Mw: magnitud de momento del sismo. Si no está registrada esta información, se indica como S/D (Sin Datos).

Prof. (km): profundidad medida en kilómetros del foco o hipocentro del sismo. Si no está registrada esta información, se indica como S/D (Sin Datos).

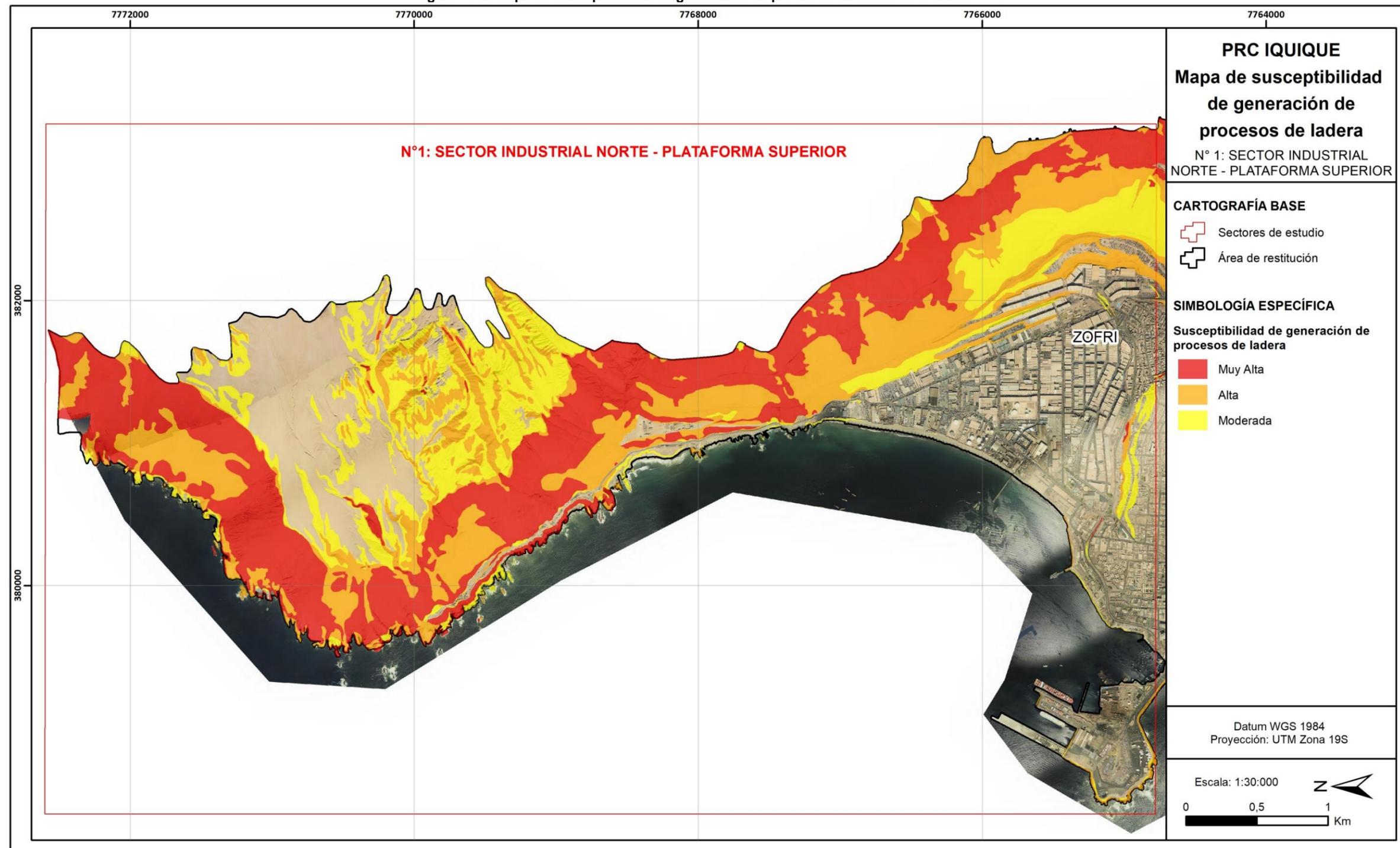
Efecto: efectos de tsunamis asociados a cada evento sísmico. Se denota con: T (Tsunami menor), TM (Tsunami moderado) y TD (Tsunami destructor y mayor). Fuente: GUC - NEIC

Descripción: explicación sobre el evento ocurrido enfocada en los daños ocasionados.

Referencias: fuentes de información utilizadas en la descripción del evento.

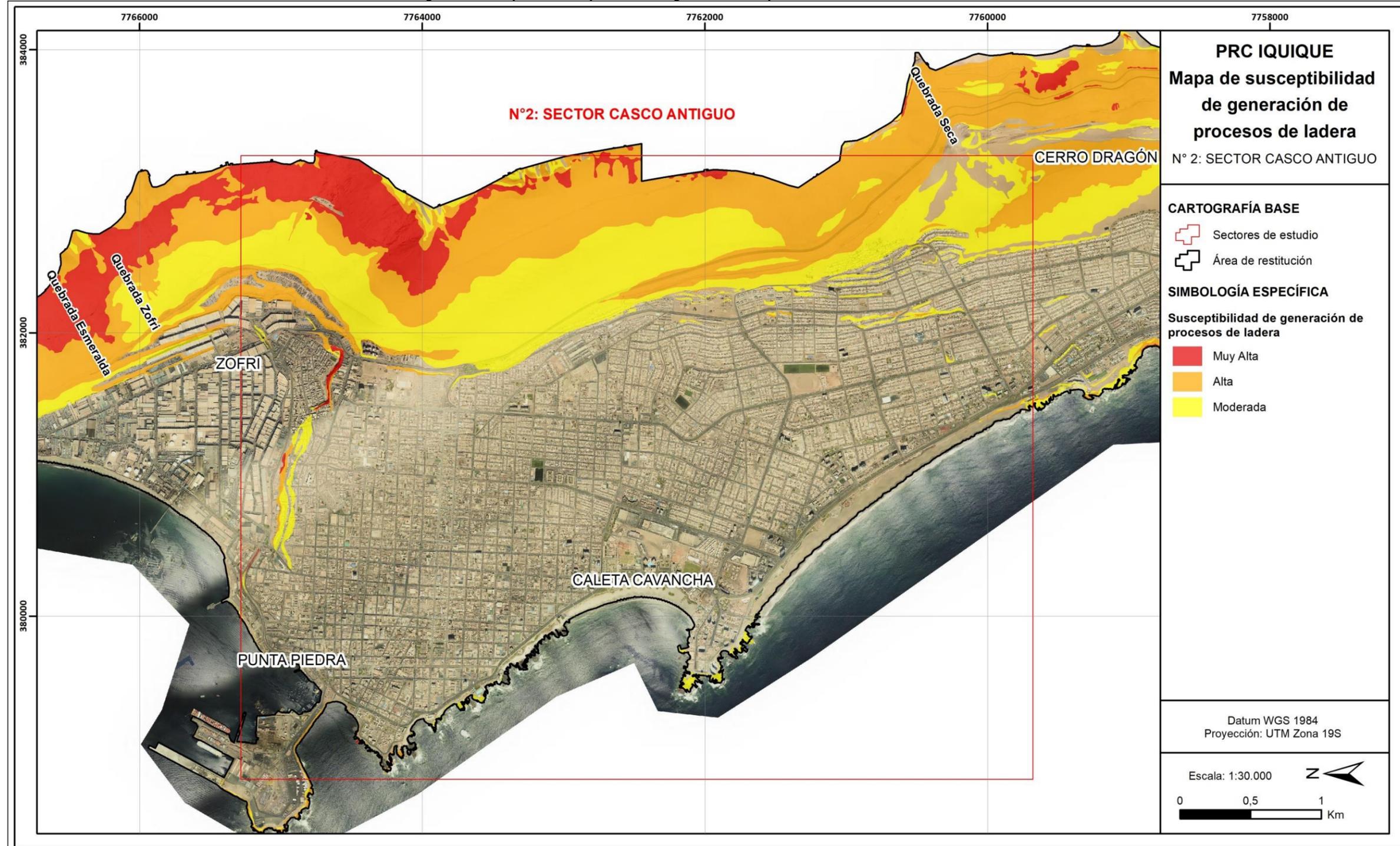
11.6 MAPAS DE SUSCEPTIBILIDAD DE GENERACIÓN DE PROCESOS DE LADERAS

Figura 11-3: Mapa de susceptibilidad de generación de procesos de ladera en el sector N°1.



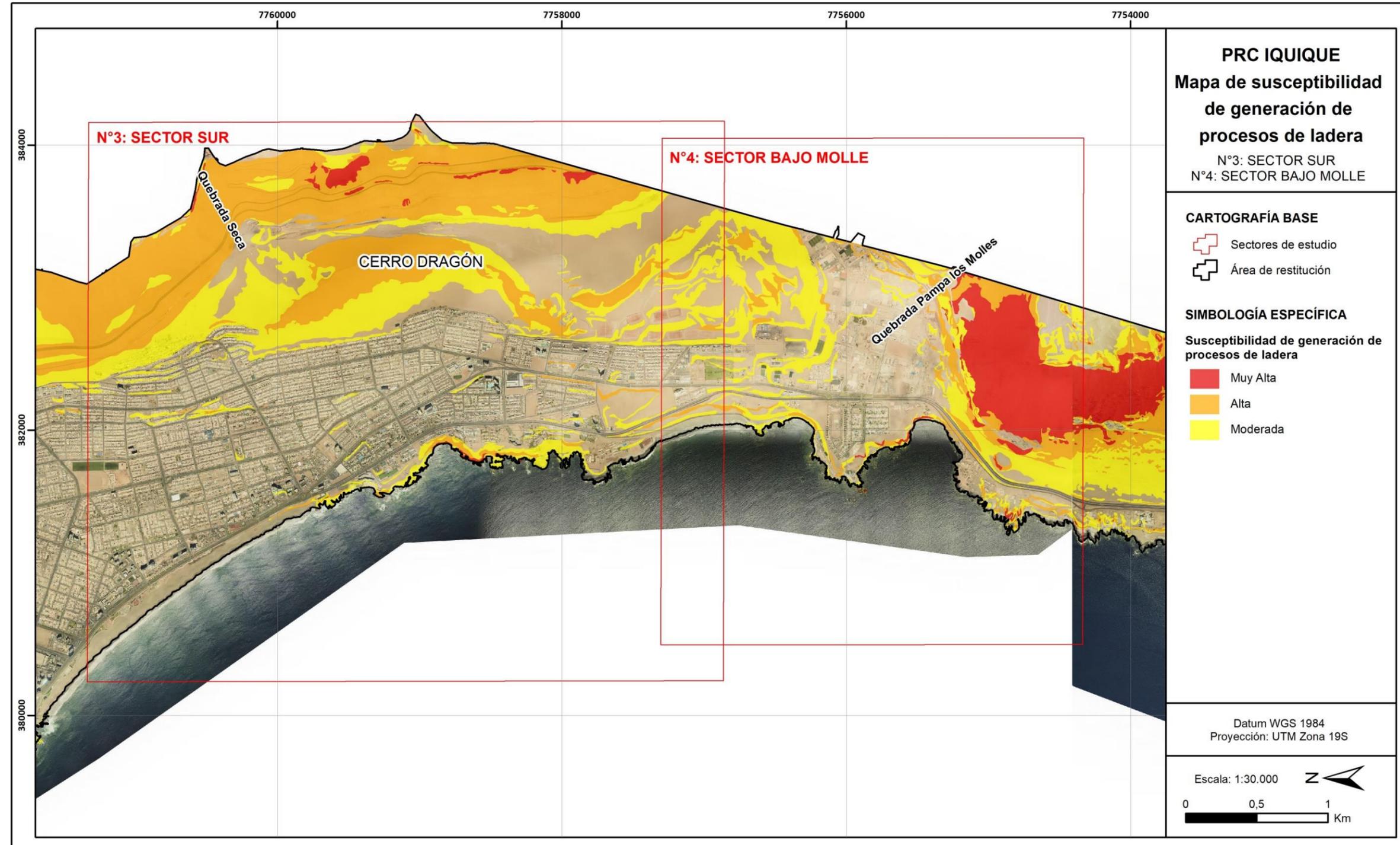
Fuente: Elaboración propia

Figura 11-4: Mapa de susceptibilidad de generación de procesos de ladera en el sector N°2.



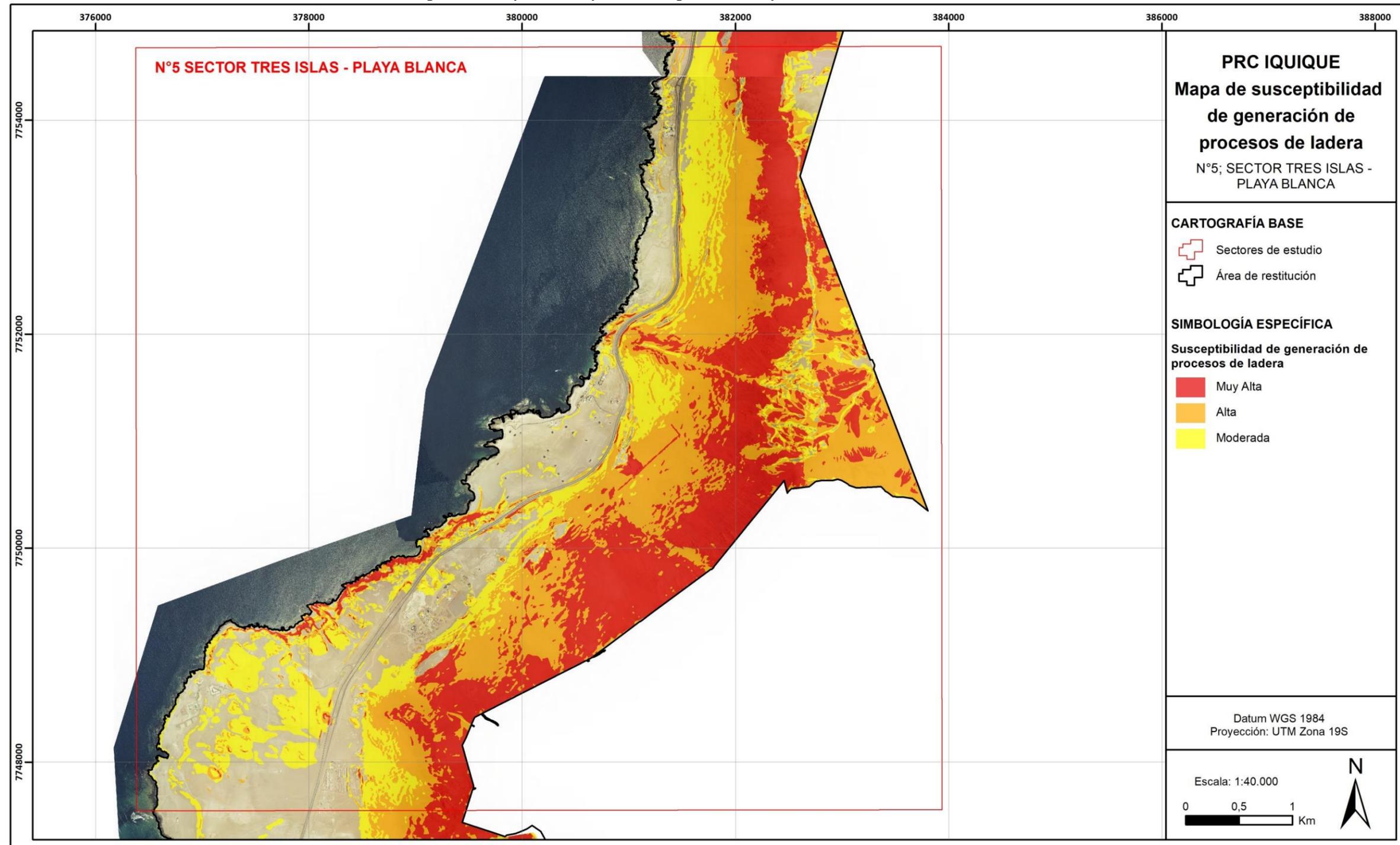
Fuente: Elaboración propia.

Figura 11-5: Mapa de susceptibilidad de generación de procesos de ladera en los sectores N°3 y 4.



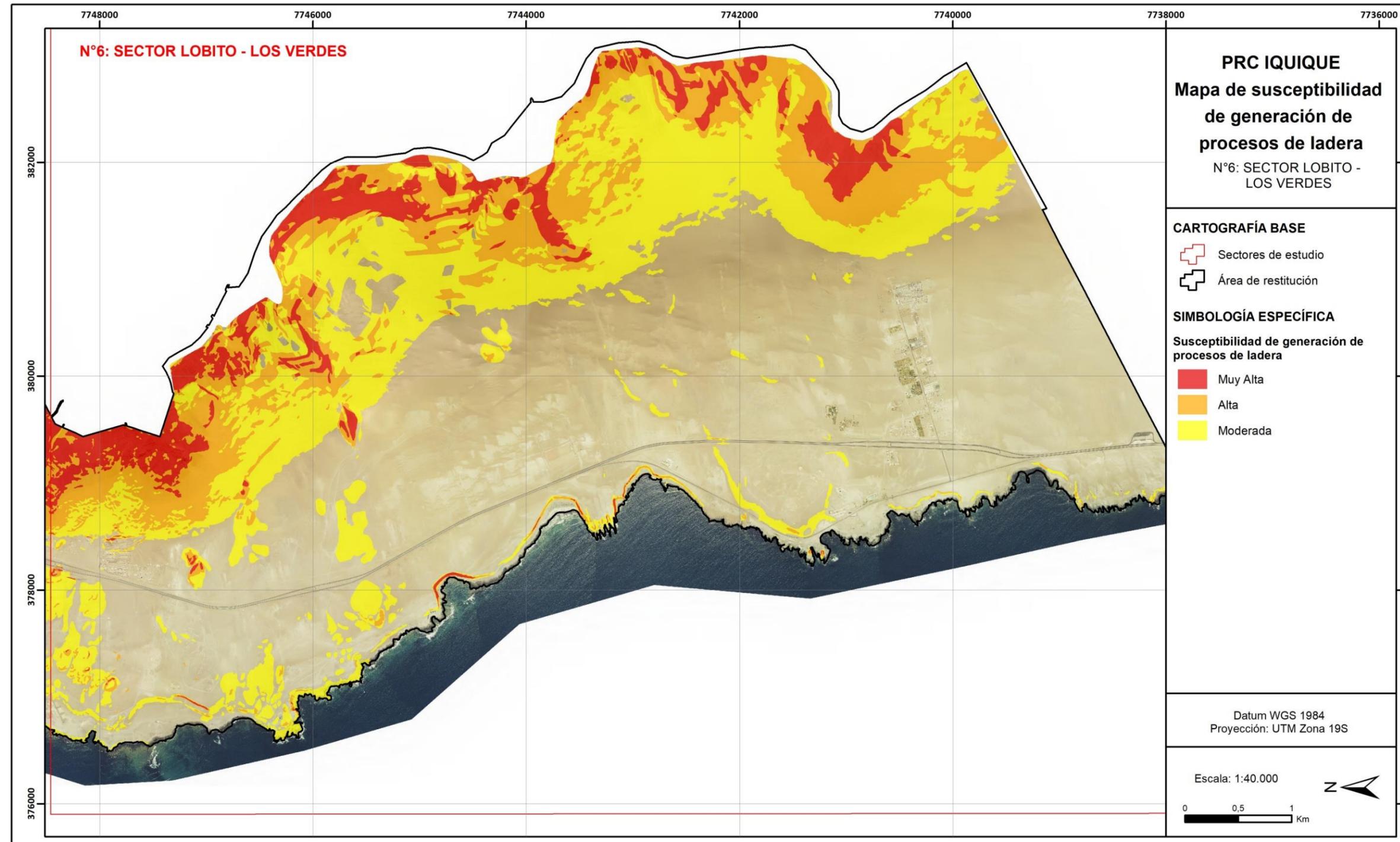
Fuente: Elaboración propia.

Figura 11-6: Mapa de susceptibilidad de generación de procesos de ladera en el sector N°5.



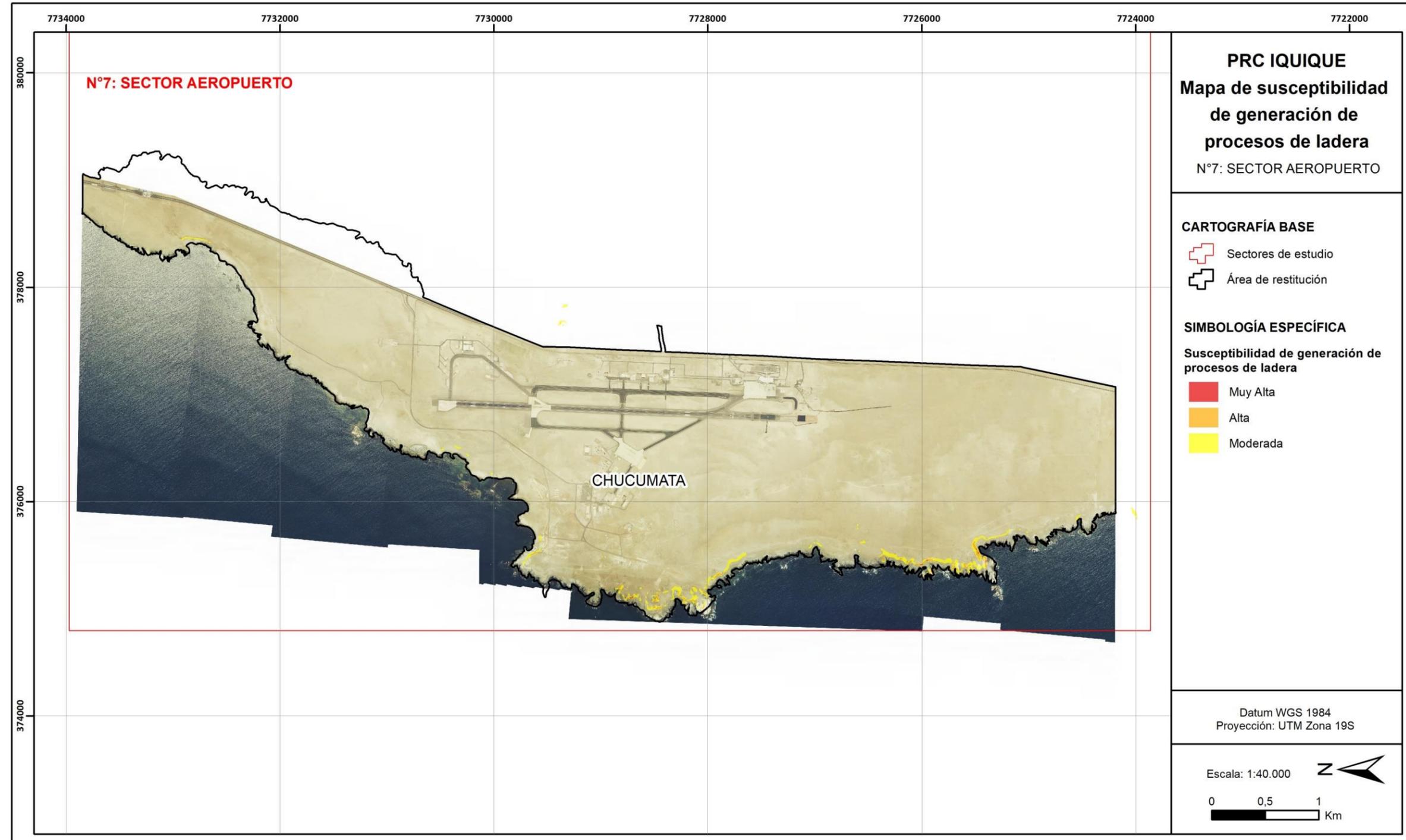
Fuente: Elaboración propia.

Figura 11-7: Mapa de susceptibilidad de generación de procesos de ladera en el sector N°6.



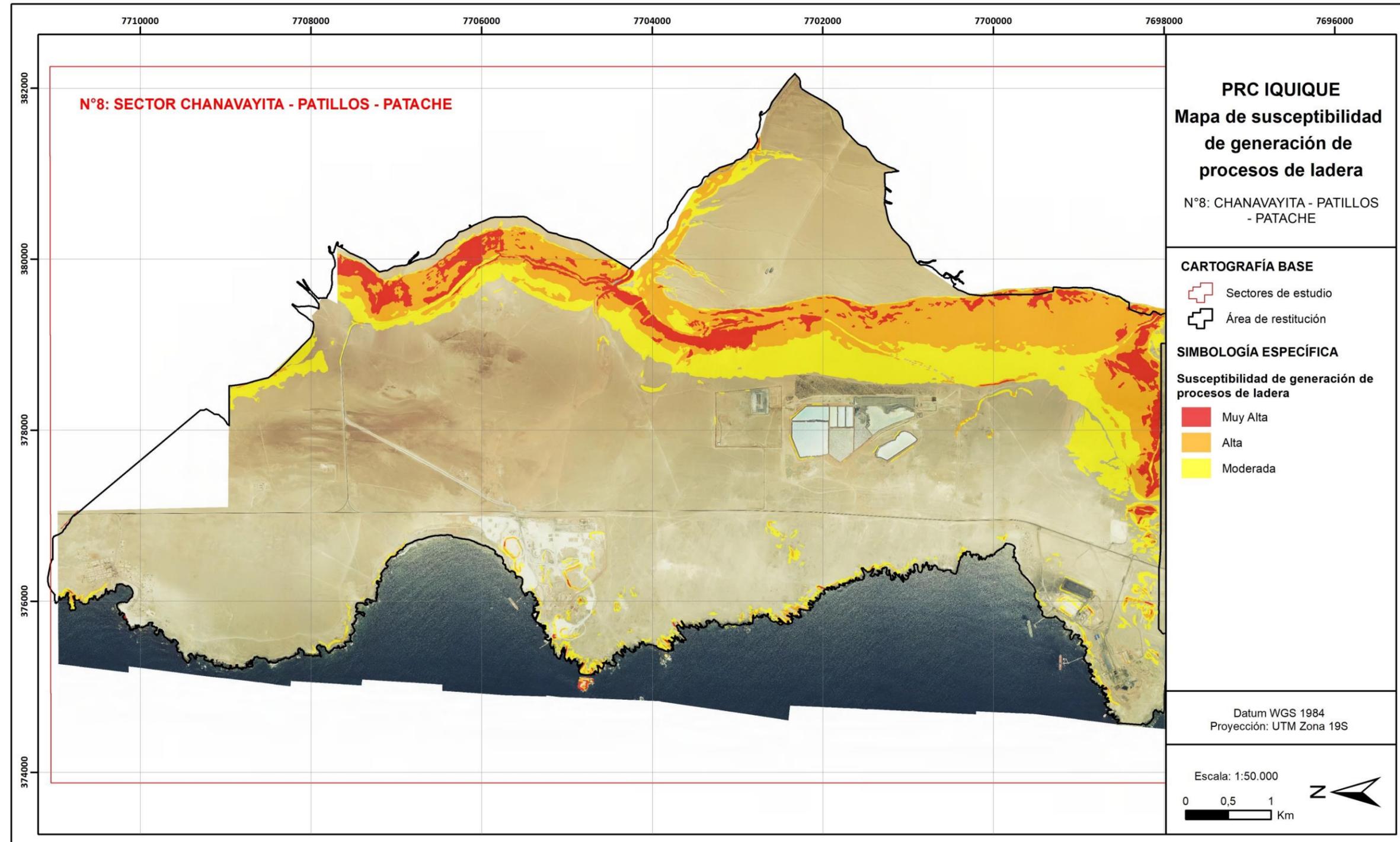
Fuente: Elaboración propia.

Figura 11-8: Mapa de susceptibilidad de generación de procesos de ladera en el sector N°7.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 11-9: Mapa de susceptibilidad de generación de procesos de ladera en el sector N°8.



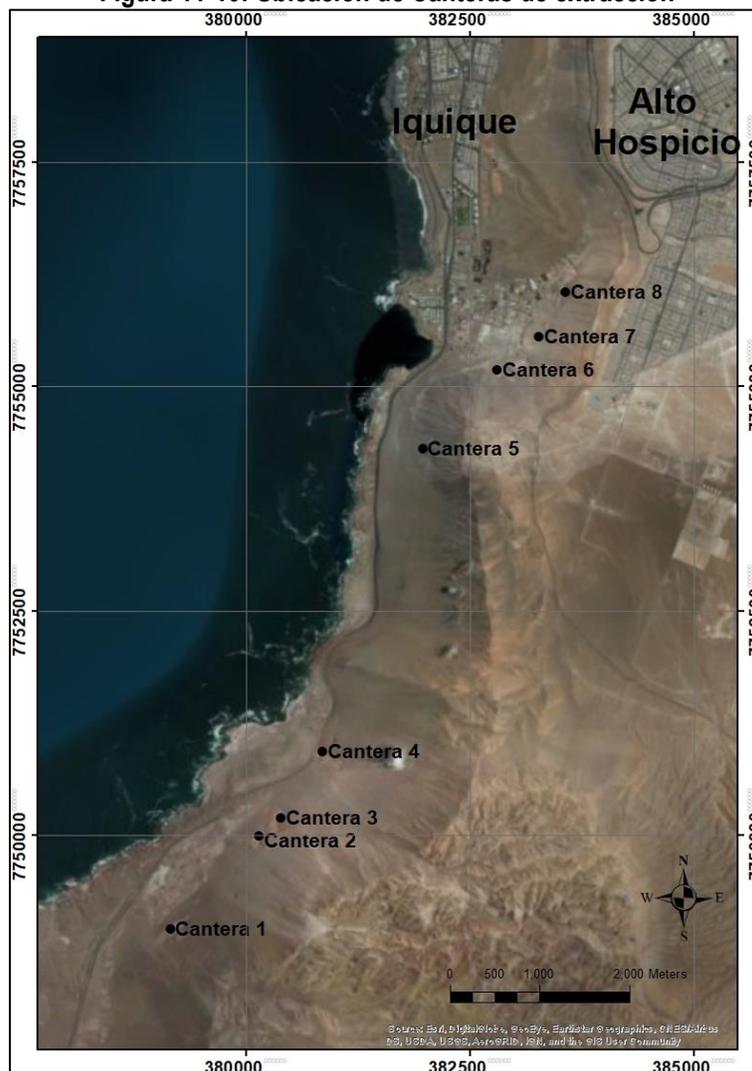
Fuente: Elaboración propia.

11.7 ANÁLISIS GEOTÉCNICO DE CANTERAS

11.7.1 Introducción

La característica común de los sectores esta relacionados a la ubicación que estos tienen sobre el farellón costero y cercanas a rutas de alto tránsito. Estas condiciones geomorfológicas y urbanas hacen urgente la necesidad de identificar el estado actual de las canteras y su radio de influencia ante una eventual inestabilidad producto de sus componentes geotécnicos.

Figura 11-10: Ubicación de Canteras de extracción



a) OBJETIVOS

- Identificación del estado actual de canteras ubicadas en el sector Bajo Molle, Los Verdes y Playa Blanca, registrando el modo de las operaciones de extracción y su influencia en la estabilidad de taludes.
- Análisis de unidades geotécnicas, caracterizando sus propiedades geotécnicas, relación entre unidades y con el talud en operación.
- Estimación de radio de influencia de las canteras como producto de deslizamientos o caídas de roca, especificando la metodología y parámetros utilizados, como también el levantamiento de los

principales agentes que deben mitigarse para el control de peligros y susceptibilidades de deslizamientos.

b) ALCANCE

El alcance de este estudio está basado en antecedentes recopilados de la literatura y observaciones de terreno, por lo que no se considera la realización de ensayos de laboratorio directos o en terreno. Los resultados están enfocados en determinar el alcance de potenciales deslizamientos y caídas de material desde los taludes en su condición actual, entregando lineamientos para futuros diseño de protección y optimización de ángulos de talud.

c) METODOLOGIA GENERAL

La metodología considera la identificación de las unidades geotécnicas y su correlación en las canteras estudiadas. Se realiza un análisis de la información disponible en la literatura, y observaciones de terreno, a fin de caracterizar secciones geotécnicas indicando las propiedades de las unidades que la componen.

Posteriormente, se realiza un análisis de estabilidad de los taludes, mediante una evaluación de los principales modos de falla para las unidades que gobiernan el comportamiento del talud. En este sentido, se busca determinar el Factor de Seguridad (FS) o el Factor de Resistencia (SF) del macizo rocoso sometido a un escenario sísmico y no sísmico.

Finalmente se delimitan los alcances de posibles deslizamientos o caídas de roca que pudieran generarse en las canteras individualmente y se determinan los principales componentes de estudio para futuras evaluaciones de mitigación en términos de diseños de estructuras o taludes.

11.7.2 ANTECEDENTES GEOTECNICOS DEL AREA

a) Catastro del estado actual de canteras

En el año 2008, Karzulovic y Asociados Ltda. realizó un levantamiento del estado de las canteras ubicadas en Bajo Molle y Playa Blanca, emitiendo una nota técnica donde se evaluó el potencial daño a personas y equipos trabajando en el sector (Nota Geotécnica IMI2008-01, 2008).

- La explotación se realiza sin planificación, lo que incluso incluiría actividades de perforación y tronadura.
- No existe evaluación de los ángulos de estabilidad de los taludes, incluso en aquellos que presentan afloramientos de roca. Algunos sitios tienen ángulos adversos y bloques colgados, sin bermas de contención a fin de disminuir la altura de los taludes.
- Posibles terremotos podrían generar una acción acumulativa de daño en el macizo rocoso la cual podría activarse por una condición de fuertes vientos y lluvias.
- Pretilos de contención no serían suficientes para mitigar el efecto de un deslizamiento, sino que el cambio en el diseño es la alternativa más sugerible para evitar desprendimientos repentinos de material.

En base a estas observaciones, se realizó un mapeo en terreno en Marzo 2018 a fin de detallar la condición actual de las canteras en términos operacionales y de diseño de los sitios identificados en la Figura 11-10, como también el tipo de material y la relación de las unidades geotécnicas presentes en el área, las que se definen a continuación (basado en BS5930:2015, BS14689-14688)

- Gravas de Alto Hospicio: GRAVA muy arcillo limosa dura, con clastos subangulares finos a gruesos de roca ígnea subvolcánicas, parcialmente cementada con Halita, color café claro. Alta Resistencia en talud (soporta ángulos $\sim 50^\circ$) y de fácil compresión con la mano al encontrarse como material no

cohesionado. Presenta planos de depositación espaciados a 40 cm, con contenidos de arcilla. En los planos exteriores se observa contenido salino lo que podría generar una falsa (mayor o menor) resistencia al rayado o golpeteo.

- Formación Punta Barranco: BASALTO a BASALTO ANDESITICO muy resistente, con 2 set estructurales subverticales de orientación N70E y N20W. Bloques de gran tamaño (0.5- 2 m) se encuentran típicamente en la pata del talud a lo largo de todos los afloramientos. En general las estructuras presentan una baja apertura (~1 - 5mm) y se encuentran rellenas de arena, por efecto gravitacional de los niveles superiores. El color de la roca varía de acuerdo con la ubicación, siendo gris oscuro en el sector de Playa Blanca y gris claro en los afloramientos del sector Bajo Molle. La excepción a estas litologías se encontró en el sector de Cantera 5, donde se caracterizó como una ARENISCA muy resistente, con planos de depositación horizontales medianamente espaciados (20-60 cm), color verde claro y grano fino a grueso. Las discontinuidades están medianamente espaciadas (50-100 cm) con orientación subvertical (75°-80°), rugosidad suave y de apertura variable (0.5 a 10 cm) con relleno de arena y limo seco.
- Depósitos No Consolidados: GRAVA gruesa arenosa, con clastos subangulares, de tamaño variable (3 – 30 cm) de roca volcánica y subvolcánicas, sin cementación. Baja Resistencia en la pendiente, por lo que genera conos de depositación en las paredes del talud, las que son removidas por los equipos de carguío y transporte y depositados en el borde de la plataforma de trabajo (posterior a la clasificación por harneros) para aumentar el área a medida que avanza la extracción.
- Depósitos Antrópicos: Bolones a Grava gruesa, con clastos polimícticos de tamaño variable (10 cm a 50 cm) depositados en el borde de la plataforma de trabajo como material de descarte, por lo que descansan sobre el ángulo de la ladera, sin un trabajo de compactación más que el peso del paso de equipos. Su distribución longitudinal alcanza la mayor parte del área de trabajo de las canteras, pero su potencia es variable entre los sitios.

En base a estas unidades, se presentan a continuación las observaciones realizadas en cada sitio y las relaciones existentes entre operación, geometría y unidades. La nomenclatura de las canteras está referida a la Figura 11-10.

i) Cantera 1

Cantera en actual explotación de extracción de áridos para obras de construcción, la cual se ha mantenido bajo operación esporádica desde hace más de 50 años. Actualmente presenta dos bancos, siendo el inferior el de recopilación de material, que es desbordado por equipo de apoyo (excavadora) desde el nivel superior (ver Figura 11-11). La extensión lateral de la cantera es de 400 metros aproximadamente, lo que cubre un área suficientemente extensa para el tránsito de equipos de carguío y transporte, como también la acumulación y clasificación de material (correas y harneros móviles).

Los taludes tienen una inclinación semi vertical, con material colgado lo que genera paredes aún más verticales (ver Figura 11-12). En la pata, el material que cae desde los niveles superiores (no consolidado) genera conos que ayudan en la estabilidad de la pared, pero debido a su baja altura y rápida de extracción su aporte es solo esporádico. Existen depósitos no consolidados que se han utilizado como relleno del banco inferior, el cual es potencialmente susceptible de deslizamientos debido a su baja consolidación, conteniendo además de depósitos antrópicos.

Figura 11-11: Esquema Cantera 1



La potencia de la unidad de depósitos no consolidados es cercana a 3 metros en su estado original (sin rellenos que caen de la operación), los que se observan en el corte superior, generando conos en los taludes que no están siendo explotados. En el caso de las Gravas de Alto Hospicio, estas muestran una potencia mayor que abarca todo el talud de la cantera, con planos de depositación que caen hacia el Oeste en 20° a 25° , siendo cortada su continuidad en el banco superior por la unidad de depósitos no consolidados.

El afloramiento de roca presenta estructuras con manto subvertical ($70^\circ W$) los que se midieron a distancia desde la berma superior. Se observa la presencia de una zona de falla en los bloques superiores, donde existe el contacto del afloramiento con las Gravas de Alto Hospicio.

Figura 11-12: Fotografía tomada desde banco superior de la cantera. A la izquierda hacia la cresta del talud, y a la derecha hacia la pata.



ii) Cantera 2

Se ubica a 1.2 km al NE de la Cantera 1. Inicia faena en 1990 operando esporádicamente. Presenta una extensión de 150 metros aprox., en dos bancos, siendo explotada solo desde el sector inferior. El área de trabajo contempla instalaciones, máquinas de clasificación (harneros y correas), además de un pequeño taller y camino de paso de vehículos.

El talud consiste en 100% Gravas de Alto Hospicio, con algunos afloramientos de roca lejanos a la cresta del talud superior (ver Figura 11-13), y una cobertura de material no consolidado (potencia 1 - 3 metros) que se presenta desde la cresta superior hacia arriba. La pared es prácticamente vertical, con algunos conos de material desprendidos por efecto eólico y de la operación con cargador.

Existe material apilado como descarte de la operación, el cual rellena y aumenta el área de operación de la cantera. Este relleno se realiza sobre la unidad de depósitos no consolidados con material principalmente de tipo grava gruesa a bolones, el cual se habría desplazado por efecto del terremoto de Iquique en 2014. No fue posible identificar grietas de tensión debido a que se encuentra actualmente reparado con nuevos rellenos.

Figura 11-13: Fotografía Cantera 2



iii) Cantera 3

Ubicada a solo 250 metros de Cantera 2, actualmente no se encuentra en operación. Presenta una pared casi vertical, donde se observa una cobertura de Depósitos No Consolidados (1-2 metros) sobre Gravas de Alto Hospicio, con una altura de 50 metros como una sola pared. Conos de acumulación de material suelto se ubica en la pata del talud, cubriendo unos 15 metros desde el suelo (Figura 11-14).

Figura 11-14: Fotografía Cantera 3

Por sobre 25 metros de la cresta del talud se observa afloramiento de roca, la cual ha soltado bloques que deslizan por la pendiente en conjunto al material coluvial. Esta roca se encuentra hiperfracturada por potencial efecto gravitacional. Presenta una matriz microcristalina, con minerales de alteración (epidota y clorita), color gris oscuro y muy resistente al golpe con el martillo geológico. Y podría ser clasificada como Diorita o Andesita. El afloramiento es menos extenso y con un espesor menor al de la Cantera 1, dificultando medir sets estructurales dominantes.

En general, el área de operaciones no es densa en instalaciones, pero presenta un sector de descarga de material con gravas gruesas (Figura 11-15), las que no muestran evidencia de grietas de tensión o posibles desplazamientos.

Figura 11-15: Fotografía de sector descarga Cantera 3

iv) Cantera 4

Cantera en operación, a 900 metros de Cantera 3 hacia el NE. Pared de 70 a 100 metros de alto, sin berma intermedia y con conos de acumulación a la mitad del talud, generados por efecto de fuertes vientos y de operación con cargador frontal (Figura 11-16).

La pared es casi vertical, compuesta de Gravas de Alto Hospicio en su mayoría con planos de depositación manteando $20^{\circ}W$, con una cobertura de material no consolidado cercana a 2 metros, la cual aumenta en potencia hacia los costados por existencia de quebradas. La extensión de la cantera es de 120 metros, lo que concentra en una pequeña área una gran cantidad de material colgado en las paredes (ver

Figura 11-17). No se observa afloramiento de roca en el sector de extracción, pero sí en el camino de ingreso a la cantera el cual se encuentra en la pata del botadero.

Figura 11-16: Fotografía Cantera 4. A la izquierda imagen de frente a la cantera, a la derecha la fotografía apunta hacia el sur.

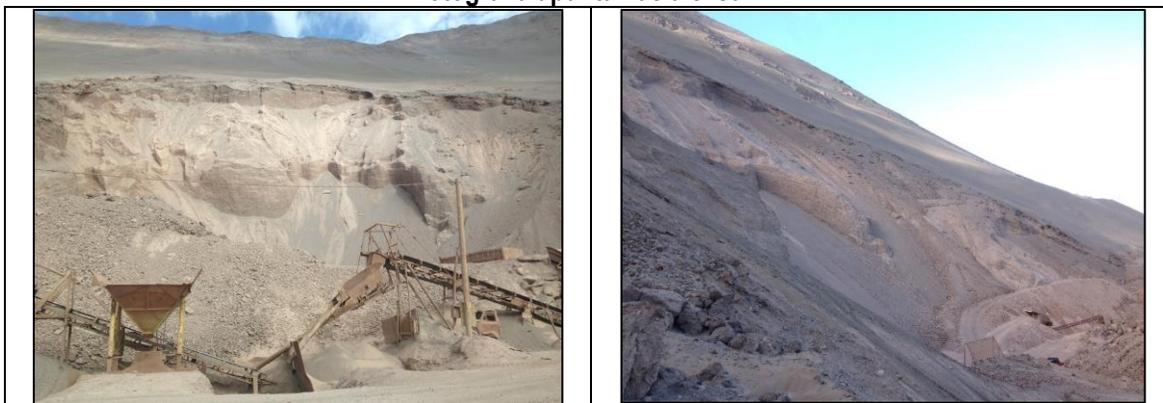
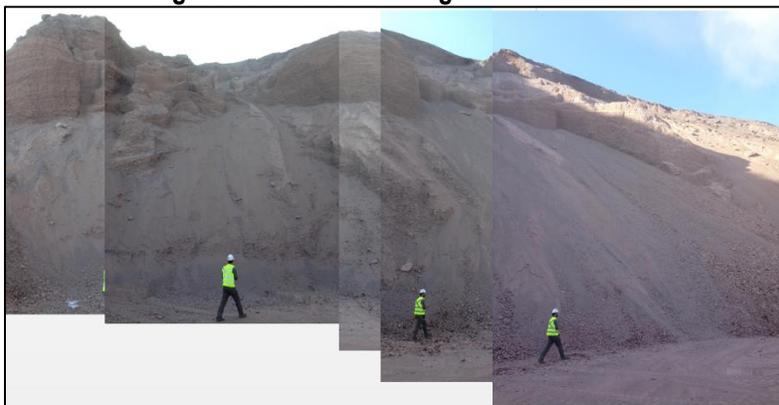


Figura 11-17: Material colgado en Cantera 4



Existe además un área de instalaciones y equipos de clasificación no muy amplia que obliga a realizar desbordes y rellenos hacia afuera del talud, acumulando material en la pendiente del cerro aguas abajo. Estos son bloques de entre 0.5 a 1 metro, los que en conjunto a gravas gruesas generan la plataforma de operación.

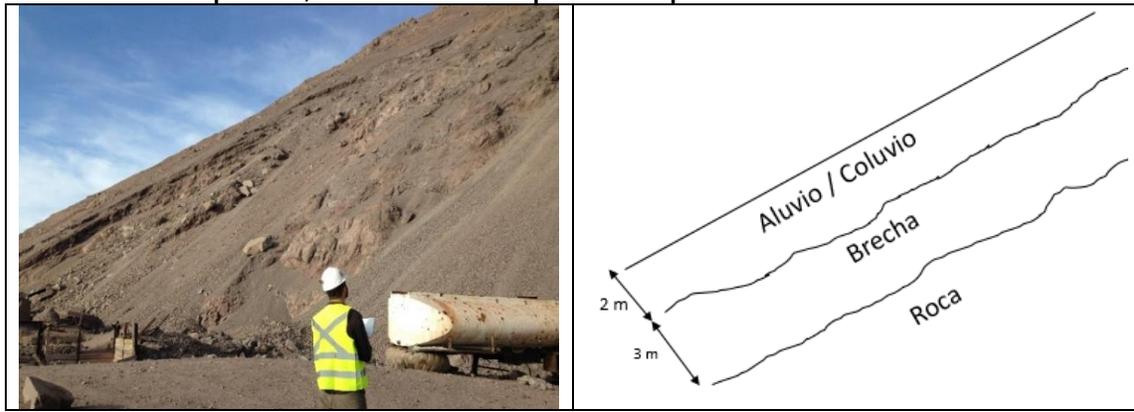
En conversación con personal que opera en el área, se registra que este sector se desplazó hacia abajo durante el terremoto de Iquique 2014, aunque ya se encuentra reparado (no se observan grietas de tensión). Sin embargo, hasta el momento es la cantera que se encuentra más cercana a un camino en operación (Ruta 1), y sus desmontes llegan a la berma de la ruta.

v) Cantera 5

Ubicada a 3.500 metros al NE de la Cantera 4, esta cantera se encuentra actualmente abandonada. Presenta un sector norte y otro sur, diferenciados por el tipo de roca presente, a una distancia de 220 metros entre ellos. Ambos taludes tienen orientación 40-50/270.

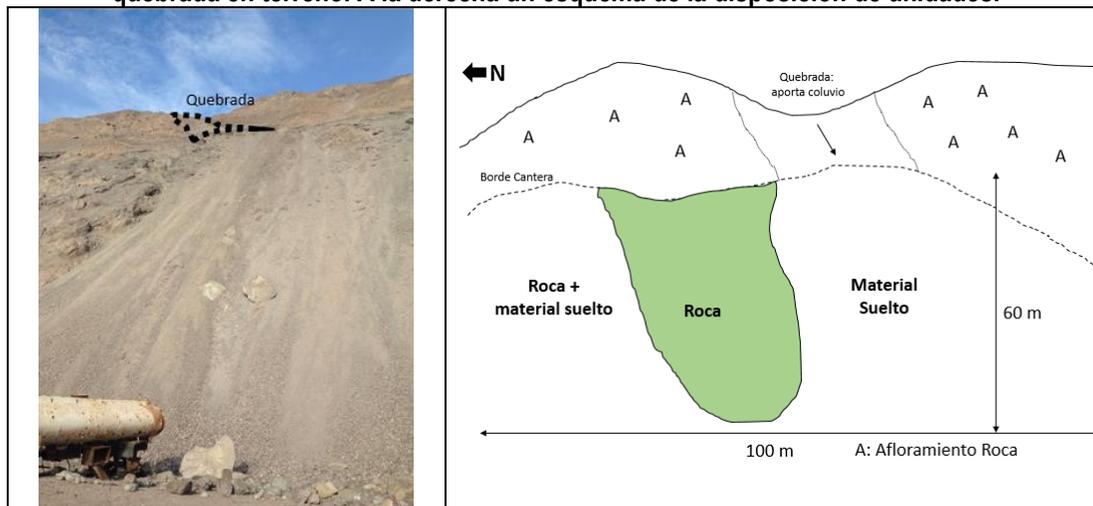
El sector norte de la cantera presenta conos extensos (en altura) de material coluvial y aluvial, cubriendo una unidad de brecha (ver Figura 11-18). La brecha presenta clastos polimícticos (1-20 cm) de matriz soportada la cual es cementada con halita, conteniendo además bolones de gran tamaño (<1 m), siendo esta secuencia limitada por afloramientos de roca lateral y verticalmente. La roca es caracterizada geotécnicamente como: "BASALTO muy resistente diaclasado, de color verde grisáceo con grano fino a medio grueso".

Figura 11-18: Fotografía Cantera 5 - Sector Norte. A la izquierda el límite norte con las unidades expuestas, a la derecha un esquema de la potencia de las unidades.



A diferencia de las canteras anteriores, en esta se reconocen 3 unidades geotécnicas distintas, las que podrían representar diferentes mecanismos de deslizamiento. La Figura 11-19 esquematiza una sección frontal de la cantera y la extensión relativa de las unidades. Se observa que el sector de depósitos no consolidados es generado por descarga natural de material desde una quebrada ubicada en el borde superior, y no sería íntegramente parte de la unidad de Gravas de Alto Hospicio removida por efecto de antiguas operaciones.

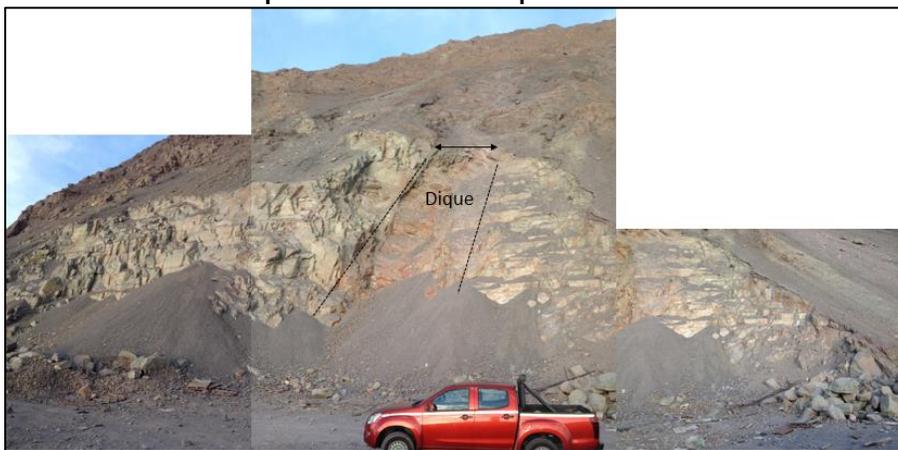
Figura 11-19: Sección frontal de la Cantera 5-Norte. A la derecha fotografía mostrando disposición de quebrada en terreno. A la derecha un esquema de la disposición de unidades.



El sector sur de la cantera tiene una extensión de 70 metros de roca y material depositado en conos a la pata del talud, provenientes del material suelto en la cresta. El Talud presenta una altura de 30 a 40 metros con una pared semi vertical, que fue sometida a tronaduras (presencia de bolones e información entregada por gente local). Se observan dos sets de discontinuidades: 75/280 y 80/30, sumadas a los planos de depositación (ver Figura 11-20).

La unidad principal de roca corresponde a una "ARENISCA muy resistente, con planos de depositación medianamente espaciados (20-60 cm), color verde claro y grano fino a grueso. Las discontinuidades están medianamente espaciadas (50-100 cm) con orientación subvertical (75° - 80°), rugosidad suave y de apertura variable (0.5 a 10 cm) con relleno de arena y limo seco". El dique es caracterizado como una estructura secundaria, de extensión lateral no mayor a 10 metros: "Dique ANDESITICO muy resistente, color rojizo con tamaño de grano medio fino".

Figura 11-20: Fotografía Cantera 5 - Sur. Los recuadros blancos corresponden a sectores que quedaron fuera a de la panorámica.



Es importante mencionar que en ambas canteras se encuentra un botadero de material de descarte, depositado hacia la ladera inferior, compuesto por bolones y gravas gruesas. En todo el sector se identifican persistentes grietas de tensión con una apertura de 10 cm en promedio (Figura 11-21).

Figura 11-21: Fotografía de grieta de tensión en sector de descarte de Depósitos Antrópicos.



vi) Cantera 6

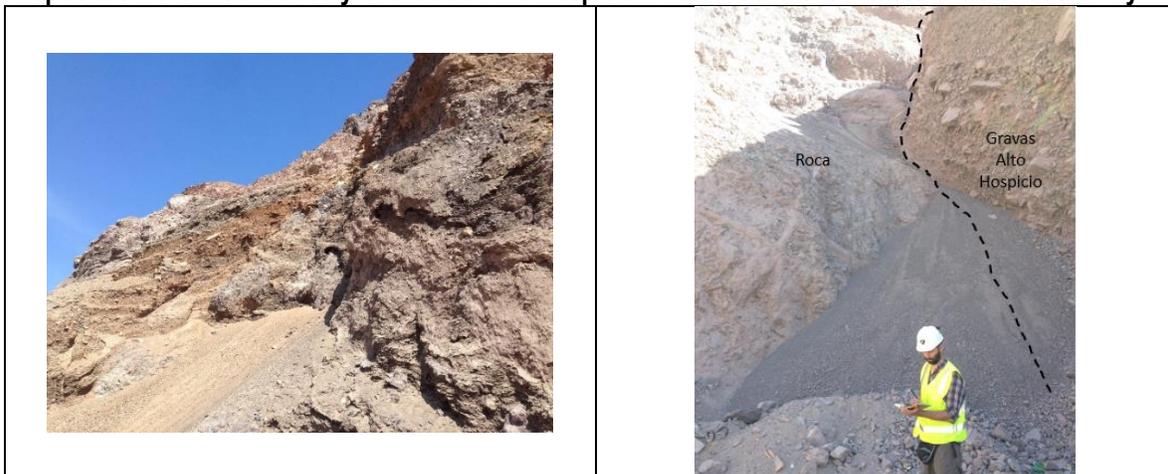
Ubicada en sector Bajo Molle, actualmente en operación. Se identifican 5 sectores caracterizados de acuerdo con la condición de las unidades (Figura 11-22).

Figura 11-22: Sectores geotécnicos identificados en Cantera 6



- Sector 1: Presencia de grandes bloques de 1 a 2 m de diámetro provenientes de desprendimientos de roca desde la cima de la ladera. Esto ha provocado que el material coluvial se haya desplazado con mayor frecuencia hacia los niveles inferiores, permitiendo que el límite de los depósitos no consolidados con las Gravas de Alto Hospicio no sea muy claro en la parte más norte del sector (Figura 11-23).

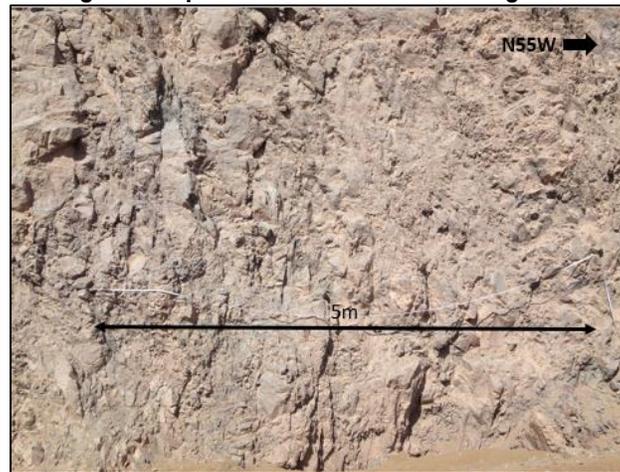
Figura 11-23: Fotografía Cantera 6 - Sector 1. A la izquierda fotografía del sector más norte, con Depósitos No Consolidados y Gravas de Alto Hospicio. A la derecha el contacto entre el Sector 1 y 2.



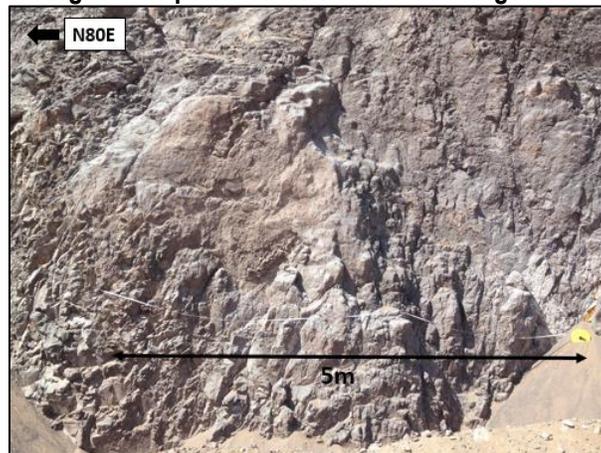
- Sector 2: Pared en roca hasta escarpe de la cantera, con extensión de 50 metros hasta contacto con dique. Se realizó una línea geotécnica de 5 metros (
- Figura 11-24), la cual permitió identificar dos sets de fracturas, tal como se muestra en el
- Cuadro 11.7-1.

Cuadro 11.7-1: Resumen línea geotécnica Cantera 6 - Sector 2

Roca	BASALTO muy resistente, 2 set estructurales perpendiculares, gris claro de grano fino.
Set 1	Tipo Joint, orientación $80^{\circ}/70^{\circ}$, Persistencia alta (>3m), espaciamiento variable (10-30 cm). JRC:6-16, Amplitud:5cm, Apertura: 5-0.2mm, Relleno: arena fina, Humedad: Seco.
Set 2	Tipo Joint, orientación $60^{\circ}/340^{\circ}$, persistencia alta (>3m), espaciamiento variable (5-15 cm) JRC:4-16, Amplitud: 5-10 cm, apertura: 0.5-1mm, relleno: arena fina, humedad: seco
GSI	60-50

Figura 11-24: Fotografía de pared sobre se realiza línea geotécnica en Sector 2.

- **Sector 3:** Pared en roca, sector de contacto Dique-Caja. Presenta 2 set estructurales de fracturas, los cuales tienen una menor rugosidad y apertura que en el Sector 2, también se encuentran menos espaciados. Aquellas fracturas paralelas a la orientación del dique cambian su ángulo de inclinación manteniendo en la dirección del intrusivo. Se realizó una línea geotécnica tomando como base la pared de la Figura 11-25, en donde se encontraron valores de GSI entre 60 y 70, tal como muestra el Cuadro 11.7-2.

Figura 11-25: Fotografía de pared sobre se realiza línea geotécnica en Sector 3.

Cuadro 11.7-2: Resumen línea geotécnica Cantera 6 - Sector 3

Roca	BASALTO muy resistente, 2 set estructurales perpendiculares, gris claro de grano fino.
Set 1	Tipo Joint, orientación 80°/60°, Persistencia alta (>3m), espaciamiento variable (5-20 cm). JRC:2-6, Amplitud:3-5cm, Apertura: <1mm, Relleno: arena fina, Humedad: Seco.
Set 2	Tipo Joint, orientación 60°/340°, persistencia alta (>20m), espaciamiento variable (<10 cm) JRC:2-6, Amplitud: <5 cm, apertura: <0.5mm, relleno: arena fina, humedad: seco
GSI	70-60

Sector 4: Dique, con extensión de 10 m. Se estima valor GSI de 60, en pared con orientación N10W. Sin embargo, la zona cercana al contacto del dique con la roca caja, se encuentra mayormente fracturada con bloques de menor tamaño, disminuyendo progresivamente el valor del GSI desde el Sector 3 a 4 en la caja, llegando a un valor de GSI 40-30 (ver Figura 11-26). No es posible realizar medición geotécnica, debido a la condición de material colgado en el talud, como también la dificultad de acceder hacia la pared (material en la pata del talud). Posterior a esta zona, la pared muestra el contacto roca-suelo nuevamente (ver Figura 11-27).

Figura 11-26: Fotografía Cantera 6 - Sector 4. A la izquierda el contacto Dique-Roca Caja. A la derecha sector alejado del Dique.

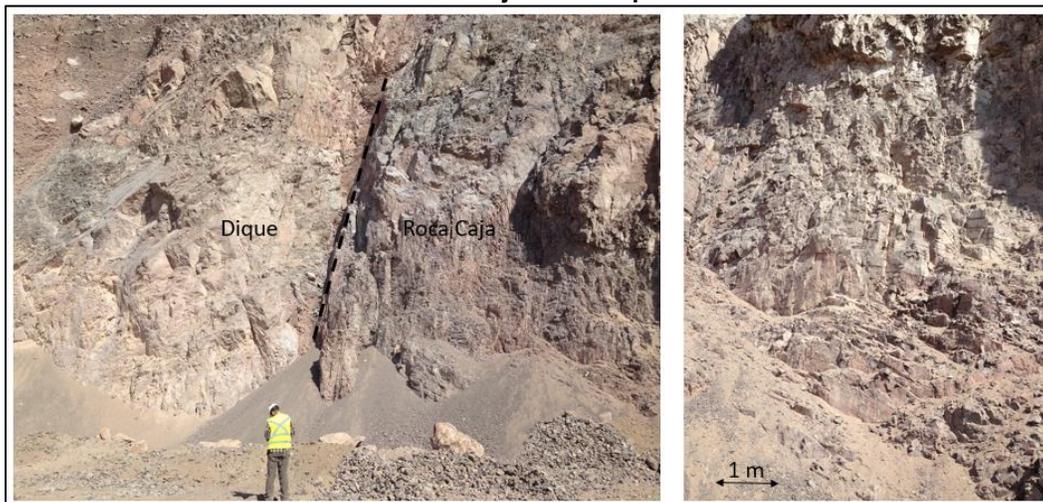


Figura 11-27: Fotografía Cantera 6 - Sector 4. Contacto Roca-Suelo.



- **Sector 5:** Debido a que existían operaciones activas de carguío y transporte por el lado de la cantera que fueron mapeados los puntos anteriores, se decidió evaluar la pared opuesta del sector (Punto 5, Figura 11-22) como representativo del área debido a la gran extensión de la unidad de suelo solamente y por encontrarse en la línea directa al punto de muestreo. El sector tiene una cobertura de 2-3 metros de material no consolidado, sobre la unidad de Gravas de Alto Hospicio, en la cual se observan taludes verticales, en los cuales es visible los planos de depositación de la unidad. Se observa material suelto en la pata, proveniente de la cresta del talud (tamaño grava muy gruesa).

Figura 11-28: Fotografía Cantera 6 - Sector 5.



vii) **Cantera 7**

Ubicada a 570 m al NE de la Cantera 6. No se observan trabajos de extracción de material en el sector más amplio (al sur). De acuerdo a análisis de imágenes satelitales de Google Earth (2017), durante el periodo comprendido entre Agosto-2017 y Diciembre-2017 se realizó una intensiva extracción del sector, lo que generó una segunda cantera con una extensión de 140 m, como se observa en la Figura 11-29.

Figura 11-29: Fotografía Satelital Cantera 7. A la izquierda estado a Agosto 2017 y a la derecha a Diciembre 2017 (Archivos Google Earth).



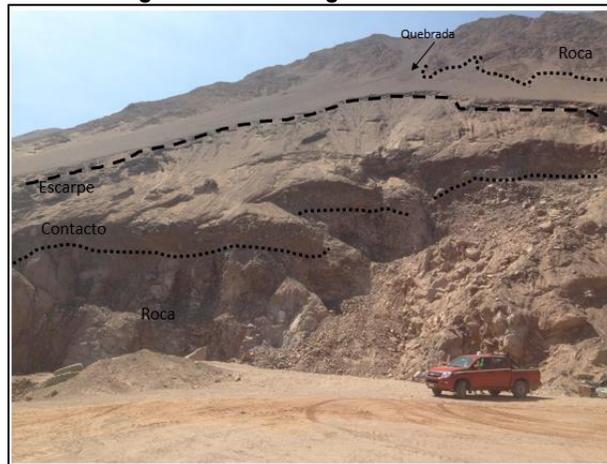
El banqueo se habría realizado de forma descendente, disminuyendo el ángulo de talud y generando una geometría más estable de la que se observa en la cantera inicial (que es una pared vertical). La Figura 11-30-izquierda muestra la condición actual del talud.

Figura 11-30: Fotografía Cantera 7. a la izquierda el sector sur y a la derecha el norte.

El sector norte, se encuentra con pared vertical en una extensión de 40 metros. No se observa presencia de roca. Los planos de depositación de Gravas de Alto Hospicio están inclinados bajando con la pendiente de la ladera. Ambas canteras no presentan afloramiento de roca y las unidades son principalmente Gravas de Alto Hospicio y Depósitos No Consolidados.

viii) Cantera 8

Ubicada a 500 metros al NE de Cantera 7, se caracteriza por presentar afloramiento de roca, en contacto con material no consolidado. La unidad Depósitos No Consolidados tiene un espesor de 2 metros, la cual se extiende verticalmente por la ladera hasta 50 metros más arriba donde se observa afloramiento de roca. Existen quebradas entre los contactos de los afloramientos, lo que genera secuencia de material no consolidado y roca en la parte superior del cerro, como se indica en la Figura 11-31.

Figura 11-31: Fotografía Cantera 8.

La pared de roca contiene estructuras sub verticales, que aumentan en frecuencia hacia el sur. Se observan grandes bloques (~2m) que han caído de las paredes por efecto gravitacional y por el avance de la extracción de áridos en el sector. La roca es resistente al golpe con el martillo, pero debido a la condición estructural del macizo, este se caracteriza con un GSI de 30-40 (ver Figura 11-32). Un set estructural dominante aflora en el talud con orientación 55/30.

Figura 11-32: Fotografía Macizo Rocoso Cantera 8.**b) PROPIEDADES GEOTÉCNICAS**

Las propiedades geotécnicas están orientadas a estimar y determinar los parámetros de resistencia de las unidades descritas. En base a esto, se buscará determinar el FS o SF de la ladera de acuerdo con la disposición de las unidades geotécnicas y la geometría del talud. Para esto, se caracterizará las Gravas de Alto Hospicio y la unidad de Depósitos No Consolidados como constante para todas las canteras, puesto que no se observaron mayores variaciones que dependieran del material, sino que las principales diferencias entre los sitios están relacionadas a la operación y geometría del talud.

En el caso de la Formación Punta Barranco, se caracterizará sitio a sitio, debido a las diferencias estructurales observadas entre las unidades de Bajo Molle y Playa Blanca. Las principales propiedades geotécnicas serán determinadas de acuerdo con el tipo de material y al posterior análisis de deslizamiento, dado criterios de fractura definidos en las subsecciones siguientes.

i) Gravas de Alto Hospicio

Las Gravas de Alto Hospicio están consideradas como suelos salinos, debido a su contenido de sal mayor a 2% captado por muestreos realizados en estratos superficiales en el sector de Alto Hospicio (SERNAGEOMIN, 2014). La presencia de estas sales aumenta la resistencia del suelo, permitiéndole soportar una gran carga sin generar en esta unidad una gran deformación, pero esta característica se ve rápidamente reducida al entrar en contacto con el agua donde las sales se disuelven y abandonan la matriz. De esta forma, los efectos de asentamiento se ven sujetos a colapsabilidad de suelos y sus consecuentes daños (IDIEM, 2010).

Tamblay (1983) estima una relación para la deformación de suelos salinos debida a la disolución y salida de sales de la matriz, describiendo una relación lineal entre el contenido de sal y la deformación sufrida por la unidad. De esta forma, la pérdida de cementación en la matriz y el reordenamiento de los granos generarían que la rigidez y resistencia de las Gravas de Alto Hospicio disminuya en un rango que pudiese medirse a través de ensayos.

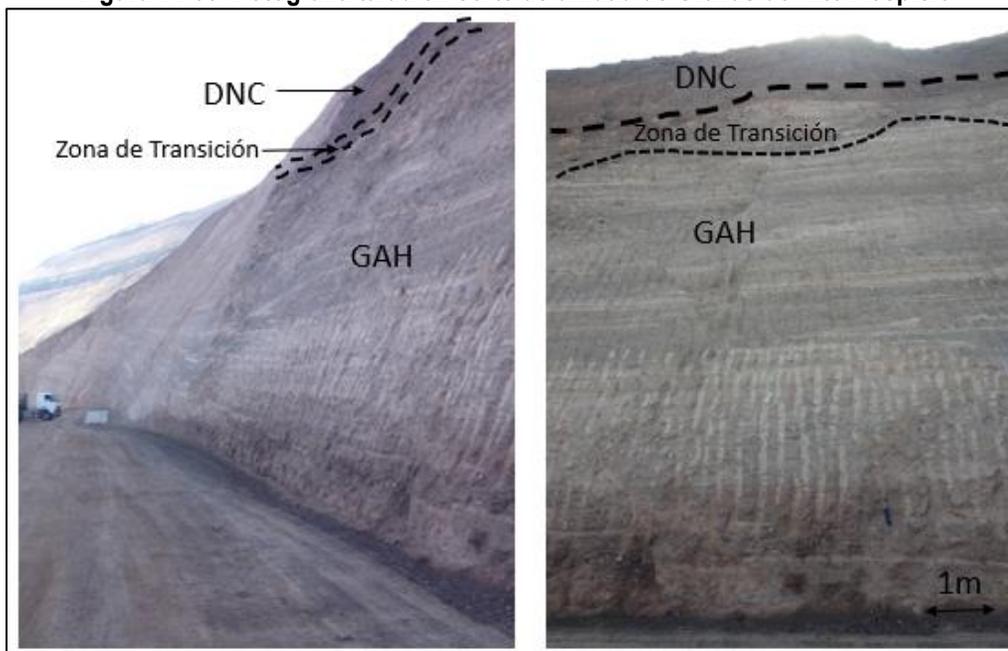
Adicionalmente, Donoso (2014) estima valores de resistencia y rigidez a través de ensayos in situ, mediante correlaciones con el índice de penetración estándar (SPT), indicando una variación en profundidad del contenido salino la cual se vería reflejado en las características geotécnicas de las Gravas de Alto Hospicio. En particular, los estratos más profundos tendrían un mayor contenido de sales (debido a fluidos subterráneos), sin ser determinado si esta característica continúa en profundidades mayores. En rigor, existiría un límite de saturación sobre el cual la matriz no ha hecho reemplazos de granos originales y solo satura los espacios vacíos

generando movimientos expansivos, por lo que teóricamente no existiría un gradiente “infinito” en la vertical (Ali et al 2015).

A fin de corroborar la continuidad de la unidad en profundidad, se realizó un mapeo de las Gravas de Alto Hospicio en los taludes de la nueva ruta de conexión Iquique-Alto Hospicio en el lado sur de la ciudad (en construcción), donde se observaron taludes inclinados con alturas variables, realizados por equipos de extracción. Este sector se encuentra aproximadamente a 50 m más abajo en la vertical del sector de Alto Hospicio, y en términos de la descripción y composición de las Gravas de Alto Hospicio podría validar la constancia de la unidad en todas las canteras.

En este sector de la ruta, el talud presenta tres horizontes los que se disponen (en orden descendente) como sigue: Depósitos No Consolidados (~3m de espesor), zona de transición (~2m) y Gravas de Alto Hospicio (ver Figura 11-33), esquema que es concordante con el propuesto por Donoso (2014). Se observa que la mayor resistencia del talud está en la unidad de las Gravas de Alto Hospicio, incluso evidenciando los dientes del equipo de carguío al momento de generar el talud. La inclinación de las paredes es de 50°-60°, disminuyendo este ángulo sobre la zona de transición (posible caída de material).

Figura 11-33: Fotografía talud en corte de unidad de Gravas de Alto Hospicio



El contenido de sal se aprecia tanto en muestras de mano de la pared obtenidas directamente de la pared a través de cementaciones de Halita (Figura 11-34-izquierda). Además, el escurrimiento de agua superficial producto del rocío de camiones aljibes en el camino, sumado al contenido de arcillas de la ruta que no permite la rápida absorción del agua, reconcentra sales en el camino de forma superficial (Figura 11-34-derecha).

Figura 11-34: Contenido de sal y cementación de Halita en unidad Gravas de Alto Hospicio

Dado que no existen evidencias de bolones colgados in situ en la pared de las Gravas de Alto Hospicio ni estructuras continuas que afecten una gran proporción de la pared, o bien tengan un espaciamiento en dirección paralela al talud que generen capas de deslizamiento, es que se podría considerar la unidad de Gravas de Alto Hospicio como un medio continuo en la dirección perpendicular al talud.

Mediante ensayos SPT realizados a calicatas en el sector de Alto Hospicio, Donoso (2014) estimó las propiedades geotécnicas de las Gravas de Alto Hospicio. Se propone un modelo de falla que considera sólo el ángulo de fricción el cual contendría implícitamente la cohesión aparente que entregan las sales en la unidad. Sin embargo, Tamblay (1983) establece que ante las salidas de las sales de la matriz de las Gravas de Alto Hospicio (por contacto con agua), la unidad no varía el ángulo de fricción, pero la cohesión se anula. Esto se podría interpretar de dos formas: la cohesión es muy cercana a cero, o efectivamente la resistencia dada por el ángulo de fricción es mucho mayor al efecto dado por la cohesión, permitiendo despreciarla.

Por otro lado, Opazo (2014) en su análisis de deslizamientos rotacionales en la unidad de Gravas de Alto Hospicio sobre la ruta A-16, establece valores de cohesión para la unidad tomados desde la literatura para suelos profundos. Sin embargo, estos valores parecerían no representar el comportamiento de las Gravas de Alto Hospicio, dado que no se entrega información sobre la distribución granulométrica del suelo de referencia ni tampoco si estas unidades de referencia contienen sales disueltas en la matriz.

Finalmente, dada la condición de las Gravas de Alto Hospicio en términos estructurales, mineralógicos y geotécnicos, la unidad podría clasificarse como el límite de suelo resistente – roca meteorizada (solo en términos geotécnicos), por lo que efectivamente la cohesión no sería relevante para determinar la envolvente de falla de este material. Los valores geotécnicos son resumidos en el Cuadro 11.7-3. Adicionalmente, el valor residual de las Gravas de Alto Hospicio en estado disperso podría considerarse como una mezcla de Gravas Arenosas, debido a la dispersión de los finos durante la caída, siendo un valor aceptable de 35° (Konno et al, 1993).

Cuadro 11.7-3: Parámetros geotécnicos Gravas de Alto Hospicio

Parámetro	Mínima	Media	Máxima
Densidad [g/cm ³]	1.53	1.90	2.03
Angulo de Fricción	41°	42°	46°

ii) Depósitos No Consolidados

Se caracteriza a través del criterio de falla de Mohr-Coulomb, tomando como referencia el análisis realizado por Flemming y Johnson (1994) sobre deslizamientos de coluvio en la ribera del río Ohio (Estados Unidos). Si bien, el ambiente de depositación no es el mismo, la granulometría del material analizado (GRAVA arcillo limosa) y

la potencia del estrato (<3m), hace posible considerar estos valores como representativos al material observado en el área de estudio.

Los autores realizaron ensayos sobre muestras separadas por rangos de tamaño (+#230, +#30), indicando que aquellas de mayor tamaño presentaban una menor resistencia. Si bien para análisis de deslizamiento traslacionales se utilizan valores residuales de materiales, se debe considerar el efecto de la rugosidad de la superficie sobre la cual se encuentra la unidad de depósitos no consolidados y cohesiones aparentes por efecto de arenas u otros materiales relleno espacios vacíos, los que varían potencialmente el valor del ángulo de fricción obtenido en laboratorio. Para efectos del análisis de estabilidad de los taludes, se considerará los parámetros establecidos en el Cuadro 11.7-4.

Cuadro 11.7-4: Parámetros geotécnicos de la unidad de Depósitos No Consolidados

Parámetro	Mínima	Media	Máxima
Densidad [g/cm ³]	1.74	2.01	2.13
Angulo de Fricción	11°	20°	21°
Cohesión [kPa]	0	5	16

iii) Depósitos Antrópicos

Con la finalidad de determinar parámetros globales para criterios de estabilidad de botaderos mineros, Contreras (2011) realizó un estudio acerca del comportamiento friccionante de materiales granulares gruesos en litologías mixtas de roca ígnea. Además, el autor establece dos consideraciones principales para estos materiales:

- No existe cohesión, ni tampoco se genera en el tiempo debido a tamaños menores que podrían cementar los bloques, dada su angularidad, rugosidad, resistencia individual y tamaño.
- La envolvente de Mohr-Coulomb no entrega un criterio de falla fiel a las características del depósito, y los ensayos de laboratorio a altas presiones, no considera la generación de nuevos tamaños en el espécimen testeado, los que van modificando la granulometría inicial.

De esta forma, se establecen las siguientes propiedades del material, basado en los ensayos realizados por Contreras (2011) y el modelo de resistencia de Charles and Watts (1980), los cuales se resumen en la Ecuación 1 y Cuadro 11.7-5.

$$1. \quad \tau = 1.37 * \sigma_n^{0.79} \left[\frac{kg}{cm^2} \right]$$

Ecuación 1 – Envolvente de falla para Depósitos Antrópicos

Cuadro 11.7-5: Parámetros geotécnicos Depósitos Antrópicos

Parámetro	Mínima	Media	Máxima
Densidad [g/cm ³]	1.57	1.80	1.96

iv) Formación Punta Barranco

En aquellos sectores donde sólo se identificaron afloramientos en la cima, el Macizo Rocosó se caracterizó a través del criterio de falla de Hoek-Brown. Para las canteras en las cuales el talud estaba en roca expuesta, el análisis se complementará con un estudio estereográfico de las estructuras comprometidas a fin de identificar fallas planares, cuña o toppling. En el caso de las Canteras 1, 2, 3 y 4, las propiedades del material se resumen en el

Cuadro 11.7-6.

Cuadro 11.7-6: Resumen características geotécnicas Formación Punta Barranco - Canteras 1, 2, 3 y 4.

Cantera 1, 2, 3 y 4		Observación
Roca	Andesita	Análisis se realiza en Cantera 3
UCS	100 – 250 MPa	Resistente al golpe con martillo, requiriendo varias repeticiones para ser fracturada
GSI	40-50	Se observa fracturamiento denso, pero aún se puede identificar en algunos afloramientos estructuras dominantes.
mi	25 +- 5	Valor asignado para este tipo de roca.
D	0	No existe perturbación del macizo por excavaciones o tronaduras
Estructuras	80/290	Se observa un set semivertical en Cantera 1, el cual podría generar fallamiento plano

La Cantera 5 se dividió en sector Norte y Sur, cuyas propiedades se resumen en el Cuadro 11.7-7 y

Cuadro 11.7-8.

Cuadro 11.7-7: Resumen características geotécnicas Formación Punta Barranco - Cantera 5- Norte

Cantera 5 - Norte		Observación
Roca	Basalto	Figura 11-18
UCS	100-250 MPa	Resistente al golpe con martillo, requiriendo varias repeticiones para ser fracturada
GSI	30-40	Macizo fracturado, generando bloques de diversos tamaños. La condición de la superficie es de calidad media.
mi	25 +- 5	Valor asignado para este tipo de roca.
D	0.5	La pared podría haber sido sometida a trabajos de excavación al encontrarse cercana a sectores de extracción.
Estructuras	--	No se observan planos estructurales dominantes.

Cuadro 11.7-8: Resumen características geotécnicas Formación Punta Barranco - Cantera 5- Sur

Cantera 5 - Sur		Observación
Roca	Arenisca	Figura 11-20
UCS	50-100 MPa	Resistente al golpe con martillo, requiriendo otras repeticiones para obtener muestra de mano.
GSI	60-70	Se observan sets estructurales dominantes en el talud, formando bloques de tamaño regular. La superficie del talud se encuentra en una condición buena.
mi	17 +- 4	Valor asignado para este tipo de roca.
D	0.7	El Macizo Rocoso ha sido sometido a tronaduras, las cuales dejan la pared en buen estado.
Estructuras	75/280, 80/30, Dique	A estas estructuras se suman los planos de depositación que están medianamente espaciados (20-60cm). Las estructuras subverticales tienen una rugosidad suave (JRC: 2-4) con apertura variable (0.5 a 10 cm) y relleno de arena y arcilla-limo seco. Apertura podría ser consecuencia de tronaduras.

Para la Cantera 6, las líneas geotécnicas realizadas permiten definir una unidad geotécnica en el área, la cual incluye al dique (Cuadro 11.7-9). No obstante, es importante destacar que la zona de contacto roca-dique muestran disminución progresiva en el valor del GSI, el cual es de al menos 60, encontrándose dentro del rango asignado para todo el sector. Es importante destacar, que debido a que la zona se encuentra en una falla podría haber variaciones laterales mayores de contacto con otras unidades las cuales podrían modificar la calidad del Macizo Rocoso.

Cuadro 11.7-9: Resumen características geotécnicas Formación Punta Barranco - Cantera 6

Cantera 6	Observación
-----------	-------------

Roca	Basalto	Figura 11-24 y Figura 11-25
UCS	100-250 MPa	Resistente al golpe con martillo, requiriendo varias repeticiones para ser fracturada
GSI	60-70	Se observan sets estructurales dominantes en el talud, formando bloques de tamaño regular. La superficie del talud se encuentra en una condición buena.
mi	25 +- 5	Valor asignado para este tipo de roca.
D	0.5	La pared podría haber sido sometida a trabajos de excavación al encontrarse cercana a sectores de extracción.
Estructuras	80/70, 60/340, Dique	Alta persistencia (>3m), Rugosidad variable JRC: 4- 16, Amplitud: 5-10 cm, baja apertura 0.5 -1 mm, relleno arena fina, seco.

Finalmente, las propiedades geotécnicas de la Cantera 8 se describe en el Cuadro 11.7-10.

Cuadro 11.7-10: Resumen características geotécnicas Formación Punta Barranco - Cantera 8

Cantera 8		Observación
Roca	Basalto	Figura 11-31 y Figura 11-32
UCS	100-250 MPa	Resistente al golpe con martillo, requiriendo varias repeticiones para ser fracturada
GSI	30-40	Se observa 1 set estructural altamente espaciado, pero entre las estructuras se encuentra altamente fragmentado en orientaciones irregulares y generando bloques de variados tamaños. La condición de las caras es mediana.
mi	25 +- 5	Valor asignado para este tipo de roca.
D	0.5	La pared podría haber sido sometida a trabajos de excavación al encontrarse cercana a sectores de extracción.
Estructuras	55/30	Alta persistencia, Rugosidad variable JRC:6-12, Apertura: 1-15cm, relleno arena fina limo, seco.

v) Sismicidad y aceleraciones máximas

De acuerdo con el mapa de aceleraciones máximas horizontales de SERNAGEOMIN (2013) para el área de Iquique y Alto Hospicio evaluadas como una fracción de la aceleración de gravedad (g), los valores indicados para el área donde se encuentran las canteras van desde 30%g a 45%g, calculadas a través del modelo numérico de atenuación de Ambraseys y Douglas (2003) dadas las fallas mayores y su potencial de ruptura que rodean la zona.

Sin embargo, en el informe también se establece que las aceleraciones debidas a un terremoto de subducción están en un rango de 50%g a 58%g, los que resultan mayores a las establecidas puntualmente por sector. Adicionalmente, análisis realizados por Pinto (2016) sobre efecto de sitio en estaciones sismológicas del área concluyen que las diferencias marcadas entre los estratos geológicos (roca y suelo) genera una impedancia muy alta que podría desestimar las verdaderas aceleraciones calculadas a través de modelos numéricos calibrados con datos reales. Esto último sugeriría considerar un caso más conservador para análisis de deslizamientos, considerando valores cercanos a 50%g.

Las velocidades de onda de corte (V_{s30}) son caracterizadas por Becerra (2014) a través una microzonificación de la ciudad de Iquique, utilizando como base la Norma Sísmica Chilena, las que se presentan en el Cuadro 11.7-11.

Cuadro 11.7-11: Valores de V_{s30} para unidades geotécnicas del área.

Unidad Geotécnica	V_{s30} [m/s]	Frecuencia [Hz]
Formación Punta Barranco – Andesita/Basalto	872 +- 138	[0.22 – 1.77]
Gravas de Alto Hospicio	709 +- 108	[1.13 – 1.45]
Depósitos No Consolidados (Coluvio)	577 +- 86	[1.7 – 5.15]

c) DESLIZAMIENTOS DE LADERAS CERCANAS AL AREA DE ESTUDIO

Los grandes depósitos deslizamientos que ocurren en la costa del norte de Chile son caracterizados por 4 propiedades de acuerdo con Mather et al (2013):

- Topografía del Escarpe Costero, con una morfología empinada y de gran altura.
- Relación de las unidades geológicas.
- Grandes sismos de subducción.
- Hiperaridez que limita la acción fluvial, preservando las características de las remociones.

Adicionalmente, los autores concluyen que los deslizamientos a gran escala son una combinación de mecanismos rotacionales y de avalancha; y la extensión en superficie abarcada sería producto de grandes eventos sísmicos.

Localmente, Opazo (2014) realizó un levantamiento del Escarpe Costero cercano a Iquique, identificando caídas de rocas y antiguos flujos aluviales debido a periodos de altas precipitaciones que limpiaron quebradas haciendo fluir el material acumulado, incluso alcanzando instalaciones ubicadas en la ciudad.

En el caso de las canteras a analizar, la información recopilada en terreno indica que producto de las operaciones de extracción realizadas no es posible identificar qué rasgos morfológicos de las laderas son producto de sismos y deslizamientos activos o propios del efecto antropógeno. Indicaciones de deslizamientos posteriores al terremoto de Iquique 2014 fueron recopiladas desde personal que trabajaba en las áreas, principalmente en las canteras de Playa Blanca y Los Verdes, donde las canteras se encuentran mayoritariamente en la unidad de Gravas de Alto Hospicio con algunos afloramientos de Formación Punta Barranco, y cuyas principales causas podrían deberse a generación de planos de debilidad durante el evento del 2014 o aumento de sobrecarga de niveles superiores (acumulación de material en zonas inestables).

Sin embargo, no existe un registro sistemático (visual o escrito) de estos deslizamientos, e incluso el análisis de imágenes satelitales desde Google Earth muestra que solo cornisas o bloques que colgaban de la pared podrían haber sido desplazados, sin señalar un claro deslizamiento rotacional de las paredes o extensos flujos de suelo. De esta forma, la indicación subjetiva del volumen de material caído entregado por trabajadores podría estar asociada al volumen de finos levantado (observado en nubes de polvo) como los que se observan incluso en las operaciones de desborde ejecutadas en la Cantera 1, dado la cantidad de arcilla y limo contenido en la unidad.

Dado que las unidades geotécnicas más extensas que interactúan con las canteras se agrupan en: Roca-Formación Punta Barranco y Suelo-Gravas de Alto Hospicio, los principales deslizamientos (ocurridos sin registros o potencialmente a ocurrir) podrían ser una combinación de ambas unidades por sus características estructurales y de resistencia. En este sentido, un mecanismo complejo de caída de material definiría de mejor forma la formación de los deslizamientos, sin embargo, a fin de aislar los fenómenos principales que conllevan a las caídas, estas se identifican en tres grupos principales, basado en la clasificación de Cruden y Varnes (1996).

1. Caída de bloques: caída de bloques de roca y suelo por efecto gravitacional, debido al cambio de ángulo entre la ladera natural y el talud actual. Específicamente en la Formación Punta Barranco la roca expuesta se presenta altamente fracturada, formando fallas planas y cuñas, además, la condición de estabilidad horizontal se ha visto disminuida debido al proceso de avance de extracción de la cantera. Para el caso de las Gravas de Alto Hospicio, los bloques colgantes identificados en las canteras también podrían clasificarse como potencial de caída.

Ansari et al (2016) realiza un modelamiento numérico de caída de material para distintos ángulos de talud independiente de su altura, determinando que para aquellos taludes con un ángulo entre 70°- 80°, la distancia de caída de material desde la pata del talud sería de 3.5 -2.5 [m] respectivamente, y que su distancia máxima de alcance sería de 20 [m], lo que podría homologarse para caída de material desde taludes de suelo bajo las mismas inclinaciones.

2. Volcamiento: Principalmente en Roca, por efecto de estructuras bien persistentes, paralelas a la pared con planos de inclinación semivirtuales.

3. Deslizamientos Rotacionales: Principalmente en suelo, debido a la reacomodación de los taludes por efecto de la extracción, a lo que también se podría sumar la variación en la competencia geotécnica entre las Gravas de Alto Hospicio y la unidad que la subyace, generando planos de debilidad que inducirían superficies de corte ideales para el deslizamiento. La superficie de ruptura podría tender a deslizamientos compuestos, generando una forma de ruptura que difiere de la forma circunferencial o elipsoidal (Hungre et al, 2014).

Adicionalmente, otros mecanismos como flujos secos podrían estar más asociados a los Depósitos No Consolidados de las laderas y quebradas, los cuales por su cohesión tendrían una velocidad más bien baja Depósitos No Consolidados (Hungre et al, 2014), y potencialmente el efecto desencadenante de caída de rocas de niveles superiores podría tener un impacto mayor que el flujo de Depósitos No Consolidados, considerándolo despreciable para efectos de este estudio.

Por otro lado, flujos como consecuencia de escurrimiento de agua deben ser generados por la acción de periodos lluviosos, los que se observan como poco probable en las condiciones de hiperaridez de la zona. Sin embargo, incluso al considerar un efecto de agua en las canteras donde la unidad Gravas de Alto Hospicio predomina las paredes de taludes, los deslizamientos podrían deberse a un aumento del esfuerzo vertical sobre el talud por cambio en la densidad de las Gravas de Alto Hospicio (saturación, aumento de densidad, desplazamiento de las sales, etc.) o aumento rápido en la sobrecarga de talud debido a flujos generados en la unidad de Depósitos No Consolidados proveniente de las quebradas.

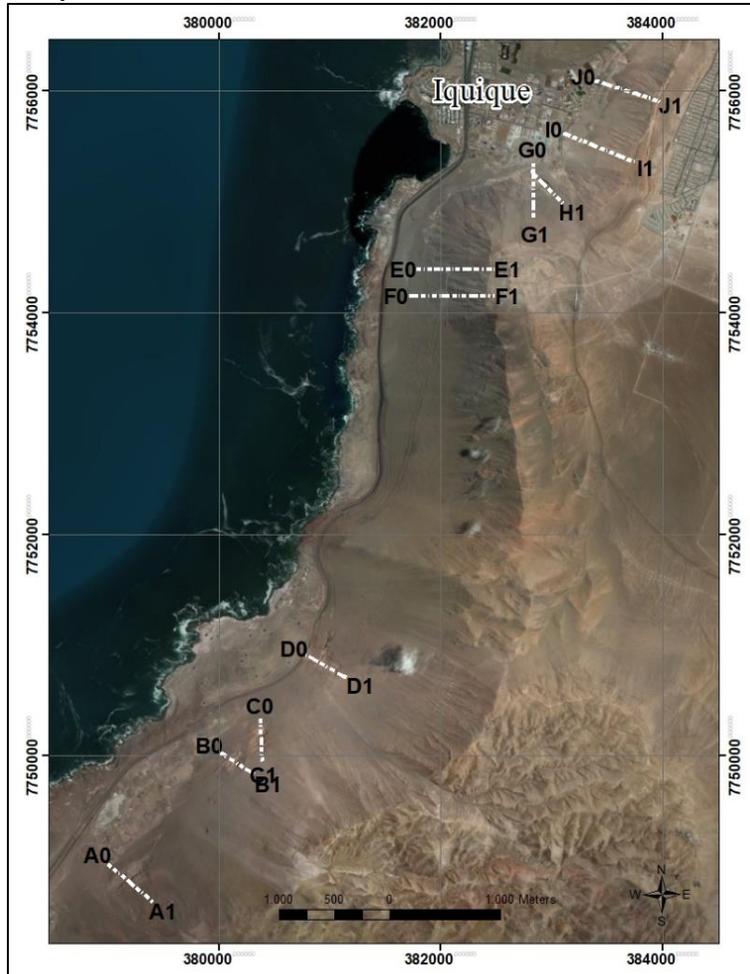
11.7.3 ANÁLISIS DE ESTABILIDAD Y ALCANCES

De acuerdo con la unidad geotécnica predominante en los taludes, las canteras fueron analizadas por métodos de identificación de estabilidad discutidos en la sección 3.3. Se consideró además dos escenarios como potenciales desencadenantes de caída de taludes: gravitacional (situación actual) y un escenario sísmico.

Con los antecedentes, se realizaron secciones geotécnicas perpendiculares al talud tomando como referencia el punto más alto del escarpe de cada cantera, a fin de determinar la máxima altura de las canteras y la proyección de los deslizamientos. En base a esto se delimitará un radio de influencia de caída de material, que mantendría la proyección del escarpe en la ladera considerando esta como dirección principal.

La Figura 11-35 presenta una planta del área con la indicación de la orientación de las secciones realizadas. Si bien los mecanismos de falla pueden generar deslizamientos progresivos en el tiempo, se consideró solo el caso inicial, evaluando la estabilidad del talud actual de la cantera, por lo que se estudia el primer deslizamiento de la pared sin contemplar una situación dinámica de largo plazo. Las principales actividades del talud se dividieron en: Caída de Material, deslizamiento en escenario actual y deslizamientos por acción sísmica.

Figura 11-35: Esquema con dirección de secciones cruzadas realizadas en área de estudio.



a) Canteras con gravas de alto hospicio como unidad predominante

El análisis se realizó en el programa Slide ® de Rocscience, bajo la evaluación del método simplificado de Bishop (1955) debido a su mayor confiabilidad y aplicabilidad en un alto rango de unidades geotécnicas y condiciones topográficas (Pereira et al, 2016).

Los parámetros de convergencia de los deslizamientos se realizaron a través de 25 superficies por centro focal, con una tolerancia de 0.005 y un máximo de 50 iteraciones en cada una. El estado de las superficies fue en condición seca, sin la incorporación de un nivel freático ni efectos de succión de poros. La geometría de las superficies se consideró como circular, con un método de búsqueda enfocado en la pendiente y no en las distancias focales (arrojando todos los FS de las combinaciones posibles) generando 2000 superficies, las que generan grietas de tensión por curvaturas hacia el talud (fallamiento progresivo) a fin de arrojar la superficie de deslizamiento más profunda.

Las superficies generadas se evaluaron en escenarios probabilísticos, donde se consideró como fijo el peso específico del material y se distribuyeron estadísticamente los valores intrínsecos de resistencia de las unidades especificados en la sección 3.2, a través del método Monte-Carlo con un número de 1000 muestras, con cálculo en la pendiente completa (*Overall Slope*). Adicionalmente se incorporaron los efectos sísmicos con una aceleración máxima horizontal fija de 50%g.

La metodología considera la evaluación del FS del talud, evaluando el caso límite para aquellos escenarios donde el FS se acerca 1. Si bien podrían existir varias configuraciones dentro de este rango, la geometría final del plano de deslizamiento es una suma de planos de deslizamientos con FS alrededor de 1, con tolerancia +/- 0.01 idealmente.

El área de deslizamiento se asoció bidimensionalmente a una proyección lineal de alcance, con una dilatación de material del 10% y una proyección de acuerdo con el ángulo de fricción residual, distribuido en el área de operación de la cantera. El remanente es distribuido en la parte inferior, manteniendo el ángulo de fricción peak de la unidad de Gravas de Alto Hospicio debido a irregularidades en la superficie sobre las cual caerán y el potencial de esta superficie para disminuir la aceleración del deslizamiento. Considerando un área A [m²] entregado por las superficies de ruptura de falla circular, y considerando como L la longitud del área de operación, la extensión en las laderas inferiores de las canteras estará dado por la Ecuación 2, cuando el volumen total de deslizamiento sea mayor al volumen posible a contener en la plataforma, y el ángulo de fricción de material sea mayor al ángulo de la ladera.

$$Le (m) = \sqrt{\frac{2A - L^2 \tan(\phi_r)}{2(\tan(\phi) * \cos(\alpha) - \sin(\alpha))}}$$

Ecuación 2 – Relación de ángulos de ladera y fricción del material. Elaboración propia.

Para el caso donde el volumen de material pueda contenerse en el área de operación, la extensión del deslizamiento será estimado mediante la Ecuación 3.

$$Le (m) = \sqrt{\frac{2A}{\tan(\phi_r)}}$$

Ecuación 3 – Estimación de extensión de deslizamientos en área de operación de cantera. Elaboración propia.

Donde

Le: Extensión del material sobre ladera inferior de cantera α : ángulo de la ladera

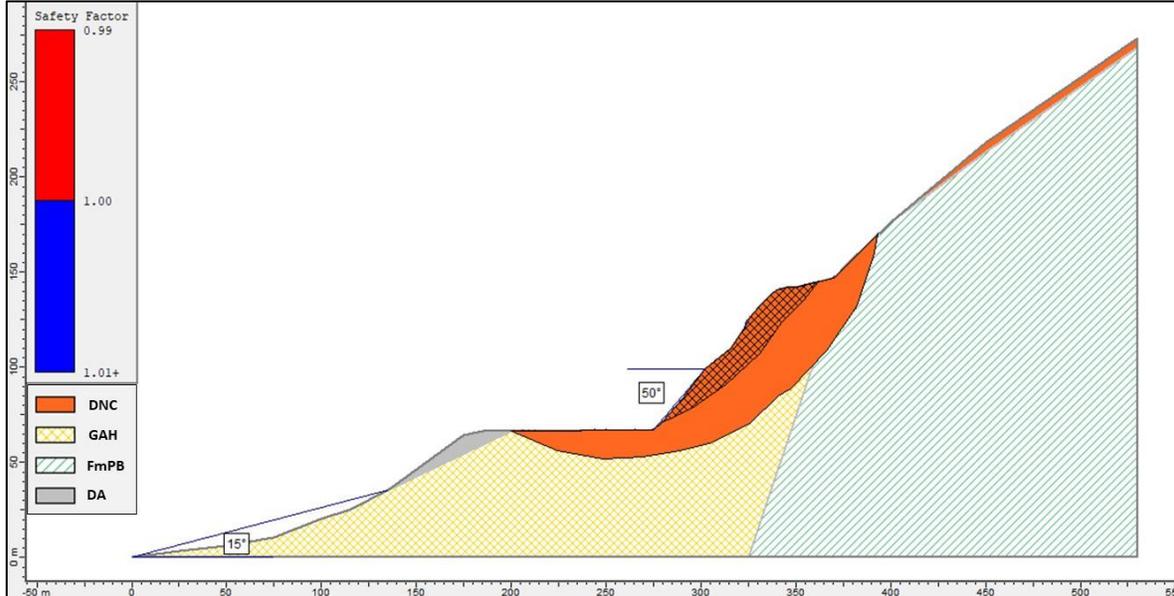
A: Área 2D estimada para deslizamiento del talud (m^2) ϕ : ángulo de fricción peak de Gravas de Alto Hospicio

L: Extensión plataforma de operación de cantera (m) ϕ_r : ángulo de fricción residual de Gravas de Alto Hospicio

i) Análisis Cantera 1

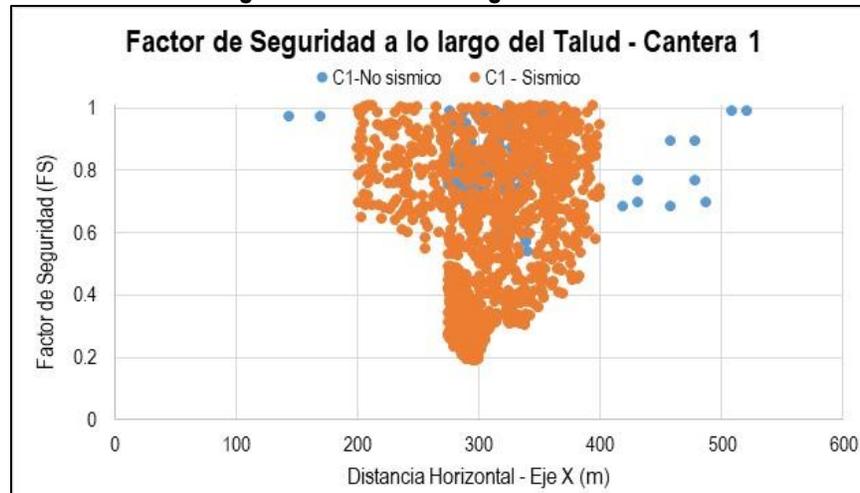
La Figura 11-36 presenta la estimación de superficies de deslizamientos en caso límite para el escenario normal y sísmico. La longitud del área de operación de la cantera es de 100 [m] y la estimación de caída de material desde los niveles superiores se considera principalmente para el caso no sísmico solamente (escenario conservador). El ángulo de talud es de $40^\circ - 50^\circ$ y el ángulo de la ladera en cota inferior a la cantera es cercano a 15° .

Figura 11-36: Sección geotécnica con superficies de deslizamiento - Cantera 1. Zona Achurada: Situación No sísmica. Zona café: Situación sísmica. Inicio de sección: A0. Fin de sección: A1.



La profundidad de la zona de deslizamiento se ve incrementada por efectos sísmicos, los que no sólo aumentan el área en profundidad en la pared, sino que podrían reflejar una pérdida de estabilidad de la plataforma de operación de la cantera. Adicionalmente, la Figura 11-37 presenta como se distribuye el FS (Factor de Seguridad, ver glosario) en el área acotada al talud en estudio, indicando una disminución considerable tanto de las superficies inestables ($FS < 1$) como de los mínimos parciales. No obstante, el mínimo global desde la proyección vertical del segundo talud (350 m) hacia la pata del primer talud (300m), indicaría una potencial extensión en la vertical por sobre los afloramientos por desestabilización de mayor área y un mayor alcance por sobre el escarpe actual.

Figura 11-37: FS a lo largo de Cantera 1



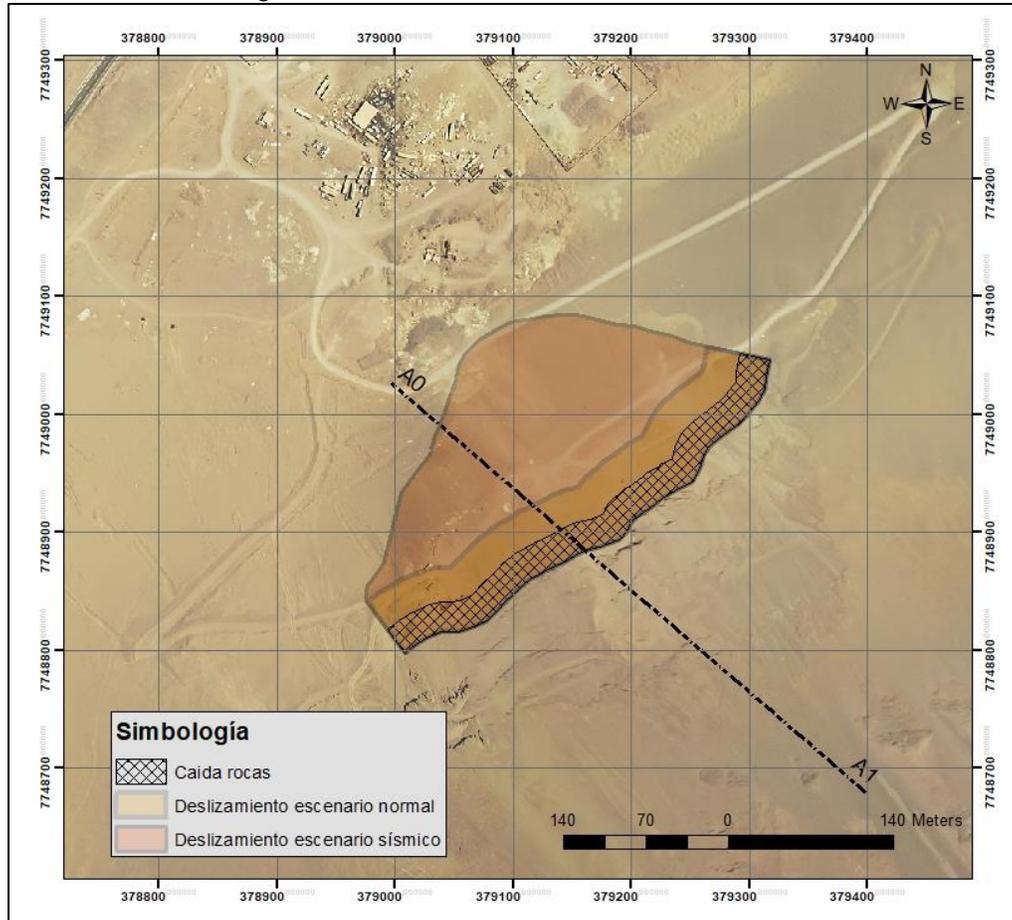
Los valores de extensión se resumen en el Cuadro 11.7-12, y la Figura 11-38 presenta una planta con la delimitación de las zonas de caída de material. Debido a la presencia de conos de extracción en la pata del talud, la estimación de caída de material podría no resultar tan relevante como la distancia que estos bloques podrían recorrer desde la pata, la que fue incluida como primera zona de delimitación.

Cuadro 11.7-12: Extensión de deslizamientos Cantera 1

	Condición Normal	Condición Sísmica
Área [m ²]	1174	5320
Cobertura Área Operación (L) [m]	54	100
Longitud extensión en ladera inferior (Le) [m]	-	62
Estimación de caída de Material [m]	2	
Estimación de Material rodado [m]	25	

Basado en la Figura 3-6, la influencia de la zona de falla al SW del plano que define la sección geotécnica fue incorporada por una cobertura mayor del material deslizado hacia el sector opuesto (paralelo a A0), generando una mayor proyección hacia este sentido, y potencialmente bloqueando uno de los caminos de acceso a la cantera. Cabe destacar que material suelto podría incluso abarcar mayor área, llegando a las instalaciones que se observan en la parte norte de la sección, pero solo por efecto de caída de rocas, lo que sería más bien puntual y sin gran extensión de área cubierta.

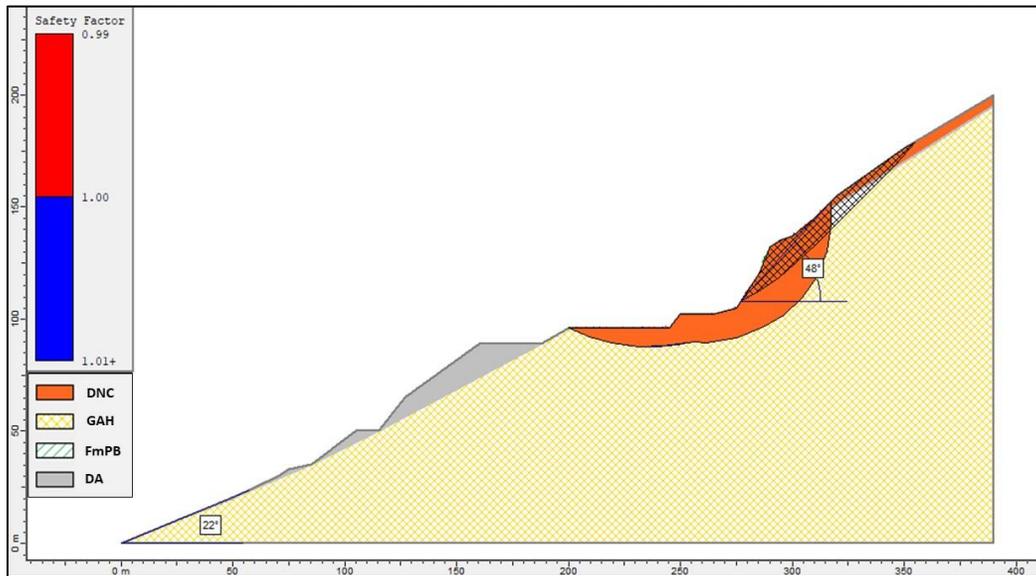
Figura 11-38: Extensión deslizamientos Cantera 1



ii) Análisis Cantera 2

La sección geotécnica y potenciales deslizamientos se muestran en la Figura 11-39. Los ángulos de talud y ladera se estiman en 48° y 22° respectivamente. El área de operación es de 70 [m] aproximadamente, considerando el sector de explotación y los conos de extracción actuales de la pata del talud.

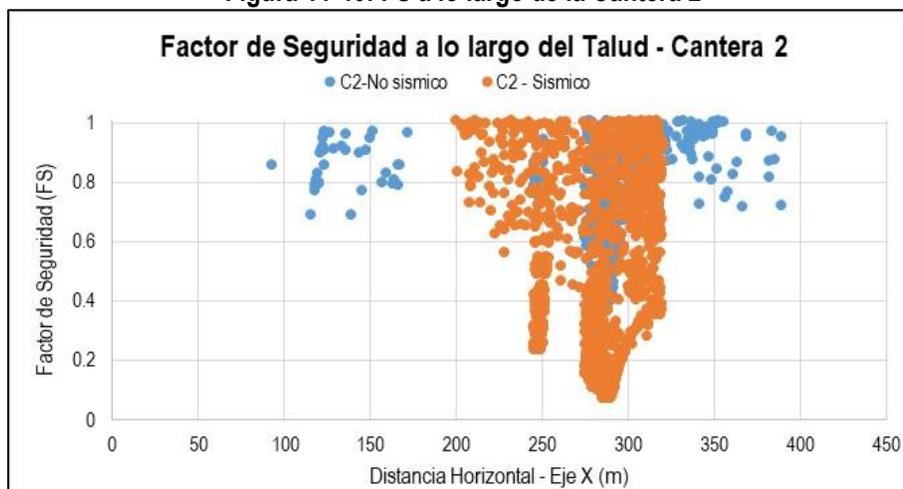
Figura 11-39: Sección geotécnica con superficies de deslizamiento - Cantera 2. Zona Achurada: Situación No sísmica. Zona café: Situación sísmica. Inicio de sección: B0. Fin de sección B1.



El Factor de Seguridad (FS) distribuido a lo largo del eje horizontal se concentra mayoritariamente en la pata del talud para ambos escenarios (Figura 11-40). Sin embargo, en el caso estático (condición no sísmica), la extensión en la vertical resulta ser mayor alcanzando incluso sectores de la unidad de Depósitos No Consolidados, y extendiéndose en la vertical considerablemente lo que produciría un avance del escarpe de la cantera y la consecuente exposición de la unidad de Gravas de Alto Hospicio en la pared.

Por otro lado, el escenario sísmico genera un segundo talud con una inclinación mayor al talud actual permitiendo un segundo deslizamiento al ser analizado a través de falla progresiva. A esto se suma que, bajo la pata del talud actual, la zona de potencial deslizamiento se extiende a una mayor profundidad originando la falla circular que abarca incluso el área de operación de la cantera.

Figura 11-40: FS a lo largo de la Cantera 2



La extensión de los deslizamientos para ambos escenarios, como también las áreas de caída de roca se indican en el Cuadro 11.7-13 y Figura 11-41. En el escenario de deslizamientos generados por sismos, el área cubierta alcanza potencialmente no solo el área de operación de la cantera, sino también el sector de acumulación de

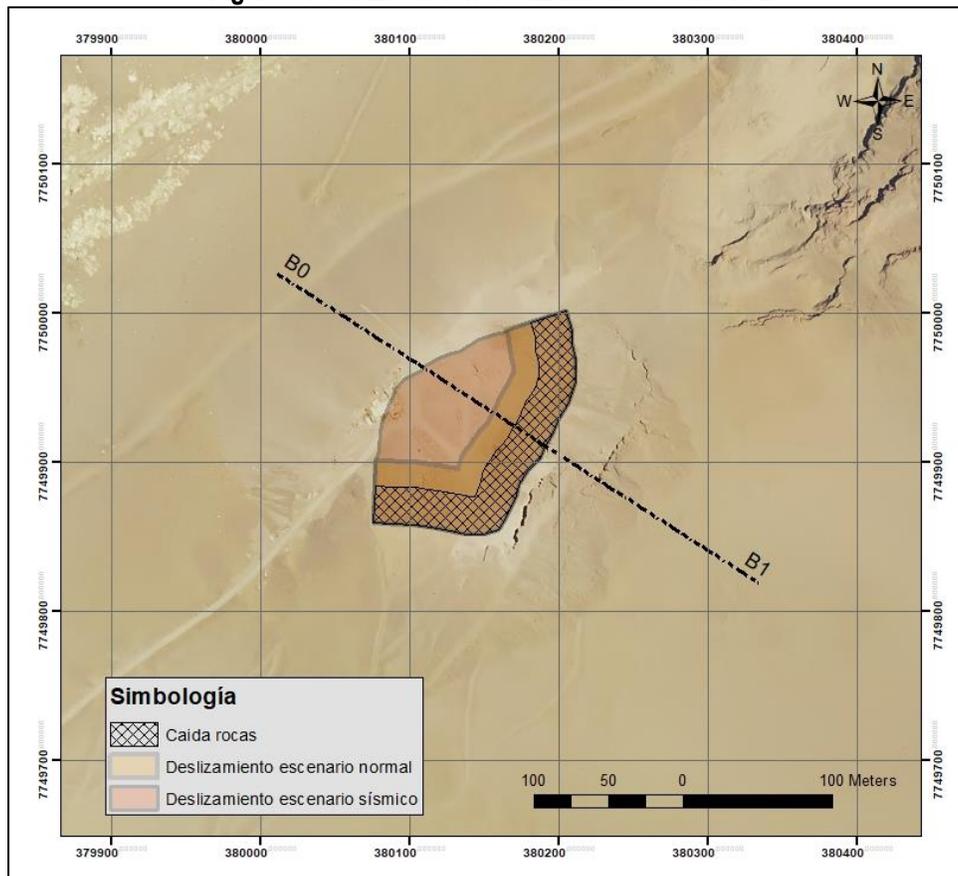
material de descarte de Depósitos Antrópicos, lo que podría incluso desencadenar un segundo desprendimiento de materia debido al aumento de la sobrecarga.

Cuadro 11.7-13: Extensión de deslizamientos Cantera 2

	Condición Normal	Condición Sísmica
Área [m ²]	731	1772
Cobertura Área Operación (L) [m]	42	70
Longitud extensión en ladera inferior (Le) [m]	-	23
Estimación de caída de Material [m]	2	
Estimación de Material rodado [m]	25	

Para el caso de los botaderos, el agrietamiento percibido posterior a sismos y el aumento en el esfuerzo vertical (por el peso del material) podrían generar deslizamientos menores con un alcance incluso hacia el camino inferior (inicio de la sección en punto B0), lo que bloqueara el acceso de la cantera 3. Incluso debería considerarse caída de material más allá de los límites determinados para el deslizamiento mayor debido a rodados, los cuales ocurrirían en conjunto al movimiento mayor.

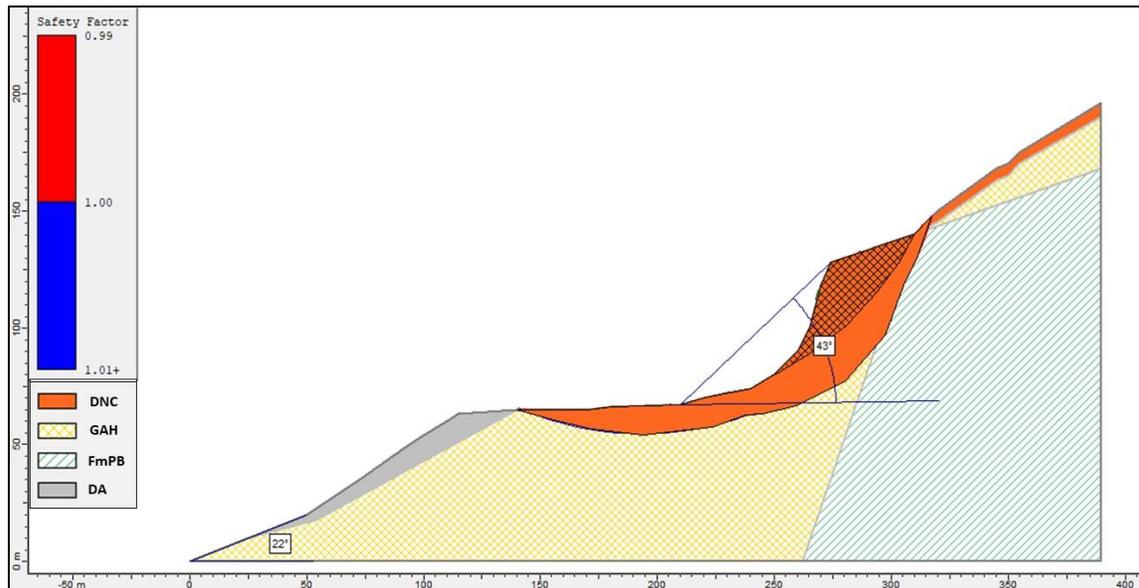
Figura 11-41: Extensión deslizamientos Cantera 2



iii) Análisis Cantera 3

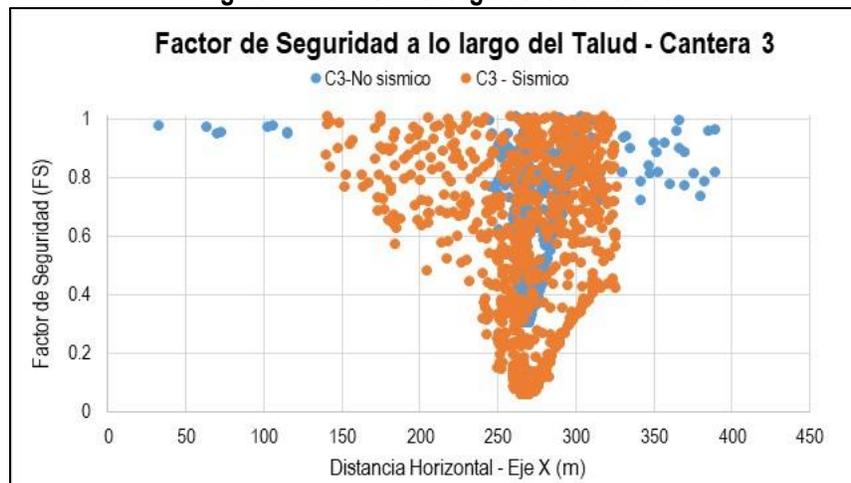
El área de operación de la cantera tiene una longitud de 130 [m] capaz de contener en ambos escenarios los deslizamientos. El ángulo de talud es de 43° y el de ladera 22° , ambos medidos en la sección de la Figura 11-42.

Figura 11-42: Sección geotécnica con superficies de deslizamiento - Cantera 3. Zona Achurada: Situación No sísmica. Zona café: Situación sísmica. Inicio de sección: C0. Fin de sección C1.



En ambos casos, la falla del talud es limitada por la Formación Punta Barranco, cuyo contacto fue estimado semi vertical y paralelo al talud actual, extendiéndose hasta los afloramientos observados en terreno. Sin embargo, la mayor diferencia es la distancia en profundidad que alcanza la superficie de deslizamiento la cual concentra FS de mínimos en las cercanías de la pata del talud para ambos escenarios (Figura 11-43). Adicionalmente, el caso sísmico abarca toda el área de operación de la cantera como zona de falla, la cual fue modelada solo en el área de operación (se consideraron límites verticales para ver como afectaba el talud solamente).

Figura 11-43: FS a lo largo de la Cantera 3



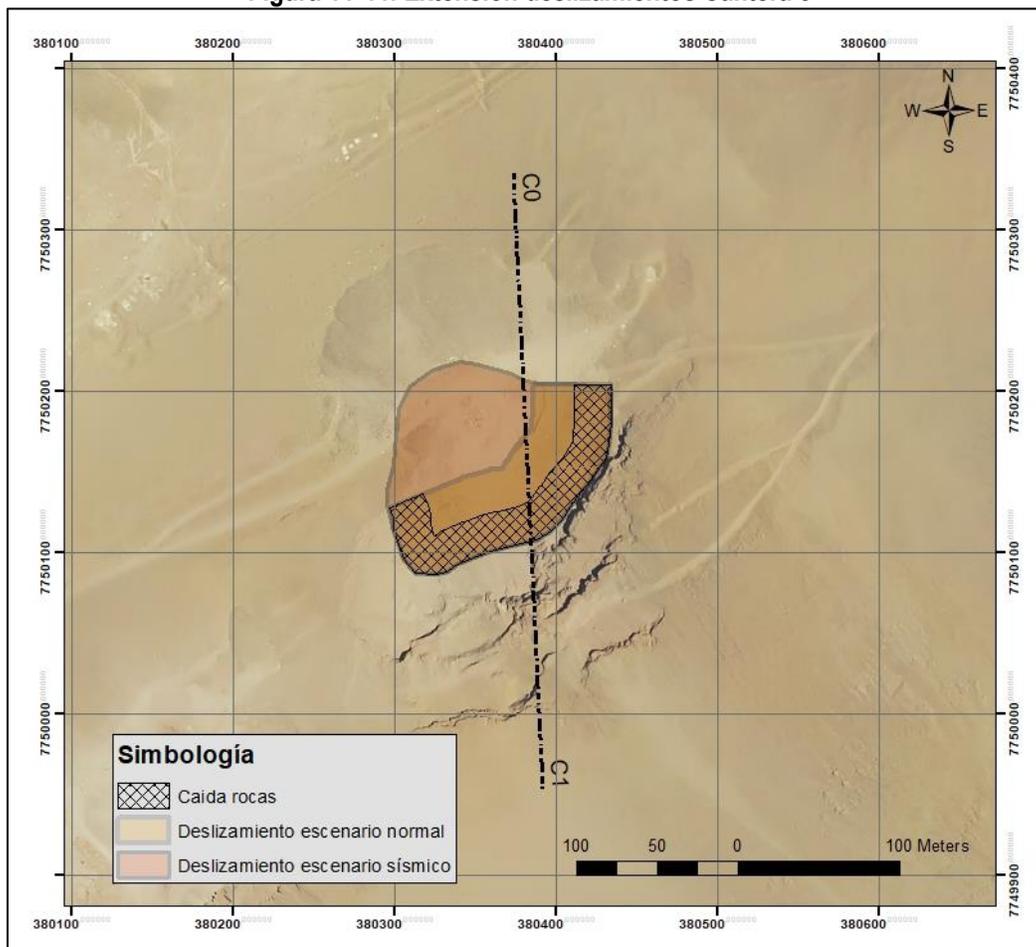
La extensión de los deslizamientos se presenta en la Figura 11-44, en base a los resultados de el Cuadro 11.7-14. La forma del talud (escarpe de la cantera) permitirá una concentración de material en el centro de ella (circular) y la proyección de estos materiales para el caso sísmico se encontraría solo en el área de operación de esta.

Cuadro 11.7-14: Extensión de deslizamientos Cantera 3

	Condición Normal	Condición Sísmica
Área [m ²]	975	3256
Cobertura Área Operación (L) [m]	49	101
Longitud extensión en ladera inferior (Le) [m]	-	-
Estimación de caída de Material [m]	1.5	
Estimación de Material rodado [m]	23	

El potencial alcance de material fuera del área de la cantera podría deberse a proyección de material desde los sectores que alojan la unidad Depósitos Antrópicos (botaderos) los que por efecto de la sobrecarga y la proyección de material (caída de rocas) podría generar un alcance mayor al establecido para el área sísmica, lo que también podría estar condicionado por el ángulo de inclinación de la ladera en los niveles inferiores.

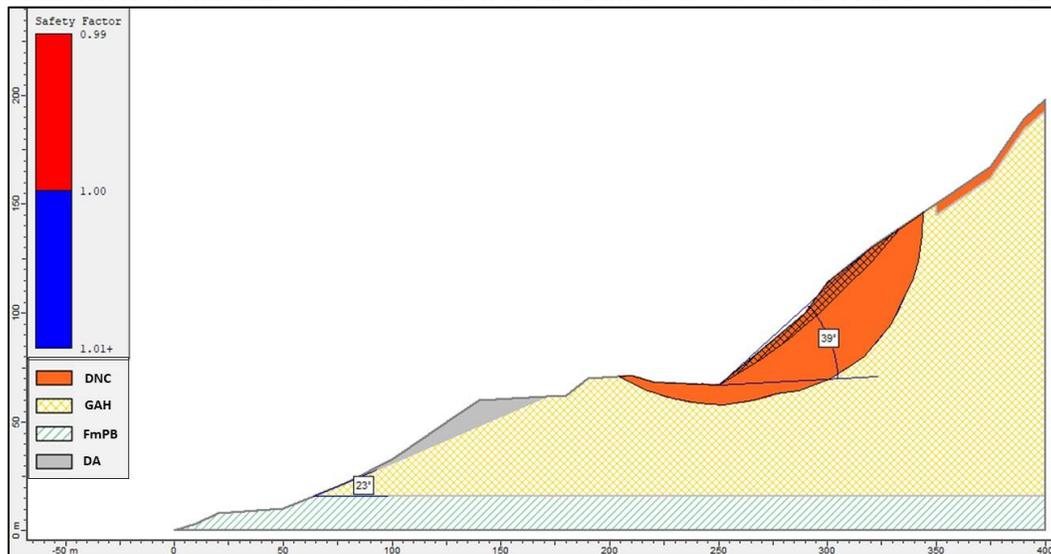
Figura 11-44: Extensión deslizamientos Cantera 3



iv) Análisis Cantera 4

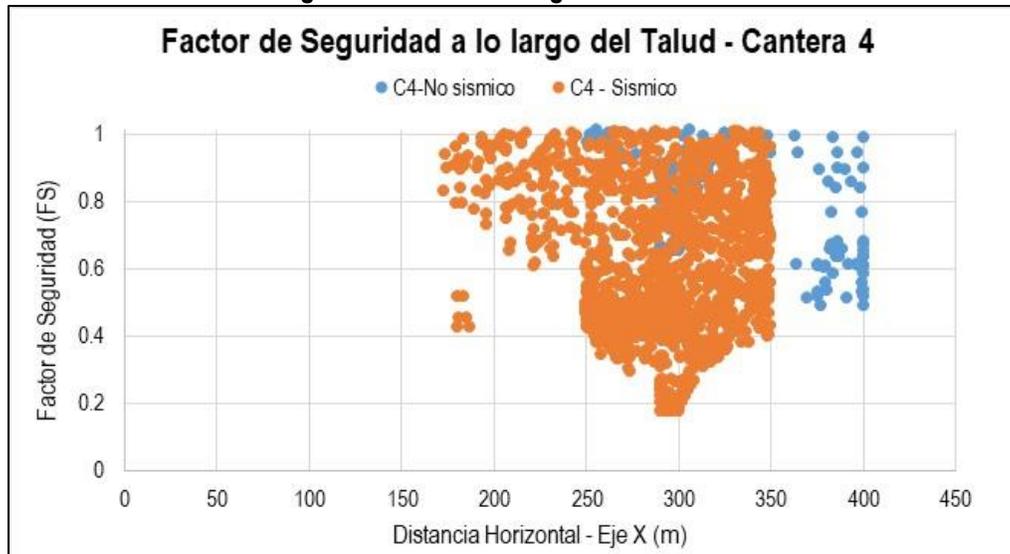
La Cantera 4 es la que se encuentra más cercana a la Ruta 1, ubicándose en los 50 [m] al inicio de la Figura 11-45. El ángulo de ladera es de 23° y el de talud de 40° , lo que se refleja en un volumen de deslizamiento tendiente a disminuir el ángulo de inclinación, con bajo espesor y alto alcance en la vertical para el caso sin condición sísmica (área achurada de la figura). El caso sísmico en cambio presenta una superficie de deslizamiento potencial más profunda considerando incluso el área de operación de la cantera, a lo que además se debe sumar un Desplazamiento de material que cubriría incluso el sector donde se encuentra la unidad Depósitos Antrópicos, produciendo un segundo deslizamiento hacia la Ruta 1.

Figura 11-45: Sección geotécnica con superficies de deslizamiento - Cantera 4. Zona Achurada: Situación No sísmica. Zona café: Situación sísmica. Inicio de sección: D0. Fin de sección D1.



El análisis del FS se presenta en la Figura 11-46 para ambos casos, concentrando los mínimos para el caso sísmico alrededor de la mitad de la altura del talud (300 [m] en la sección). Sin embargo, a medida que se avanza verticalmente por la ladera, se observan superficies inestables ($FS < 1$) las que implicarían mayor volumen desplazado y por lo tanto una mayor extensión del deslizamiento, hipótesis que se descarta debido a que el esfuerzo de cizalle de las superficies comienza a ser menor, reflejado en un aumento del FS.

Figura 11-46: FS a lo largo de la Cantera 4



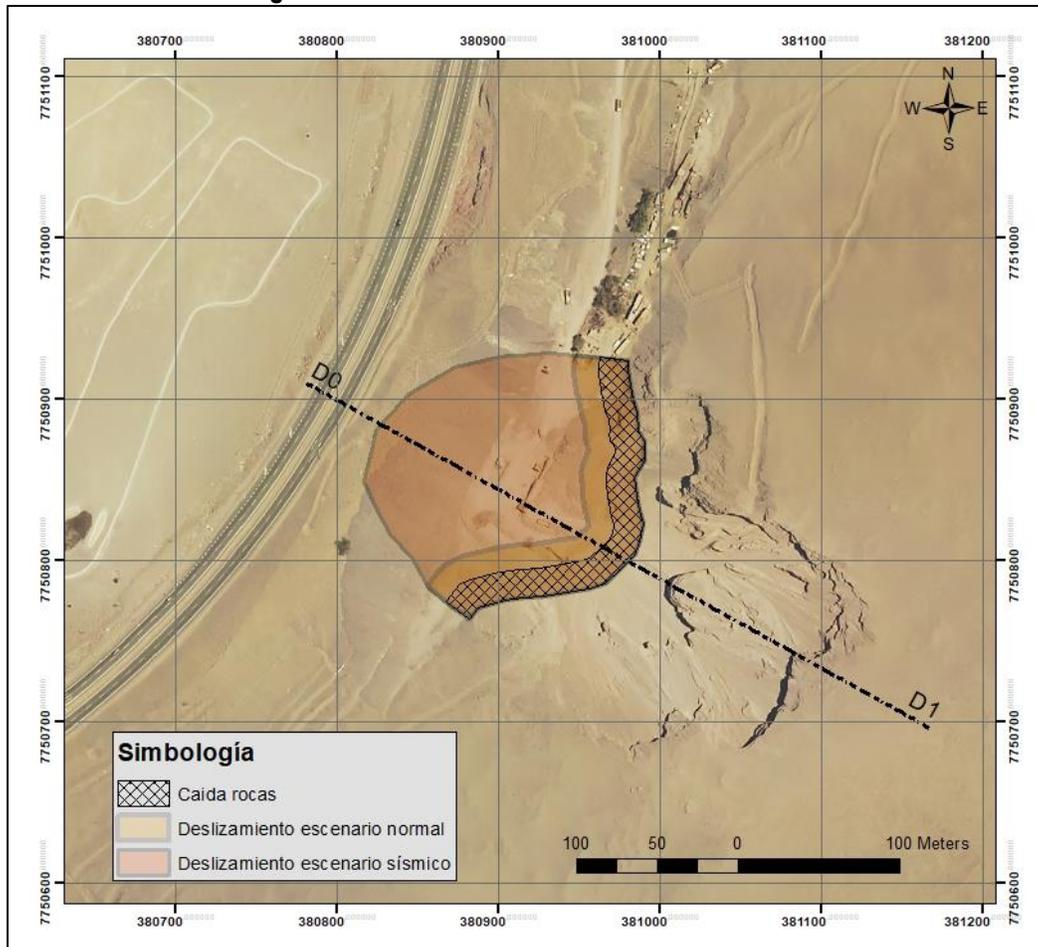
La extensión de los deslizamientos y caídas de material son presentados en el Cuadro 11.7-15 y Figura 11-47. La gran extensión lateral del escarpe y de la cantera en si aumenta el área de cobertura y eventual impacto de esta en el área. No menor es el hecho de que se proyectan deslizamientos muy cercanos al camino que si bien podrían no cubrirlo directamente por el material desprendido del talud, se podrían generar caídas de rocas o deslizamientos menores que afectarían no solo el camino, sino cualquier instalación al otro lado el sector.

Cuadro 11.7-15: Extensión de deslizamientos Cantera 4

	Condición Normal	Condición Sísmica
Área [m ²]	441	3309
Cobertura Área Operación (L) [m]	33	75
Longitud extensión en ladera inferior (Le) [m]	-	61
Estimación de caída de Material [m]	1.3	
Estimación de Material rodado [m]	18	

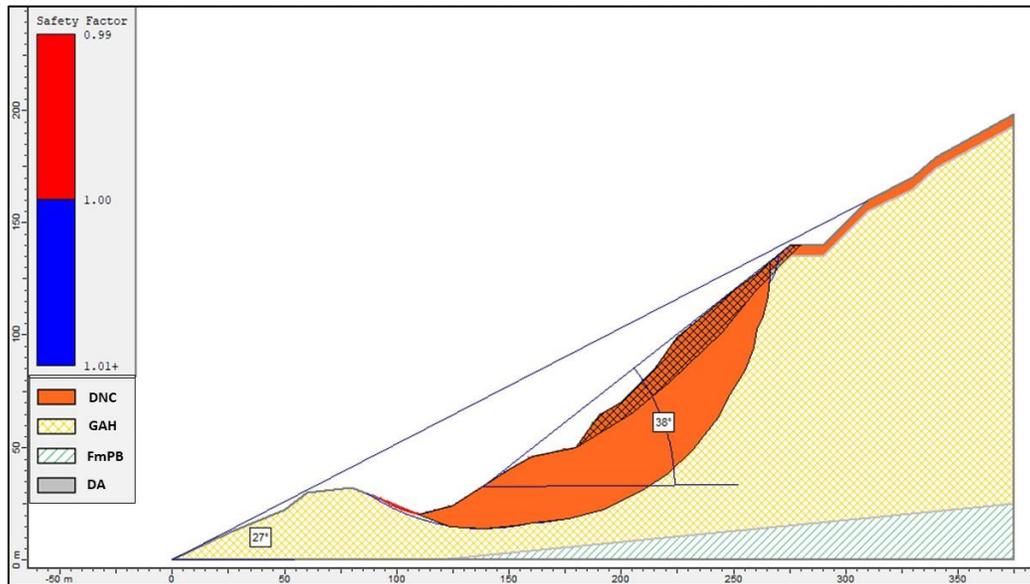
Especial atención genera el estado actual del botadero (Depósitos Antrópicos) que tiene una pata cercana al sector del camino con un ángulo de talud suficientemente cercano al ángulo de fricción asignado para esta unidad, lo que no descarta caída de material, o pequeños deslizamientos que afecten el camino principalmente.

Figura 11-47: Extensión deslizamientos Cantera 4

v) Análisis Cantera 6Sx

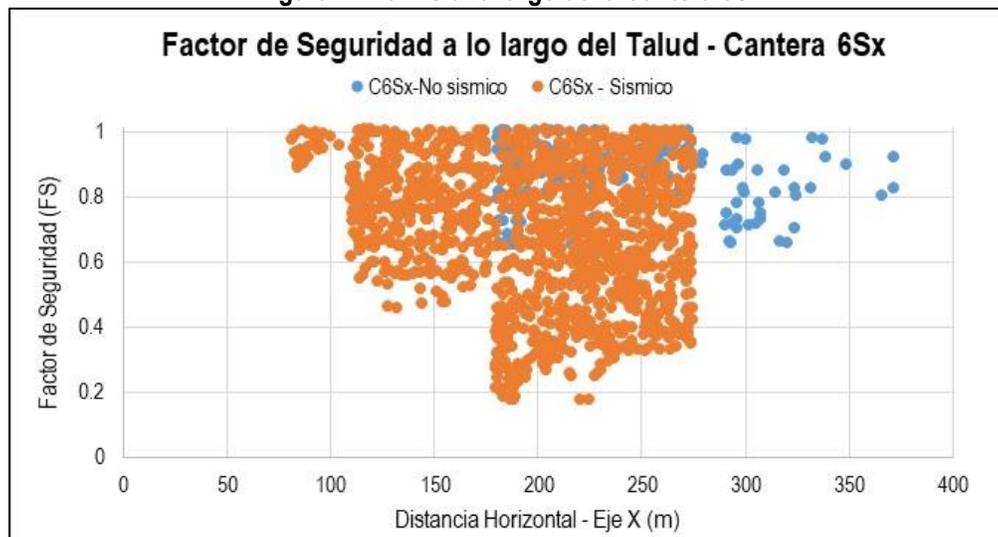
La cantera 6 presenta dos unidades geotécnicas: suelo y roca. En la Figura 11-48 se presenta la sección geotécnica considerada para el sector con predominancia de suelo. Un leve manto de roca en la base se incorporó de acuerdo con lo recopilado en la literatura para la Formación Punta Barranco en el sector de Bajo Molle. El ángulo de ladera es de 27° y el de talud de 38° lo que explicaría el bajo volumen de material desplazado desde la pared para el caso no sísmico.

Figura 11-48: Sección geotécnica con superficies de deslizamiento - Cantera 6Sx. Zona Achurada: Situación No sísmica. Zona café: Situación sísmica. Inicio de sección: H0. Fin de sección: H1.



Los valores de FS para las superficies a lo largo del talud se presentan en la Figura 11-49, los que son considerablemente mayores para el caso sísmico. En el caso no sísmico, se observa una tendencia distribuida en un rango entre 0.6 y 1, los que reflejarían la regularidad del deslizamiento (lonja achurada en Figura 11-48). Para el caso sísmico, existe un quiebre en los mínimos de FS a los 180[m] que podría ser explicado por un pequeño talud existente en la superficie a esa distancia. Posterior a este punto, la tendencia permanece regular congruente con la forma de la superficie de la ladera (no existen puntos altamente inestables).

Figura 11-49: FS a lo largo de la Cantera 6Sx

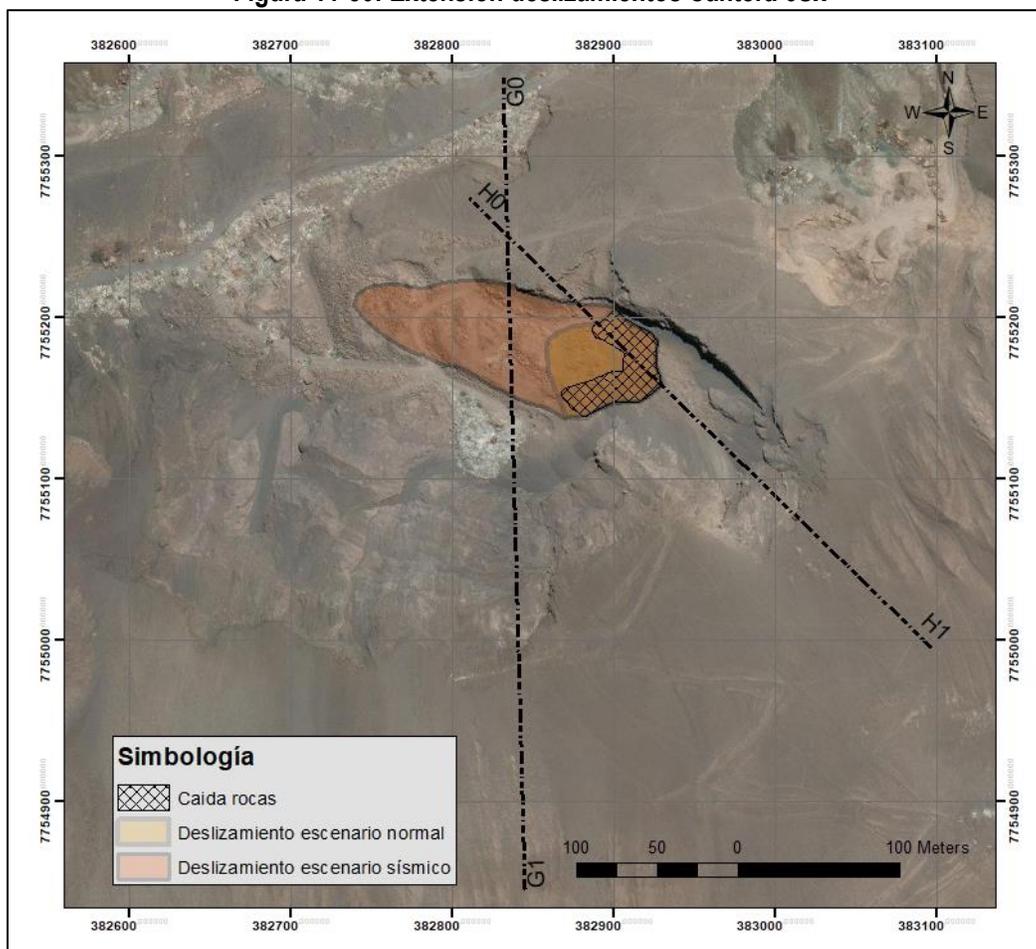


En el Cuadro 11.7-20 y en la Figura 11-49 se presentan la extensión de los deslizamientos en el área.

Cuadro 11.7-16: Extensión de deslizamientos Cantera 6Sx

	Condición Normal	Condición Sísmica
Área [m ²]	993	5276
Cobertura Área Operación (L) [m]	50	100
Longitud extensión en ladera inferior (Le) [m]	-	81
Estimación de caída de Material [m]	1.3	
Estimación de Material rodado [m]	18	

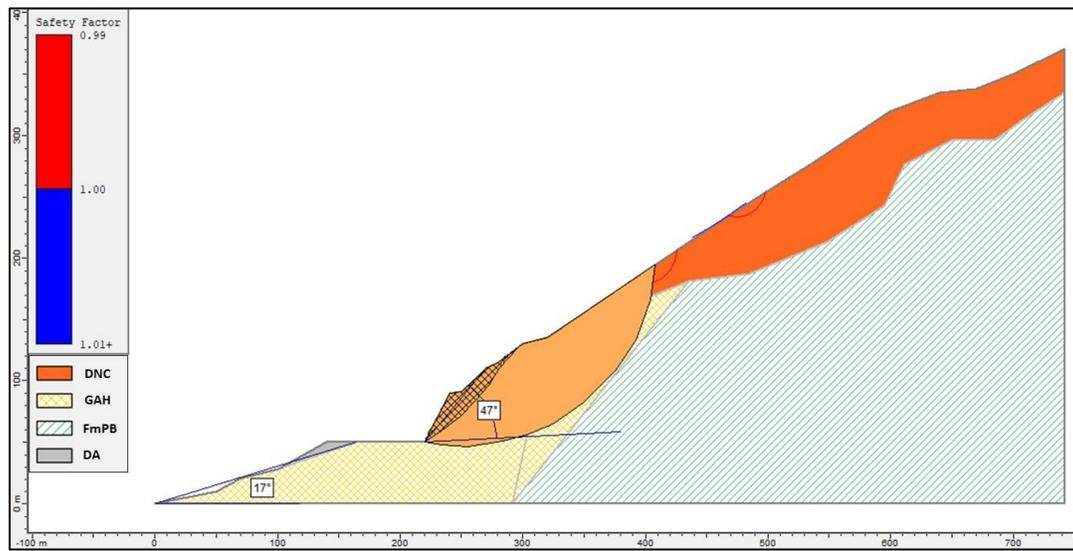
Los deslizamientos fueron acotados por el contacto con la roca y los taludes actuales de suelo (sector derecho) que, si bien contribuirían a generar deslizamientos, serían limitados por el proveniente el escarpe principal. Para el caso sísmico, la gran área deslizada se proyecta sobre material que ya se encuentra en proceso de extracción o que es usado dentro de otra plataforma de extracción, por lo que en estricto rigor solo un porcentaje del área estimada como a deslizar sobre ladera podría ser considerado como tal.

Figura 11-50: Extensión deslizamientos Cantera 6Sx

vi) Análisis Cantera 7

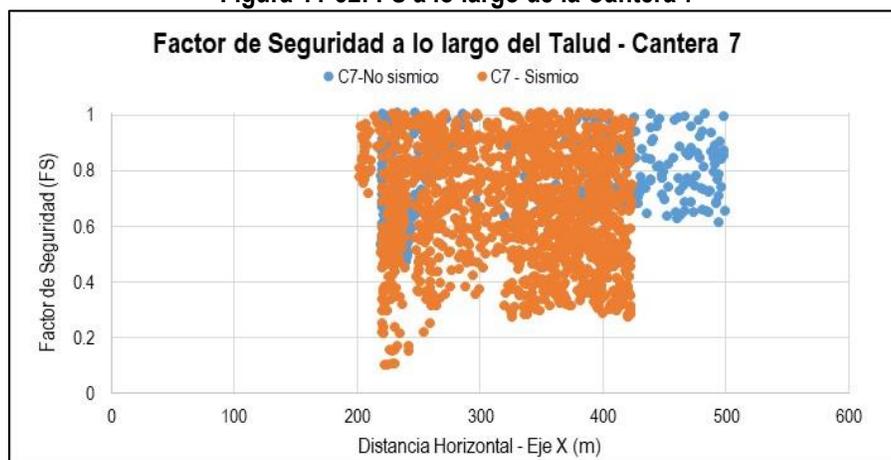
La sección geotécnica de la Figura 11-51, indica un contacto irregular entre las unidades de Depósitos No Consolidados y Formación Punta Barranco en el área más cercana al contacto de ambas unidades con las Gravas de Alto Hospicio, principalmente por la presencia de quebradas que aumentarían la potencia de los Depósitos No Consolidados en este sector. El ángulo de talud inicial es de 47° y el de ladera de 17° (escala de sección es diferente a las anteriores debido a la extensión considerada).

Figura 11-51: Sección geotécnica con superficies de deslizamiento - Cantera 7. Zona Achurada: Situación No sísmica. Zona café: Situación sísmica. Inicio de sección: 10. Fin de sección 11.



La tendencia de los FS para los sectores inestables se presenta en la Figura 11-52, donde se identifica que ambos escenarios siguen una tendencia a aumentar el FS de 200 a 300 metros, para luego tener un máximo local y continuar constante a lo largo del eje, potencialmente producto de la regularidad de la topografía, lo que indicaría que los deslizamientos por sobre los 350[m] alcanzarían solamente las unidades de Gravas de Alto Hospicio y Depósitos No Consolidados, sin alcanzar la Formación Punta Barranco (mayor contraste geotécnico).

Figura 11-52: FS a lo largo de la Cantera 7



La extensión de los deslizamientos se presenta en el Cuadro 11.7-20 y Figura 11-53. Se observan deslizamientos menores en el sector de Depósitos No Consolidados, los que son potenciados debido al espesor

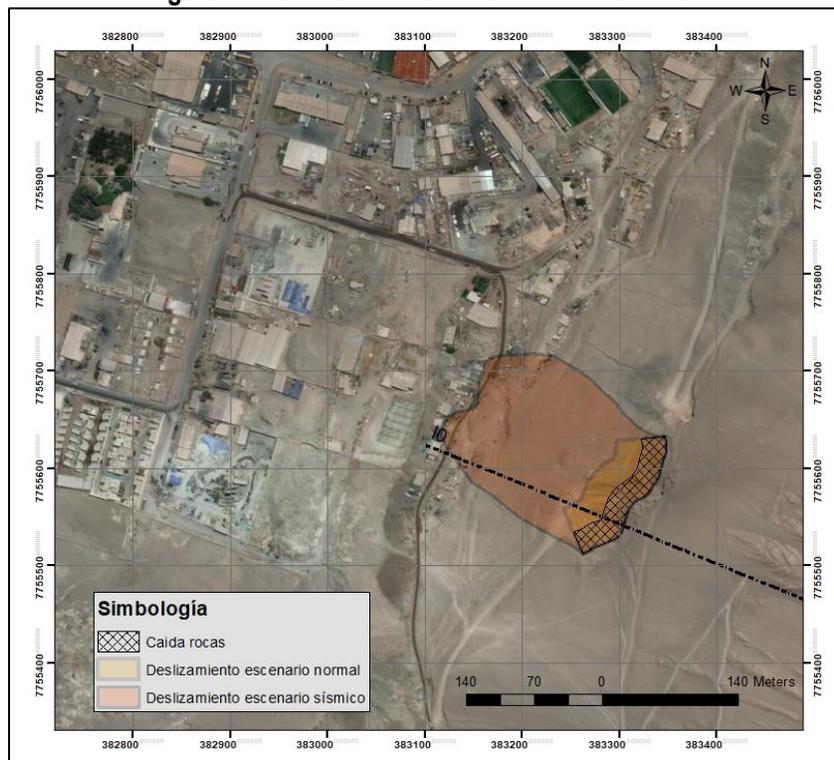
de la unidad en este sector. A fin de estimar un caso conservador, se revisó un perfil perpendicular a los puntos más altos de la ladera identificando una secuencia de quebradas que darían alternancia a afloramientos de Formación Punta Barranco y Depósitos No Consolidados, lo que permitiría generar una potencia variable para los Depósitos No Consolidados. Sin embargo, el pequeño volumen de estos deslizamientos generaría solo caídas menores de material.

Cuadro 11.7-17: Extensión de deslizamientos Cantera 7

	Condición Normal	Condición Sísmica
Área [m ²]	994	10847
Cobertura Área Operación (L) [m]	50	80
Longitud extensión en ladera inferior (Le) [m]	-	131
Estimación de caída de Material [m]	2	
Estimación de Material rodado [m]	24	

La extensión alcanza un área sobre instalaciones permanentes, las que quedarían cubiertas por eventual deslizamientos de esta cantera. Es importante destacar el gran impacto que generaría un sismo sobre el área removida, la que estaría limitada por el contacto de las Gravas de Alto Hospicio con Formación Punta Barranco, indicado a través de las superficies de potenciales deslizamientos. Si bien parte de este material podría ser retenido por la rugosidad de la ladera inferior, esto no impide que haya caídas menores de roca desde este material en la ladera inferior, ni que ocurran deslizamientos desde estos puntos, por lo que se considera una proyección adicional a la calculada.

Figura 11-53: Extensión deslizamientos Cantera 7



b) Canteras con formación punta barranco como unidad predominante

Corresponden a las canteras 5, 6Rx y 8, las que se sometieron a un análisis cinemático en Dips® con los principales sets estructurales identificado en la sección 3.2, a través de métodos estereográficos. Se buscará identificar si es posible que se generen deslizamiento tipo cuña, planar o toppling (Wyllie y Mah, 2004). Dips® se ajustó a proyecciones de igual área, con la superficie inferior de la esfera. El tamaño del bloque será asociado a material encontrado en el piso, como también al tamaño máximo capaz de generar la interacción de las estructuras, obtenido a través de los espaciamientos de los sets estructurales.

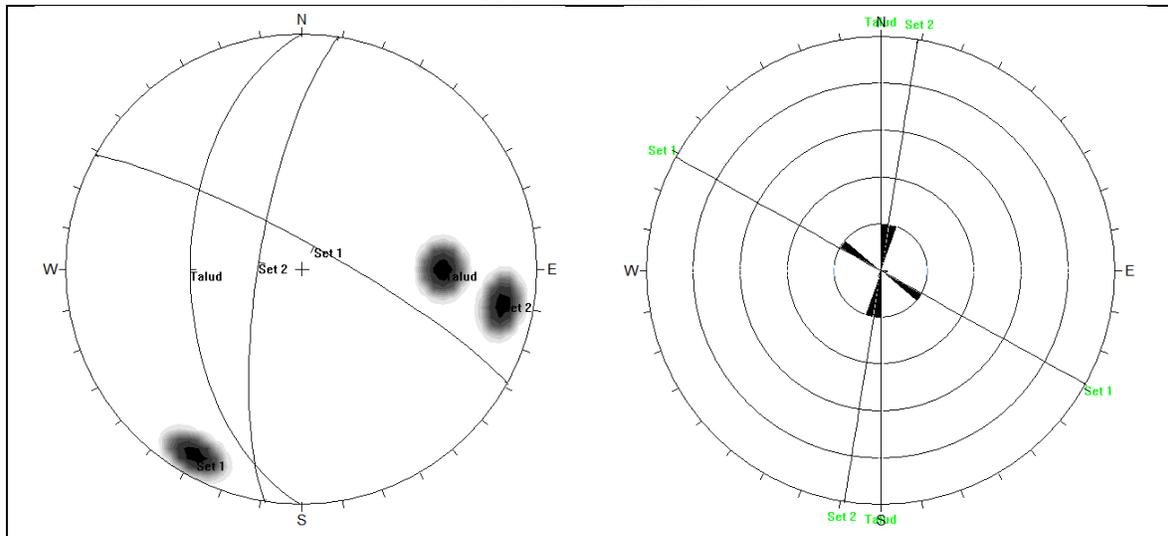
Para el caso donde no se identifiquen características que permitan alguno de estos deslizamientos, se procederá a realizar un modelo numérico en Phase2® para ver el potencial del factor de esfuerzo (SF) a fin de obtener la profundidad de falla producto de la geometría del talud, y de esta forma poder estimar un volumen desplazado o bien descartar su ocurrencia.

Finalmente, si no existieran indicaciones de grandes deslizamientos, se determinarán trayectorias de caída de roca para las canteras basado en el tamaño de bloques, geometría de la ladera y puntos de caída de material, bajo el algoritmo utilizado por Rocfall®.

i) Análisis estereográfico de Canteras 5, 6Rx y 8.

El análisis consiste en identificar la relación de los rumbos de las estructuras mediante la Rosetta de Rumbos, viendo si estos cumplen o no con el rango aceptable para generar deslizamientos planares, cuña o toppling. La cantera 5 se dividió en dos sectores, siendo solamente el sector Sur caracterizado con set estructurales dominantes, los que se proyectaron en la Figura 11-54.

Figura 11-54: Proyección Estereográfica Cantera 5-Sur. A la izquierda red estereográfica y a la derecha roseta de rumbos.

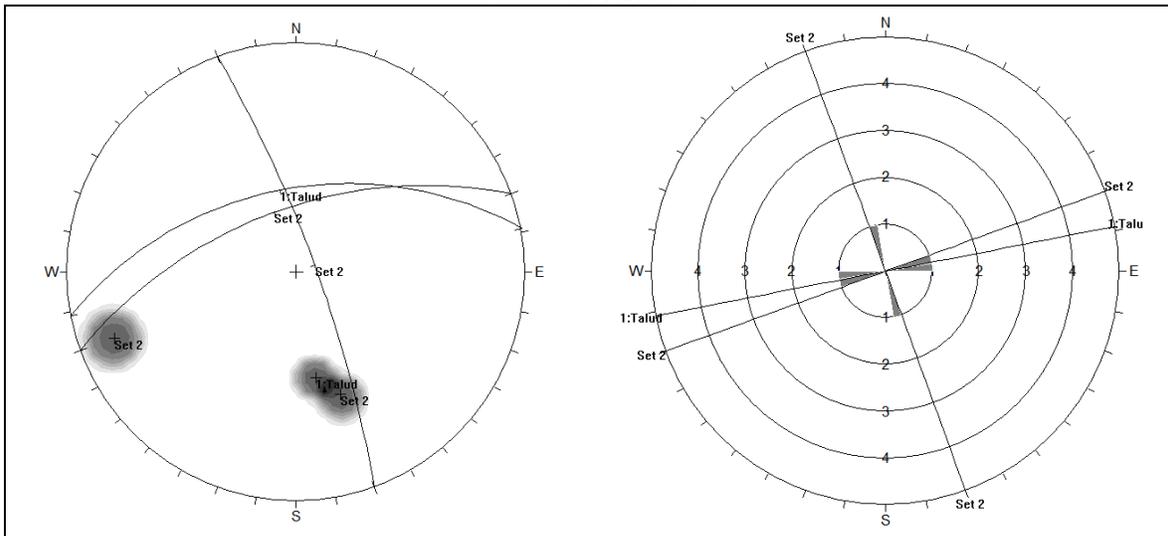


Se observa que la intersección de los sets estructurales tiene una orientación N30W (330), el cual difiere en 60° de la orientación de la pared, y por lo tanto no cumple con la condición de formación de cuñas. Sin embargo, el Set2 que tiene una diferencia de orientación de +-10° con la pared del talud podría generar fallas planares o toppling. La inclinación del Set 2 (75°) es mayor al de la pared, lo que descartaría fallas planares. Finalmente, para el caso de toppling, se descarta un toppling planar debido a que las estructuras mantienen en la misma dirección del talud, lo que podría generar toppling de bloques (Goodman y Bray, 1976) o bien caída de bloques solamente.

Para el caso de la cantera 6Rx, la Figura 11-55 presenta la orientación de los sets estructurales identificados y el talud. La dirección de la intersección de las Estructuras varía en 45° con el rumbo del talud, por lo que se descarta formación de cuñas. Adicionalmente, se descarta el deslizamiento por falla plana para el Set 2, ya que si bien la diferencia de rumbo de este con el talud es de alrededor de $\pm 15^\circ$, la inclinación del set es mayor a la de la pared.

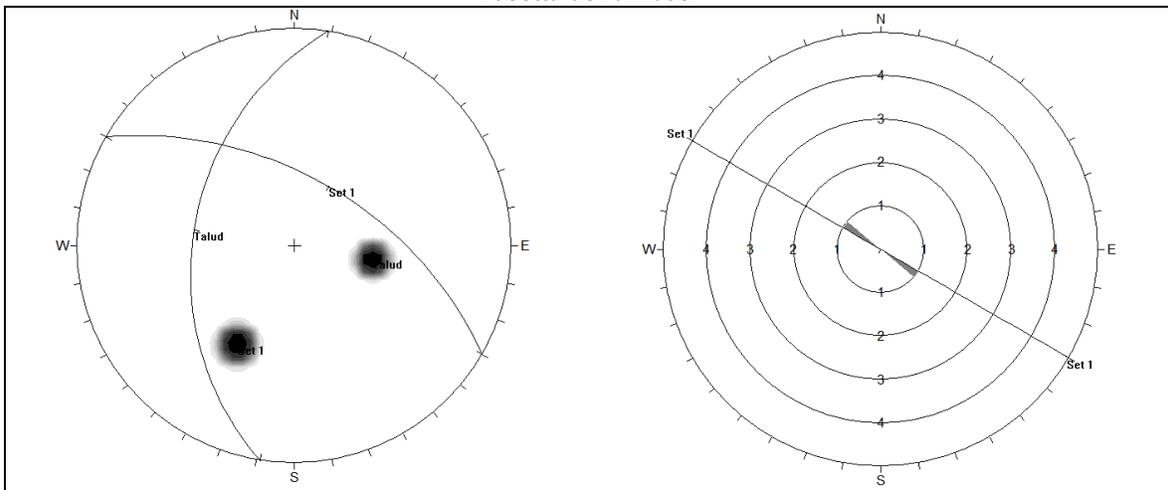
No obstante, al igual que en el caso de la cantera 5, la falla por toppling de bloques podría generarse en esta pared debido a que, si bien el Set 2 no maneja en la dirección contraria, el avance del talud corta la estructuras y permite deslizamientos de grandes bloques por el talud, potenciados por los planos de depositación observados en terreno.

Figura 11-55: Proyección Estereográfica Cantera 6-Rx. A la izquierda red estereográfica y a la derecha roseta de rumbos.



La Figura 11-56 muestra la disposición de los planos observados en la cantera 8, donde fue posible identificar sólo un set estructural dominante, el cual tiene un rumbo casi perpendicular al del talud descartando la ocurrencia de fallas planares, cuña o toppling. No obstante, la misma operación y avance de extracción de la pared permitiría descolgar grandes bloques desde el talud (caída de material) definidos por el espaciamiento de estos sets estructurales, como se observó en los bloques dejados en el área de operación de esta cantera.

Figura 11-56: Proyección estereográfica Cantera 8. A la izquierda red estereográfica y a la derecha roseta de rumbos.



Finalmente, dada la condición estructural recogida para estas canteras se desestima fallamientos de tipo planar, cuña o toppling. No obstante, la disposición de set estructurales paralelos a la pared con mayor ángulo de inclinación sugeriría la formación de grandes bloques y caídas de roca desde niveles superiores los cuales deberán analizarse mediante el tamaño de bloque capaz de generar y su alcance una vez son desprendidos de la pared.

En este sentido, el Cuadro 11.7-18 resume los principales tamaños de bloque capaces de generar los materiales deslizados desde el talud de las canteras, basado en observación de terreno y estimación de espaciamiento de set estructurales.

Cuadro 11.7-18: Tamaño máximo bloque y mínimo de bloque (diámetro) para canteras con Formación Punta Barranco como unidad predominante.

Característica	Cantera 5S	Cantera 6Rx	Cantera 8
Tamaño Máximo Bloque [m]	1 - 2	1	2
Tamaño Mínimo Bloque [m]	0.6	0.5	0.5

ii) Modelo de elementos finitos de Canteras 5, 6Rx y 8.

Las secciones geotécnicas se sometieron a modelación numérica de elementos finitos, a través del programa Phase2D ®. Se realizó una definición de límites de 100 [m] tanto en la vertical como en la horizontal para evitar efectos de borde sobre la malla de cálculo. La malla utilizada fue de tipo gradada (*graded*), con elementos triangulares de 6 nodos, con 250 nodos externos. Se limitó todo movimiento para la base de la sección, pero se permitió el movimiento en el eje horizontal para ambos lados de la sección.

El modelo se evaluó en condición plástica, incorporando parámetros residuales para los materiales evaluados. Las cohesiones residuales se consideraron nulas para todas las unidades. Los sets estructurales se incorporaron localmente, a través de inclinaciones subvertical en la pared el talud solamente, con valores de JCS: 50MPa, JCR: 8, ángulo residual de fricción de 25° y condición seca, de acuerdo con observación de terreno. El esfuerzo vertical se definió como litostático con una radio de esfuerzo vertical y horizontal de 0.5, y se simuló un escenario sísmico de aceleración horizontal 50%g. Los valores de rigidez para la deformación del macizo rocoso fueron de E:20GPa y ν :0.25 (Modulo de Young y radio de Poisson respectivamente).

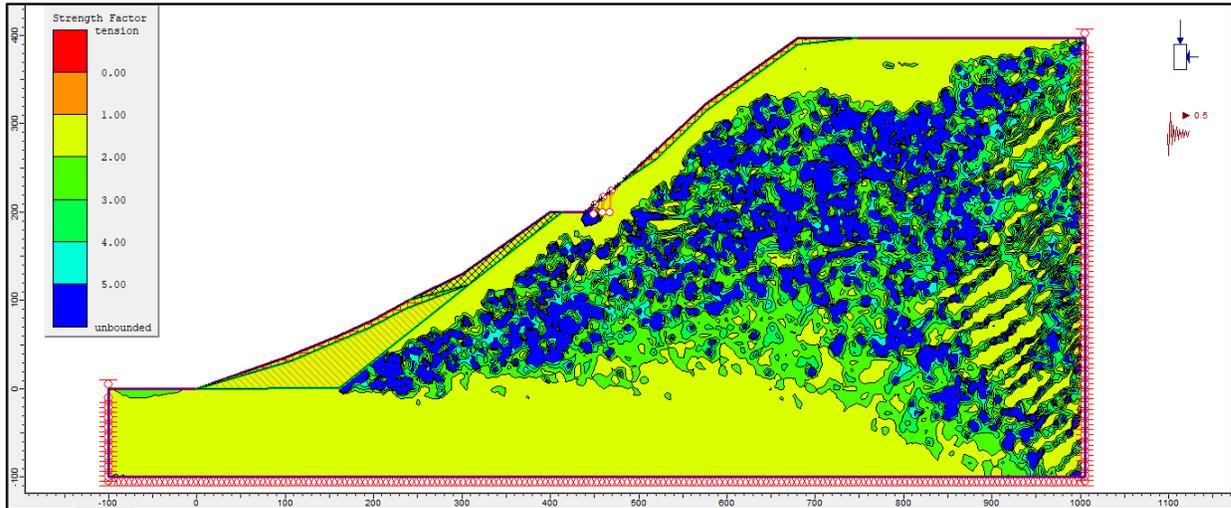
El análisis se realizó bajo deformación plana (*plane strain*), con 500 iteraciones, en 5 pasos de una sola etapa. Los resultados se expresaron en función del SF, cuyo criterio para decidir si existe fractura miento del macizo rocoso se basa en los sectores que presenten un SF<1, con una tolerancia de +-0.01, considerados como área de deslizamiento para posteriores efectos de cálculo.

Finalmente, el modelo se validó de acuerdo a la distribución de esfuerzos capaz de generar en el talud (distribución triangular) y a la deformación esperada en la pata del talud de acuerdo a estos valores. Esto se consideró para validar las condiciones de borde, la definición de malla y la extensión lateral de la sección.

- Análisis Cantera 5

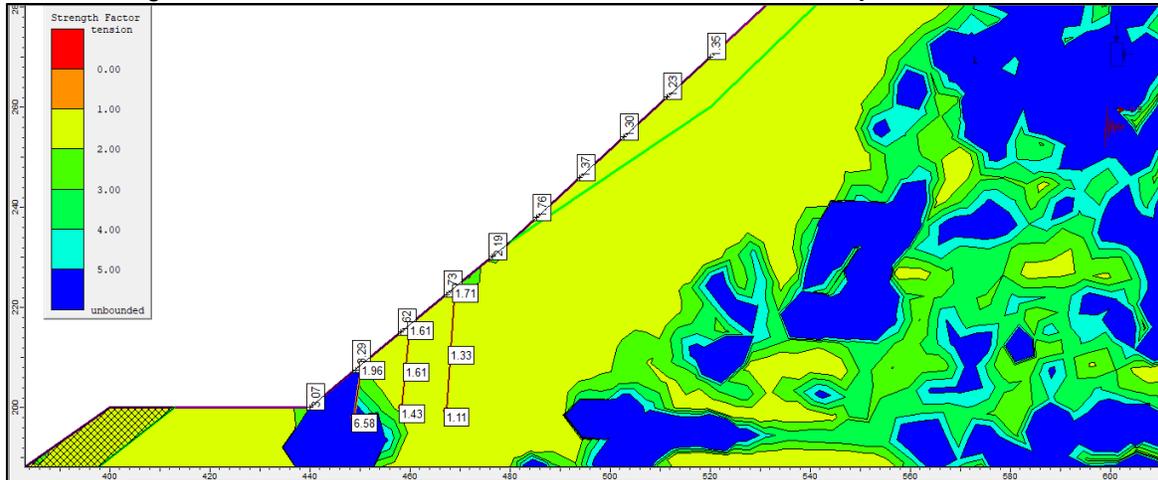
La sección geotécnica y el cálculo del SF se presenta en la Figura 11-57. La condición de movimiento libre en el eje X para las paredes del modelo genera la condición de aumento del SF a medida que se acerca hacia el centro de la sección, indicando que, por efecto de la carga sísmica, la pared derecha presenta un aumento de la deformación, la cual no afectaría el talud para la evaluación de fallamiento. Se observa que el contacto con las Gravas de Alto Hospicio en la parte inferior de la ladera limita este comportamiento, produciendo un cambio brusco del valor del SF.

Figura 11-57: Sección geotécnica Cantera 5N. Depósitos No Consolidados: Enrejado Rojo. Depósitos Antrópicos: Achurado Negro. Gravas de Alto Hospicio: Achurado Naranja. Formación Punta Barranco: resto del área.



El talud de roca tiene un SF mayor a los observados en la ladera con Depósitos No Consolidados (parte superior) y los valores que se indican alrededor de las estructuras que afloran en la ladera, los que no son menores a 1, sugiriendo que no existiría falla del macizo en este sector (Figura 11-58). De esta forma, se considera más probable un mecanismo de fallamiento a través de caídas de rocas como área de influencia de la cantera.

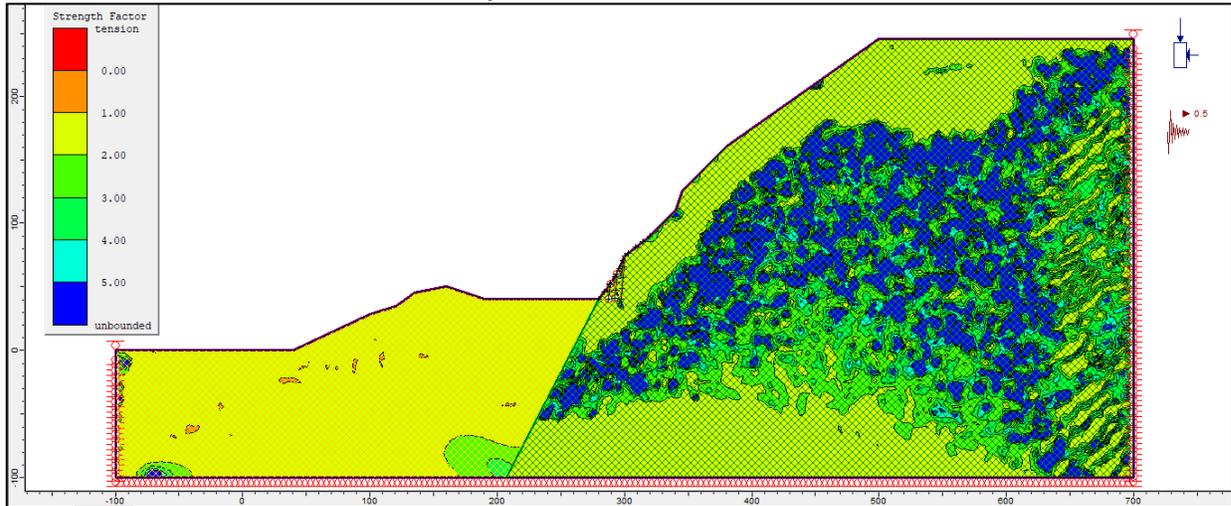
Figura 11-58: Valores de SF alrededor de estructuras en el talud para Cantera 5N.



- Análisis Cantera 6Rx

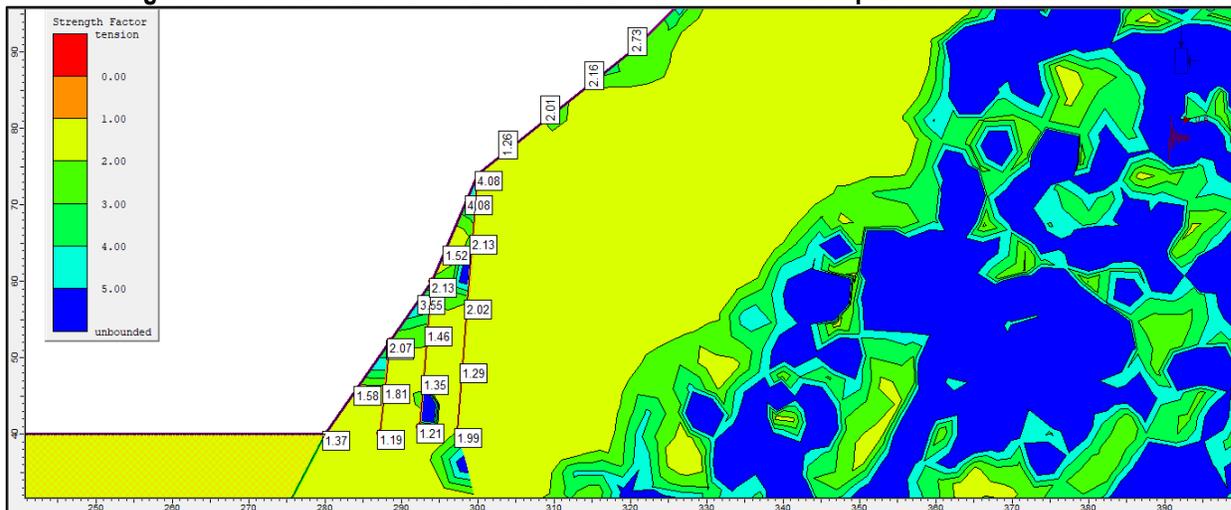
La Figura 11-59 presenta la sección geotécnica con los resultados del SF para la condición sísmica. Se observa que no existen zonas cercanas al talud donde el SF sea menor 1, incluso cerca de los sets estructurales definidos en el área. Las variaciones del SF en profundidad responderían a efectos de borde y concentración de esfuerzos tanto en el contacto de las unidades de suelo y roca, como en los límites inferiores del modelo.

Figura 11-59: Sección geotécnica Cantera 6Rx. Achurado verde corresponde a Formación Punta Barranco, achurado amarillo Gravas de Alto Hospicio. Se incorporan resultados de modelo sísmico, ploteados con SF.



Los valores de SF alrededor de las estructuras y el talud se observan en la Figura 11-60, los cuales son considerablemente mayores a 1, indicando que no existirían fracturas considerables ni deslizamientos mayores en el talud producto de la condición del macizo rocoso ni de la orientación de las estructuras.

Figura 11-60: Valores de SF alrededor de estructuras en el talud para Cantera 6Rx.

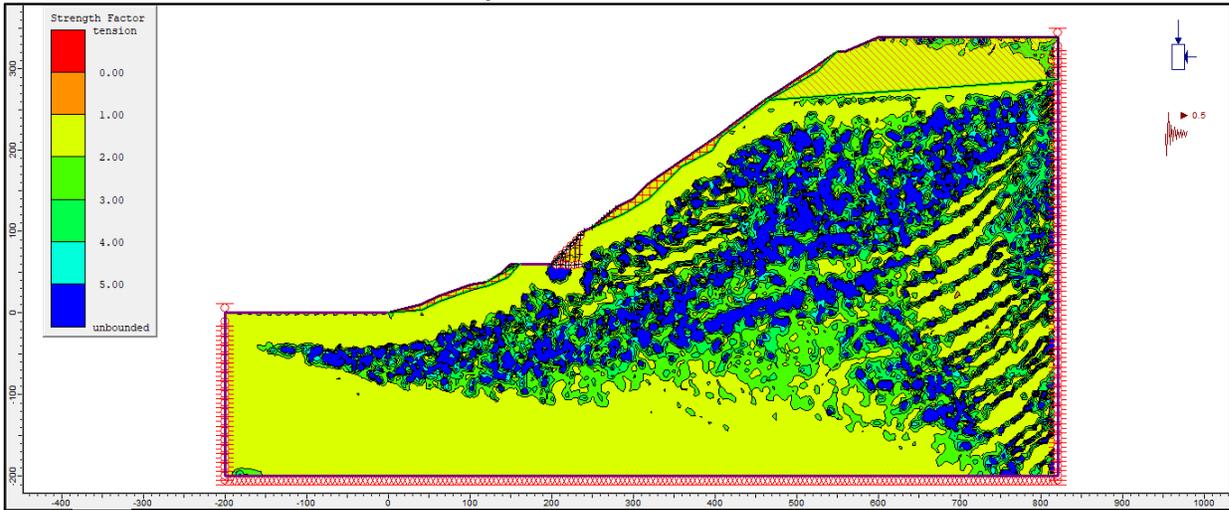


De esta forma, se asumirá la Cantera 6Rx como susceptible de generar caídas de roca, con tamaños de bloques definidos en el Cuadro 11.7-18.

- Análisis Cantera 8

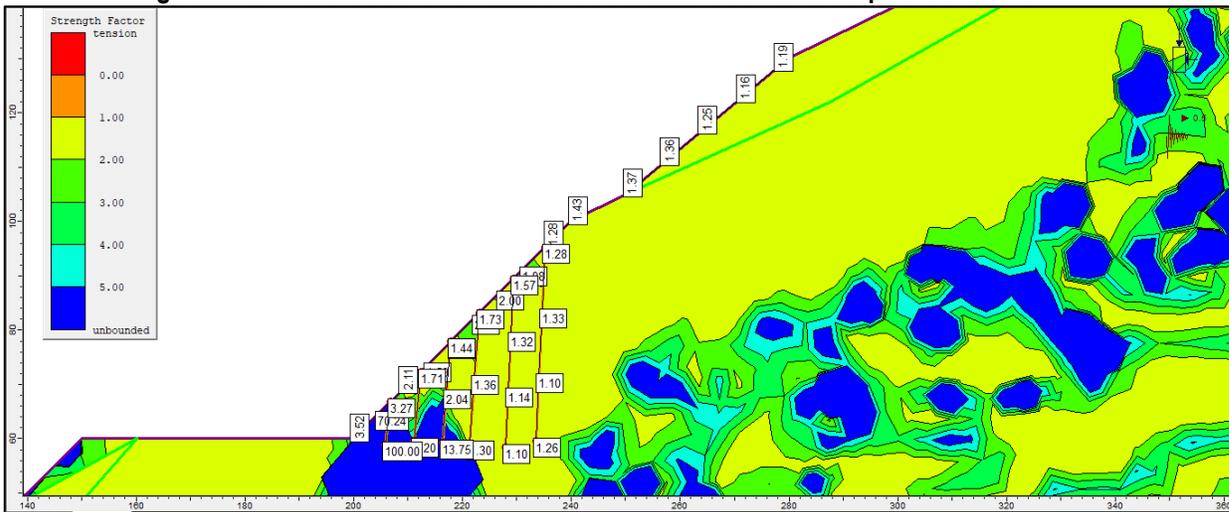
El mapa de valores de SF en la sección geotécnica para la cantera 8 (Figura 11-61) indica una estabilidad alta para el sector, con índices que sobrepasan el límite de 1. Se observa, al igual que en las canteras anteriores, una alta resistencia al esfuerzo de corte producido por la condición sísmica y el esfuerzo vertical sobre el talud, a través de la distribución de SF en profundidad, el cual sigue la tendencia de la ladera superficial (disminución de esfuerzo vertical).

Figura 11-61: Sección geotécnica Cantera 8. Achurado verde corresponde a Formación Punta Barranco, achurado amarillo Gravas de Alto Hospicio. Se incorporan resultados de modelo sísmico, ploteados con SF.



En el caso del talud a analizar y las estructuras que afloran en la pared de este, si bien tienen una orientación perpendicular a la pared, se incorporaron en el modelo a fin de determinar el efecto que estas tienen sobre la pared. Tanto en el talud como en los sets estructurales, los valores de SF caracterizados localmente resultan mayores a 1 (Figura 11-62).

Figura 11-62: Valores de SF alrededor de estructuras en el talud para Cantera 8.



iii) Estimación de caída de rocas para Canteras 5, 6Rx y 8.

Se realizó una evaluación de la caída de rocas a través de los taludes y laderas a través del programa Rockfall®, basado en los resultados de el Cuadro 11.7-18. Se identificaron los sectores capaces de soltar material hacia niveles inferiores y las unidades geotécnicas correspondientes, los cuales se resumen en el Cuadro 11.7-19. Los pesos se estimaron considerando aproximación esférica de la forma de los materiales en base al espaciamiento de las estructuras observadas y los tamaños de bloques visualizados en terreno en el piso y ladera inferior de las canteras.

Cuadro 11.7-19: Tamaños máximos de caída de rocas para Canteras 5, 6Rx y 8.

Unidad Geotécnica	Peso Máximo [Kg]	Desviación Estándar [kg]
-------------------	------------------	--------------------------

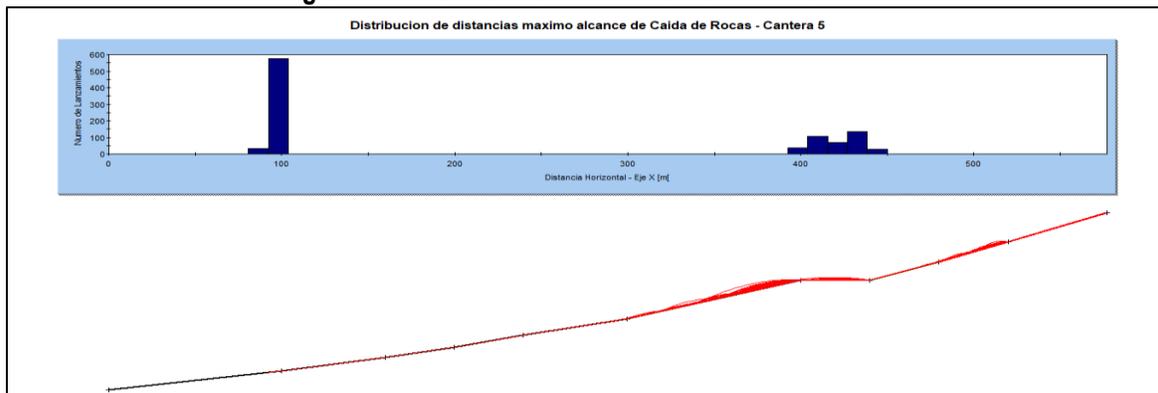
Formación Punta Barranco – Cantera 5	1000	200
Formación Punta Barranco – Cantera 6Rx	1000	200
Formación Punta Barranco – Cantera 8	1000	500
Depósitos No Consolidados	100	30
Depósitos Antrópicos	100	50

Las velocidades iniciales de caída para todos los puntos se fijaron en 0 [m/s] y el efecto de sismos se incorporó intrínsecamente como factor desencadenante de caída de roca en todos los sectores sobre y bajo la línea del talud. Se consideran 1000 lanzamientos, con 50 intervalos de muestreo desde sectores de roca (afloramiento y talud) y material no consolidado (Depósitos No Consolidados) tanto para niveles superiores al talud como inferiores con Depósitos Antrópicos y Depósitos No Consolidados.

A fin de incorporar la rugosidad de los tramos de la ladera, se incorporaron ángulos de rugosidad iguales a los ángulos de fricción del material, disminuyendo la energía del material rodado. Esto se realizó principalmente en las laderas inferiores a la cantera, en materiales tipo Depósitos Antrópicos y Depósitos No Consolidados.

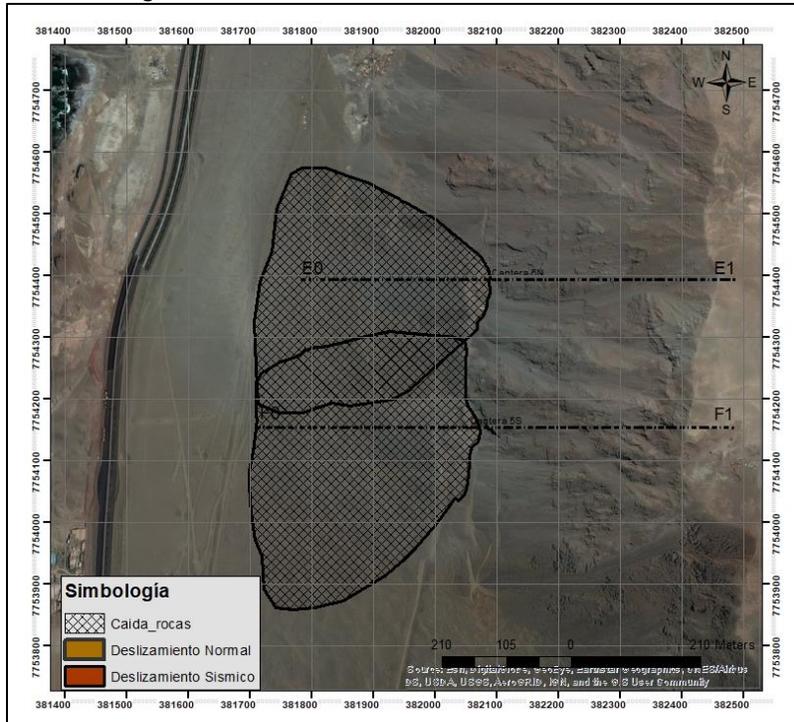
Para el caso de la Cantera 5, la Figura 11-63 muestra a simulación de las trayectorias las que tendrían un alcance horizontal de hasta 350 - 400 [m] con una alta acumulación a 100 [m] de inicio de la sección. La plataforma de operación concentraría cerca del 30% de los lanzamientos simulados, los cuales podría corresponder a tamaños mayores potencialmente.

Figura 11-63: Distancia de Caída de Rocas - Cantera 5



De esta forma, se estima un largo alcance en este sector, el cual, debido a la similitud de las inclinaciones de taludes y laderas se homologaría para el caso de ambas canteras. La Figura 11-64 presenta la extensión de caída de rocas para la Cantera 5.

Figura 11-64: Extensión caída de rocas - Cantera 5



La cantera 6Rx presenta una acumulación mayor en la plataforma de operación (Figura 11-65), con cerca del 90% del material proyectado. El factor limitante y que favorece la detención de caída de rocas es la diferencia de cota que se produce en el área de operación, el cual actúa como un mega pretil de contención de material cerca del punto 180 [m] de la sección. Posterior a esto, solo el 10% del material alcanzaría distancias mayores, los que no superan los 100[m] del inicio de la sección. La

Figura 11-66 presenta en planta la extensión del material proyectado.

Figura 11-65: Distancia de Caída de Rocas - Cantera 6Rx

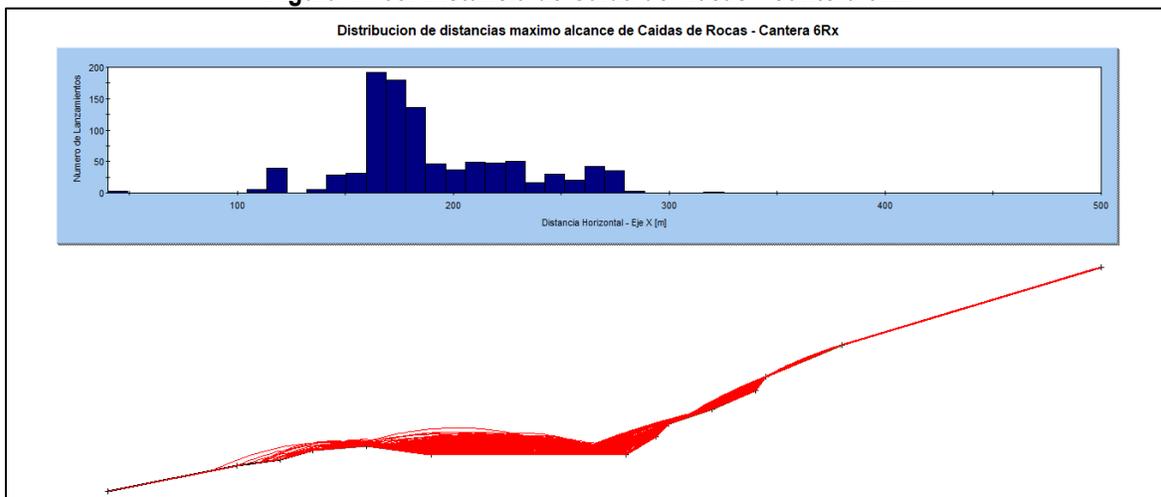
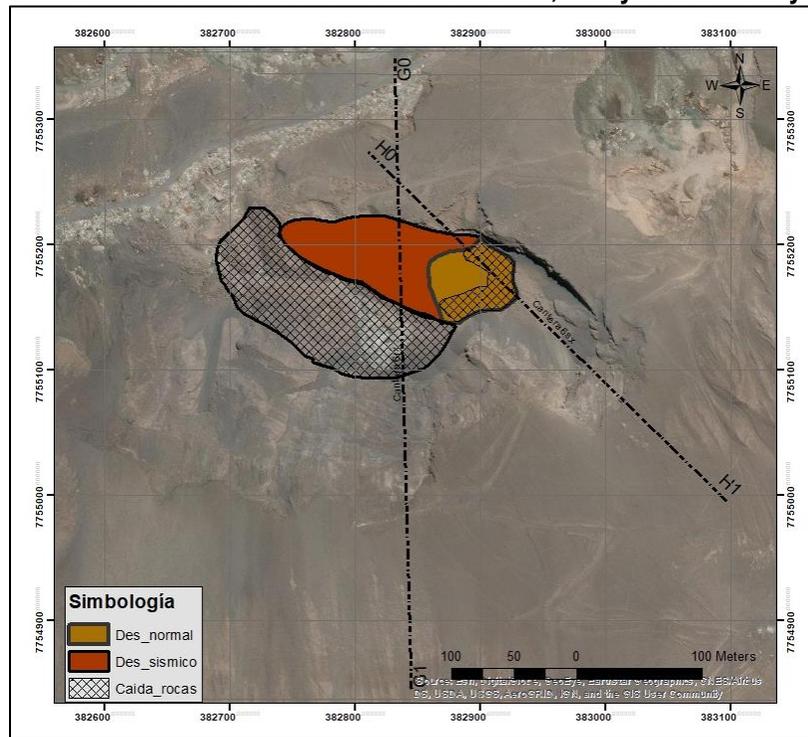
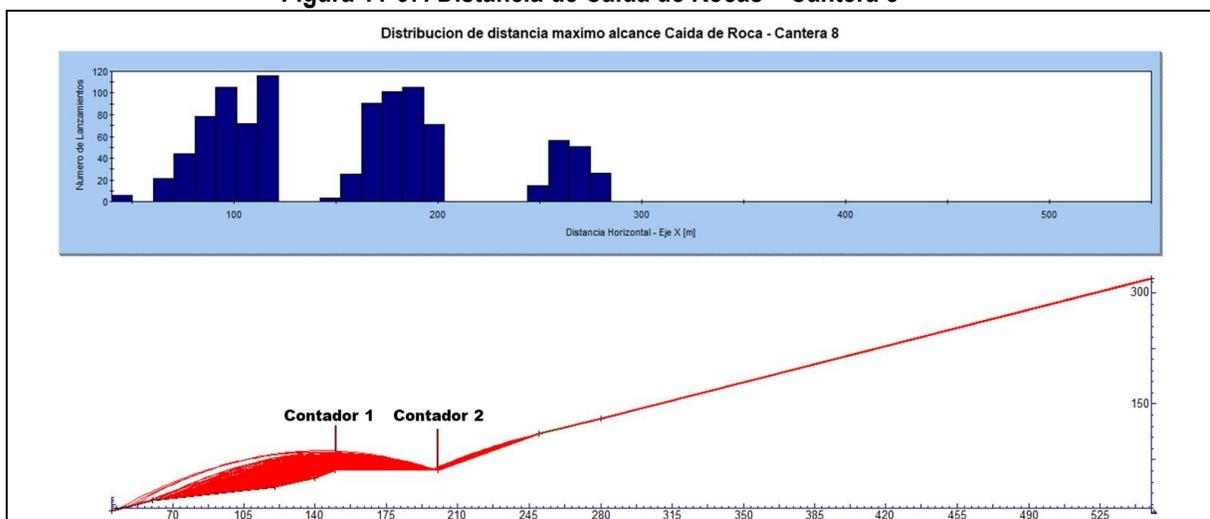


Figura 11-66: Extensión Caídas de Rocas - Cantera 6, incluye sector roca y suelo.



La Cantera 8 es presentada en la Figura 11-67, donde se observan 3 áreas de concentración de material. Un primer sector ubicado cerca del inicio del talud, el cual se asocia con un cambio en el ángulo de inclinación de la ladera. Si bien estos materiales no alcanzan una distancia considerable, la acumulación sobre el talud actúa como un agente desencadenante de un largo deslizamiento de la unidad Depósitos No Consolidados. Un Segundo punto de acumulación corresponde a la plataforma de operación de la cantera, la cual concentra alrededor del 40% del material proyectado.

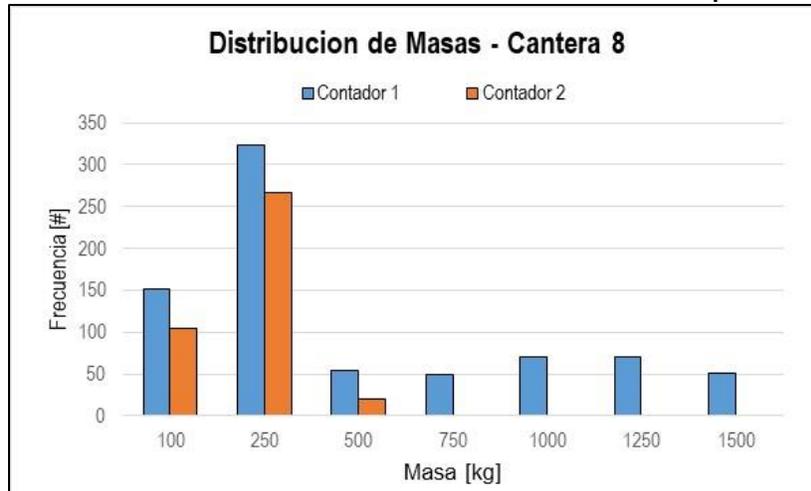
Figura 11-67: Distancia de Caída de Rocas – Cantera 8



Finalmente, la ladera ubicada en la proyección inferior del talud concentra alrededor del 50% del material proyectado, el cual es activado por material contenido en este tramo de la sección debido a material proveniente de sectores superiores, como también por material que tiende a deslizar por sí mismo.

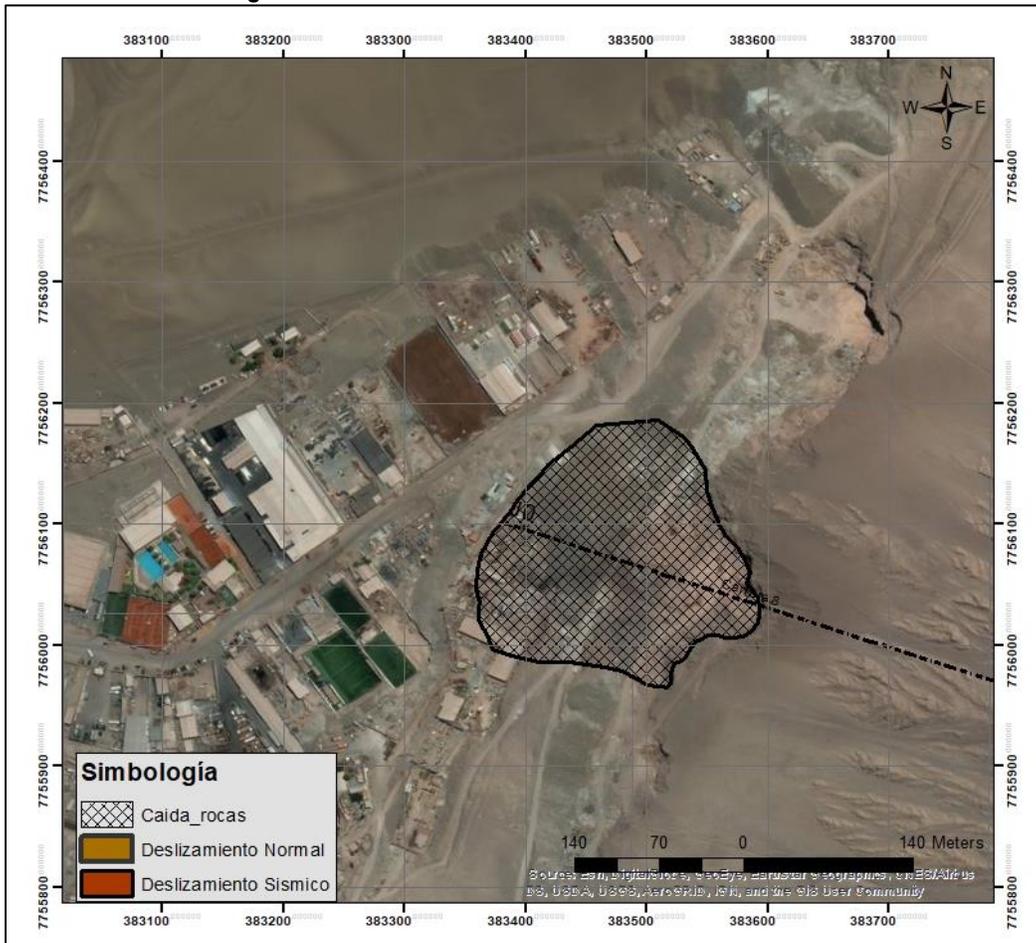
Debido a la distancia de alcance de esta Cantera, se reporta la distribución de tamaños (basado en masas de las rocas rodantes) la que se observa en la Figura 11-67. Ambas poblaciones de datos han sido medidas en los contadores indicados en la Figura 11-68, de los cuales se infieren que masas no mayores a 500 [kg] podrían cruzar desde la cantera hacia la ladera inferior, siendo 250 [kg] un valor promedio aceptable.

Figura 11-68: Distribución de tamaño de caída de rocas en base a su peso – Cantera 8.



La Figura 11-69 presenta la distribución en planta de la caída de rocas para la cantera 8. Se observa el área de influencia sobre instalaciones y caminos de paso, ante las cuales se deben realizar medidas de mitigación correspondientes a fin de disminuir potenciales daños.

Figura 11-69: Extensión Caídas de Rocas - Cantera 8.



11.7.4 Conclusiones y recomendaciones

a) Conclusiones

Se analizaron las canteras en función del objetivo de determinar potenciales deslizamientos y sus alcances. Si bien las unidades geotécnicas se caracterizaron a través de información disponible tanto en publicaciones como en trabajos de memoria, se realizó un análisis crítico de esta información a fin de corroborar la aplicabilidad de los parámetros geotécnicos para el caso en estudio.

Para el análisis de falla límite en el talud en la unidad de Gravas de Alto Hospicio se aplicaron los valores de los parámetros geotécnicos de resistencia y rigidez recopilados en la literatura. Estos resultaron apropiados debido a que se sometieron a escenarios conservadores de análisis de falla. Adicionalmente, se revisaron los ensayos tipo SPT (*Standar penetration test*) y las respuestas de asentamiento en las cuales Donoso (2014) basó sus estimaciones. Estos ensayos entregan información valiosa para la definición de un rango de los parámetros de resistencia de las Gravas de Alto Hospicio, pero insuficientes para trabajos de mayor detalle, tales como obras de mitigación (fortificación) o construcción de estructuras sobre y para la unidad de Gravas de Alto Hospicio. Se desconoce la característica del contenido salino de las Gravas de Alto Hospicio y su efecto en la estabilidad vertical del estrato.

Los alcances de las canteras para la condición sísmica (mayor alcance) en términos de la profundidad de la superficie de falla hacia la pared resultan ser comparativamente mayores al caso de un escenario estático (no sísmico) lo que es congruente con las fuerzas que actúan sobre la pared, la altura y ángulo de talud. Sin embargo, las únicas variables a controlar para disminuir las extensiones (o en el mejor de los casos evitar deslizamientos) responden a la geometría de las paredes, cuyos parámetros deben ser disminuidos ya sea por generación de plataformas o bermas intermedias, como también por la forma de operación.

Se observa que en el caso de la Cantera 1, si bien tiene una gran extensión y altura, los deslizamientos son menores a los que se podrían generar si la cantera tuviera un solo talud conectado. Esto se debe a una operación más controlada, con desbordes desde niveles superiores a fin de evitar la interacción de la plataforma de operación con grandes conos de extracción, como se observó en las Canteras 2, 3 y 4. En este contexto, merece especial cuidado la Cantera 4, debido a su cercanía a una ruta de alto tránsito (Ruta 1).

La misma situación se observa en la Cantera 7, la que, si bien tiene una altura menor, los deslizamientos producto de actividad sísmica podrían alcanzar áreas donde existen instalaciones y asentamientos humanos, ya sea mediante deslizamientos o caída de rocas. Se observa que trabajos de extracción realizados en el área sur de esta cantera dejaron ángulos de talud menores, lo que, si bien no se evaluaron en este informe, podrían generar deslizamientos de bajo volumen, capaces de ser contenidos en la plataforma de operación, como también caídas de rocas que no tendrían grandes alcances.

En términos generales, los botaderos son una fuente de contribución de material para caída de rocas y rodados que potencialmente pueden afectar áreas de tránsito de personas e instalaciones en línea directa con las canteras. Estos botaderos además son susceptibles a deslizamientos, sobre todo ante condición sísmica, lo cual se ve evidenciado por la presencia de grietas de tensión (observadas en terreno). Además, la permanente caída de nuevo material produce una sobrecarga sobre las laderas de los botaderos, lo cual puede contribuir a nuevos deslizamientos.

Finalmente, los escenarios analizados en este informe corresponden definiciones conservadoras tanto en la interpretación geotécnica de la disposición y contacto de las unidades que subyacen las canteras, como también de los valores de aceleraciones posibles de alcanzar. Esto probablemente podrá someterse a nuevas evaluaciones considerando escenarios puntuales que delimiten aún más las áreas de alcance de los potenciales deslizamientos y caídas de material desde los taludes. Así mismo, se entregan los lineamientos para estudios de diseño de elementos de protección y evaluación de ángulos de inclinación para futuras etapas de evaluación de estos sectores.

b) Recomendaciones

Se recomienda realizar ensayos destinados a mejorar la comprensión de la roca y los depósitos. Se recomienda aplicar ensayos de tipo triaxial a futuro para corroborar los valores de ángulos de fricción de las Gravas de Alto Hospicio, puesto que estos parámetros se obtuvieron a través de ensayos *insitu* sobre comportamiento de cargas y deformaciones verticales.

Se recomienda la aplicación de ensayos de corte, tanto para la condición seca normal como seca sin sales, a fin de determinar las variaciones de la resistencia y rigidez de las Gravas de Alto Hospicio y su efecto en la estabilidad vertical del estrato.

De esta manera se sugiere requerir lineamientos operacionales para las empresas que trabajan en el sector a fin de aumentar la seguridad en la operación tanto para las personas como para las instalaciones, lo que en el largo plazo disminuiría las áreas de influencia de las canteras analizadas. Especial cuidado merece la Cantera 4, la que por su cercanía a una ruta de alto tránsito (Ruta 1) debería tener prioridad en los trabajos de mejoramiento, no solo del talud sino del sector de acumulación de Depósitos Antrópicos.

En el caso específico de cada cantera, el Cuadro 11.7-20 presenta las recomendaciones y consideraciones finales por cantera. Es importante destacar el estado actual de las Canteras 7 y 8, y su potencial impacto sobre instalaciones, que sugieren dar prioridad a trabajos de mejoramiento en estos sectores por sobre otras canteras.

En términos generales las medidas de mitigación para la operación deben estar orientadas a la restricción de instalaciones de plantas de clasificación u otras estructuras en sectores susceptibles de caída de rocas, como también a las operaciones intensivas en el área. Además, la operación de cargo de material se debería hacer no directamente desde el talud, sino de sectores de acopios establecidos los cuales aseguren que no se generan cornisas ni deslizamientos menores (secuenciales) de la pared por efecto “cuchara” de la excavación.

En el caso de los botaderos, se debe tener especial atención a la aparición de grietas de tensión, llevando un monitoreo de los vaciados de reparación de estos a fin de poder evaluar el estado actual. Es importante desarrollar pretilos de contención que delimiten el área de descarga en botaderos, los cuales evitaren que el personal realice desbordes directos que pueden proyectar material sobre otras instalaciones en la línea vertical, como también el potencial deslizamiento repentino por la aparición de grietas no identificadas.

Cuadro 11.7-20: Recomendaciones finales por cantera

Cantera	Caída de Rocas	Deslizamientos
Cantera 1	Resguardar operación del sector, protegiendo a personal y equipos de caída de rocas, mediante la generación de pretilos de contención que delimiten el área de caída de rocas y la prohibición de instalaciones de máquinas de clasificación de tamaño, lo que aumentaría la frecuencia de personal en el área.	Realizar una extracción orientada a disminuir el ángulo de talud y altura de la cantera. Operaciones de desborde donde el equipo elimina la cresta del talud desde la parte superior deben ser restringidas por una potencial activación de grietas de tensión y el consecuente deslizamiento de un bloque completo de la pared.
Cantera 2	Restringir operación a una distancia mayor a la que se delimita por caída de rocas. Generación de altos pretilos que generen una cuenca entre la zona de operación y el talud a fin de contribuir a la acumulación del material.	Extracción orientada a disminuir la inclinación del talud y generar una berma que permita una altura de talud menor y contención de material de niveles superiores.
Cantera 3	Debido a su estado no activo, se recomienda realizar cierre del sector para evitar ingreso de personas y equipos. El volumen de deslizamiento podría contenerse en la plataforma de operación.	
Cantera 4	Operación se debe realizar fuera del sector demarcado por caída de rocas desde el talud. En el caso de la caída de rocas desde el botadero, se debe detener el vaciado en este sector ya que podrían seguir una trayectoria por sobre la Ruta 1.	Disminuir altura e inclinación del talud. Evitar la instalación de estructuras en el área de operación.
Cantera 5	Debido a su estado no activo, se recomienda realizar cierre del sector para evitar ingreso de personas y equipos. Previamente se recomienda realizar trabajos de mejoramiento de los botaderos, idealmente cortando las grietas de tensión para generar deslizamiento controlado los cuales deben coordinarse con trabajos de limpieza en la Ruta 1.	
Cantera 6	El sector que delimita la plataforma de operación actúa como barrera para la caída de rocas, por lo que se debe evitar realizar la extracción de este sector, dejando la cantera encerrada en su condición actual, limitando el ingreso de personas y equipos.	Realizar trabajos orientados a disminuir la inclinación y altura del talud. Generación de bermas intermedias y extensión de la pata principalmente. Especial atención con caída de rocas desde niveles superiores al encontrarse en contacto con talud de roca la que puede formar bloques de 1[m] aprox.
Cantera 7	Generar pretil de contención de caída de rocas con material proveniente de talud.	Disminuir ángulo de inclinación y altura de talud, utilizando materiales para realizar pretilos de contención de caída de rocas. Debido al largo alcance que potencialmente alcanza el escenario sísmico sobre sectores urbanos, se sugiere dar prioridad a trabajos de mitigación en esta cantera.
Cantera 8	Se recomienda eliminar cobertura de cantera, previo análisis de futuros deslizamientos gatillados por la remoción de este material. Posteriormente utilizar esa unidad para generar altos pretilos de contención que generen una cuenca de acumulación en el sector. Otra opción es la ubicación de estructuras en la cresta del talud que contengan material de menor tamaño que proviene de las partes altas de la ladera. Se debe dar prioridad a estos trabajos.	

11.7.5 Glosario

σ_1	Esfuerzo principal, actuando de forma vertical en un plano. Para fines de este informe se considerará de origen litoestático.
σ_3	Esfuerzo principal, actuando de forma horizontal en un plano. Para fines de este informe será considerado mediante la relación del esfuerzo vertical por el factor tectónico (k), definido como 0.5.
σ_n	Esfuerzo normal inducido en un plano. Podría coincidir con un esfuerzo principal, en cuyo caso no existirán esfuerzos de corte asociado.
τ	Esfuerzo de corte, asociados esfuerzos no principales actuando en una superficie
Esfuerzos Inducidos	Cualquier esfuerzo que se origine por proyección en un cierto ángulo de los esfuerzos principales, o que sea generado por una fuerza externa al sistema como en un caso sísmico.
Orientación de Estructuras	Característica de un plano estructural que define la orientación que este sigue en relación con el norte. Se buscará seguir la notación de Dip/DipDir para este informe.
D	Factor de Disturbancia el cual mide la condición actual del macizo rocoso por efectos de tronadura, excavación o meteorización. Utilizado principalmente para el criterio de falla de Hoek y Brown.
mb	Característica intrínseca de roca intacta, que relaciona el criterio de fractura de Hoek y Brown con parámetros de ensayos triaxiales para roca intacta.
GSI	<i>Geological Strength Index</i> , valor de clasificación de macizo rocoso basado principalmente en la condición estructural y de las caras visibles de la unidad estudiada (pared de roca, talud, etc.).
Factor de Seguridad, FS	FS, relación entre los esfuerzos máximos aceptables y los esfuerzos inducidos en un elemento. Superficies o materiales fallarán cuando el FS es menor a 1. La situación límite es FS = 1.
Factor de Resistencia, SF	<i>Strength Factor</i> , SF. Relación entre las propiedades de resistencia de un material y los esfuerzos inducidos sobre un elemento de este material. El caso límite es SF = 1, y material fallaría con SF < 1.
Cantera	Sector de extracción de áridos, generalmente a cielo abierto, que considera operaciones de carguío y transporte, con actividades de clasificación de material. Es poco frecuente que se realicen perforación y tronadura para la extracción. Se compone de uno o varios taludes.
Talud	En minería u obras civiles corresponde a la pared generada por trabajos de extracción en una ladera a fin de optimizar el avance horizontal y el volumen de material extraído (o área abierta).
Pata	Punto inferior del talud.
Cresta	Punto más alto de un talud
Berma	Distancia horizontal de seguridad que se establece entre dos taludes a fin de evitar la continuidad vertical. De esta forma a la misma cota se encuentra la cresta del talud inferior con la pata del talud superior.
Área de Operación	Sector donde se realizan todas las operaciones de extracción, que generalmente coincide con la línea a la cual se ubica la pata del talud inicial (inferior). En este sector generalmente se podrían encontrar personas, instalaciones y equipos.
Botadero	Sector donde se acumula material de descarte producto de las operaciones de extracción (sobre tamaños, por ejemplo). Para el caso de este informe, se considerará que su ubicación está sobre la ladera inferior de las Canteras.
Área de Influencia o Alcance	Área sobre la cual se proyecta el material que producto de deslizamientos o caídas de roca se depositaría en niveles inferiores de la cantera.

11.8 ANTECEDENTES ADICIONALES

Figura 11-70 Inventario de remociones en masa de Opazo et al. (2018).

Fecha de ocurrencia	Coord. Este (m)	Coord. Norte (m)	Tipo de rasgo	Tipo de remoción en masa principal	Tipo de remoción en masa secundaria	Tipo de material principal	Tipo de material secundario	Estado	Estilo	Condicionante	Desencadenante
01-04-2014	381.263	7.767.331	Zona de generación	Caída	No observada	Roca	-	Activo	Único	Relieve y morfología	Evento sísmico
01-04-2014	383.580	7.756.066	Zona de generación	Caída	Deslizamiento traslacional	Roca	Suelo	Activo	Compuesto	Relieve y morfología	Evento sísmico
01-04-2014	382.579	7.755.065	Zona de generación	Caída	Deslizamiento traslacional	Roca	Suelo	Activo	Compuesto	Relieve y morfología	Evento sísmico
-	382.079	7.755.472	Zona de generación	Caída	Deslizamiento traslacional	Roca	Suelo	Activo	Compuesto	Relieve y morfología	-
01-04-2014	382.950	7.764.636	Zona de generación	Caída	Deslizamiento traslacional	Roca	Suelo	Activo	Compuesto	Relieve y morfología	Evento sísmico
01-04-2014	383.318	7.761.177	Zona de generación	Caída	Deslizamiento traslacional	Roca	Suelo	Activo	Compuesto	Relieve y morfología	Evento sísmico
01-04-2014	383.172	7.760.574	Zona de generación	Caída	No observada	Roca	-	Activo	Único	Relieve y morfología	Evento sísmico
01-04-2014	383.648	7.759.970	Zona de generación	Caída	No observada	Roca	-	Activo	Único	Relieve y morfología	Evento sísmico
01-04-2014	381.710	7.764.638	Zona de generación	Caída	Deslizamiento traslacional	Roca	Suelo	Activo	Compuesto	Relieve y morfología	Evento sísmico
-	380.746	7.765.012	Zona de generación	Caída	Deslizamiento traslacional	Roca	Suelo	Activo	Compuesto	Relieve y morfología	-
-	381.866	7.764.014	Zona de generación	Caída	Deslizamiento traslacional	Roca	Suelo	Activo	Compuesto	Relieve y morfología	-
-	381.941	7.764.361	Zona de generación	Caída	Deslizamiento traslacional	Roca	Suelo	Activo	Compuesto	Relieve y morfología	-
-	382.106	7.765.654	Zona de generación	Caída	Deslizamiento traslacional	Roca	Suelo	Activo	Compuesto	Relieve y morfología	-
-	381.125	7.764.947	Zona de generación	Caída	Deslizamiento traslacional	Roca	Suelo	Activo	Compuesto	Relieve y morfología	-
01-04-2014	381.226	7.767.294	Zona de generación	Caída	No observada	Roca	-	Activo	Único	Relieve y morfología	Evento sísmico
01-04-2014	383.307	7.755.555	Zona de generación	Caída	Deslizamiento traslacional	Roca	Suelo	Activo	Compuesto	Relieve y morfología	Evento sísmico

Fecha de ocurrencia	Coord. Este (m)	Coord. Norte (m)	Tipo derasgo	Tipo de remoción en masa principal	Tipo de remoción en masa secundaria	Tipo de material principal	Tipo de material secundario	Estado	Estilo	Condicionante	Desencadenante
-	382.133	7.754.416	Zona de generación	Caída	Deslizamiento traslacional	Roca	Suelo	Activo	Compuesto	Relieve y morfología	-
-	382.240	7.765.103	Zona de generación	Caída	Deslizamiento traslacional	Roca	Suelo	Activo	Compuesto	Relieve y morfología	-
01-04-2014	382.276	7.764.715	Zona de generación	Caída	No observada	Roca	-	Activo	Único	Relieve y morfología	Evento sísmico
01-04-2014	382.045	7.764.529	Zona de generación	Caída	No observada	Roca	-	Activo	Único	Relieve y morfología	Evento sísmico
01-04-2014	382.427	7.764.944	Zona de generación	Caída	No observada	Roca	-	Activo	Único	Relieve y morfología	Evento sísmico
01-04-2014	384.344	7.756.755	Zona de generación	Caída	No observada	Roca	-	Activo	Único	Relieve y morfología	Evento sísmico
01-04-2014	384.213	7.757.127	Zona de generación	Caída	No observada	Roca	-	Activo	Único	Relieve y morfología	Evento sísmico
01-04-2014	384.028	7.757.397	Zona de generación	Caída	No observada	Roca	-	Activo	Único	Relieve y morfología	Evento sísmico
01-04-2014	383.974	7.757.690	Zona de generación	Caída	No observada	Roca	-	Activo	Único	Relieve y morfología	Evento sísmico
01-04-2014	383.839	7.757.955	Zona de generación	Caída	No observada	Roca	-	Activo	Único	Relieve y morfología	Evento sísmico
01-04-2014	383.927	7.758.128	Zona de generación	Caída	No observada	Roca	-	Activo	Único	Relieve y morfología	Evento sísmico
01-04-2014	383.853	7.758.322	Zona de generación	Caída	No observada	Roca	-	Activo	Único	Relieve y morfología	Evento sísmico
01-04-2014	383.870	7.758.779	Zona de generación	Caída	No observada	Roca	-	Activo	Único	Relieve y morfología	Evento sísmico
01-04-2014	383.816	7.758.672	Zona de generación	Caída	No observada	Roca	-	Activo	Único	Relieve y morfología	Evento sísmico
01-04-2014	383.613	7.760.110	Zona de generación	Caída	No observada	Roca	-	Activo	Único	Relieve y morfología	Evento sísmico
01-04-2014	383.831	7.760.140	Zona de generación	Caída	No observada	Roca	-	Activo	Único	Relieve y morfología	Evento sísmico
01-04-2014	383.725	7.760.282	Zona de generación	Caída	No observada	Roca	-	Activo	Único	Relieve y morfología	Evento sísmico
01-04-2014	383.527	7.760.611	Zona de generación	Caída	No observada	Roca	-	Activo	Único	Relieve y morfología	Evento sísmico

Fecha de ocurrencia	Coord. Este (m)	Coord. Norte (m)	Tipo de rasgo	Tipo de remoción en masa principal	Tipo de remoción en masa secundaria	Tipo de material principal	Tipo de material secundario	Estado	Estilo	Condicionante	Desencadenante
01-04-2014	383.349	7.760.851	Zona de generación	Caida	No observada	Roca	-	Activo	Único	Relieve y morfología	Evento sísmico
01-04-2014	383.272	7.760.969	Zona de generación	Caida	No observada	Roca	-	Activo	Único	Relieve y morfología	Evento sísmico
01-04-2014	383.141	7.761.118	Zona de generación	Caida	No observada	Roca	-	Activo	Único	Relieve y morfología	Evento sísmico
01-04-2014	383.016	7.761.343	Zona de generación	Caida	No observada	Roca	-	Activo	Único	Relieve y morfología	Evento sísmico
-	382.385	7.763.995	Zona de generación	Caida	No observada	Roca	-	Activo	Único	Relieve y morfología	-
01-04-2014	384.008	7.764.821	Zona de generación	Caida	Deslizamiento traslacional	Roca	Suelo	Activo	Compuesto	Relieve y morfología	Evento sísmico
01-04-2014	385.418	7.757.517	Zona de generación	Caida	No observada	Roca	-	Activo	Único	Relieve y morfología	Evento sísmico
01-04-2014	385.451	7.757.353	Zona de generación	Caida	No observada	Roca	-	Activo	Único	Relieve y morfología	Evento sísmico
01-04-2014	384.406	7.756.541	Zona de generación	Caida	No observada	Roca	-	Activo	Único	Relieve y morfología	Evento sísmico
01-04-2014	384.523	7.756.483	Zona de generación	Caida	No observada	Roca	-	Activo	Único	Relieve y morfología	Evento sísmico
-	381.468	7.767.615	Depósito	Flujo	No observada	Depósito no consolidado	-	Activo	Compuesto	Relieve y morfología	-
-	382.393	7.766.228	Depósito	Flujo	No observada	Depósito no consolidado	-	Activo	Compuesto	Relieve y morfología	-
-	382.925	7.761.115	Depósito	Flujo	No observada	Depósito no consolidado	-	Activo	Compuesto	Relieve y morfología	-
-	383.141	7.760.822	Depósito	Flujo	No observada	Depósito no consolidado	-	Activo	Compuesto	Relieve y morfología	-
-	383.139	7.760.940	Depósito	Flujo	No observada	Depósito no consolidado	-	Activo	Compuesto	Relieve y morfología	-
-	383.047	7.761.015	Depósito	Flujo	No observada	Depósito no consolidado	-	Activo	Compuesto	Relieve y morfología	-
-	383.763	7.758.959	Depósito	Flujo	No observada	Depósito no consolidado	-	Activo	Compuesto	Relieve y morfología	-
-	383.703	7.759.250	Depósito	Flujo	No observada	Depósito no consolidado	-	Activo	Compuesto	Relieve y morfología	-

Fecha de ocurrencia	Coord. Este (m)	Coord. Norte (m)	Tipo de rasgo	Tipo de remoción en masa principal	Tipo de remoción en masa secundaria	Tipo de material principal	Tipo de material secundario	Estado	Estilo	Condicionante	Desencadenante
-	386.835	7.761.364	Depósito	Flujo	No observada	Depósito no consolidado	-	Activo	Compuesto	Relieve y morfología	-
-	389.353	7.754.333	Depósito	Flujo	No observada	Depósito no consolidado	-	Activo	Compuesto	Relieve y morfología	-
-	389.438	7.754.501	Depósito	Flujo	No observada	Depósito no consolidado	-	Activo	Compuesto	Relieve y morfología	-
-	383.691	7.754.364	Depósito	Flujo	No observada	Depósito no consolidado	-	Activo	Compuesto	Relieve y morfología	-
-	382.812	7.765.087	Depósito	Flujo	No observada	Depósito no consolidado	-	Activo	Compuesto	Relieve y morfología	-
-	382.723	7.765.785	Depósito	Flujo	No observada	Depósito no consolidado	-	Activo	Compuesto	Relieve y morfología	-
-	389.248	7.756.286	Depósito	Flujo	No observada	Depósito no consolidado	-	Activo	Compuesto	Relieve y morfología	-
-	385.076	7.764.978	Depósito	Flujo	No observada	Depósito no consolidado	-	Activo	Compuesto	Relieve y morfología	-
-	386.312	7.765.714	Depósito	Flujo	No observada	Depósito no consolidado	-	Activo	Compuesto	Relieve y morfología	-
-	386.530	7.765.754	Depósito	Flujo	No observada	Depósito no consolidado	-	Activo	Compuesto	Relieve y morfología	-
-	387.251	7.766.218	Depósito	Flujo	No observada	Depósito no consolidado	-	Activo	Compuesto	Relieve y morfología	-
-	387.412	7.766.292	Depósito	Flujo	No observada	Depósito no consolidado	-	Activo	Compuesto	Relieve y morfología	-
-	388.143	7.766.292	Depósito	Flujo	No observada	Depósito no consolidado	-	Activo	Compuesto	Relieve y morfología	-
-	387.470	7.755.476	Depósito	Flujo	No observada	Depósito no consolidado	-	Activo	Compuesto	Relieve y morfología	-
-	384.686	7.765.241	Depósito	Flujo	No observada	Depósito no consolidado	-	Activo	Compuesto	Relieve y morfología	-
-	385.088	7.765.357	Depósito	Flujo	No observada	Depósito no consolidado	-	Activo	Compuesto	Relieve y morfología	-
-	385.257	7.765.481	Depósito	Flujo	No observada	Depósito no consolidado	-	Activo	Compuesto	Relieve y morfología	-
-	385.450	7.763.124	Depósito	Flujo	No observada	Depósito no consolidado	-	Activo	Compuesto	Relieve y morfología	-

Fecha de ocurrencia	Coord. Este (m)	Coord. Norte (m)	Tipo de rasgo	Tipo de remoción en masa principal	Tipo de remoción en masa secundaria	Tipo de material principal	Tipo de material secundario	Estado	Estilo	Condicionante	Desencadenante
-	385.162	7.763.387	Deposito	Flujo	No observada	Deposito no consolidado	-	Activo	Compuesto	Relieve y morfología	-
-	385.307	7.763.752	Deposito	Flujo	No observada	Deposito no consolidado	-	Activo	Compuesto	Relieve y morfología	-
-	388.646	7.766.166	Deposito	Flujo	No observada	Deposito no consolidado	-	Activo	Compuesto	Relieve y morfología	-
-	388.858	7.766.270	Deposito	Flujo	No observada	Deposito no consolidado	-	Activo	Compuesto	Relieve y morfología	-
-	382.645	7.764.901	Deposito	Flujo	No observada	Deposito no consolidado	-	Activo	Compuesto	Relieve y morfología	-
-	386.623	7.763.331	Deposito	Flujo	No observada	Deposito no consolidado	-	Activo	Compuesto	Relieve y morfología	-
-	387.190	7.763.095	Deposito	Flujo	No observada	Deposito no consolidado	-	Activo	Compuesto	Relieve y morfología	-
-	387.889	7.757.899	Deposito	Flujo	No observada	Deposito no consolidado	-	Activo	Compuesto	Relieve y morfología	-
-	383.767	7.762.864	Deposito	Flujo	No observada	Deposito no consolidado	-	Activo	Compuesto	Relieve y morfología	-
-	384.175	7.763.384	Deposito	Flujo	No observada	Deposito no consolidado	-	Activo	Compuesto	Relieve y morfología	-
-	383.461	7.762.035	Deposito	Flujo	No observada	Deposito no consolidado	-	Activo	Compuesto	Relieve y morfología	-
-	383.384	7.763.297	Deposito	Flujo	No observada	Deposito no consolidado	-	Activo	Compuesto	Relieve y morfología	-
-	383.382	7.763.138	Deposito	Flujo	No observada	Deposito no consolidado	-	Activo	Compuesto	Relieve y morfología	-
-	382.478	7.766.068	Deposito	Flujo	No observada	Deposito no consolidado	-	Activo	Compuesto	Relieve y morfología	-
-	382.544	7.764.461	Deposito	Flujo	No observada	Deposito no consolidado	-	Activo	Compuesto	Relieve y morfología	-
-	386.063	7.766.395	Deposito	Flujo	No observada	Deposito no consolidado	-	Activo	Compuesto	Relieve y morfología	-
-	382.155	7.766.422	Deposito	Flujo	No observada	Deposito no consolidado	-	Activo	Compuesto	Relieve y morfología	-

Fecha de ocurrencia	Coord. Este (m)	Coord. Norte (m)	Tipo de rasgo	Tipo de remoción en masa principal	Tipo de remoción en masa secundaria	Tipo de material principal	Tipo de material secundario	Estado	Estilo	Condicionante	Desencadenante
-	381.902	7.766.801	Depósito	Flujo	No observada	Depósito no consolidado	-	Activo	Compuesto	Relieve y morfología	-
-	382.923	7.765.196	Depósito	Flujo	No observada	Depósito no consolidado	-	Activo	Compuesto	Relieve y morfología	-
-	383.010	7.765.355	Depósito	Flujo	No observada	Depósito no consolidado	-	Activo	Compuesto	Relieve y morfología	-
-	384.134	7.760.718	Depósito	Flujo	No observada	Depósito no consolidado	-	Activo	Compuesto	Relieve y morfología	-
-	385.074	7.762.048	Depósito	Flujo	No observada	Depósito no consolidado	-	Activo	Compuesto	Relieve y morfología	-
-	386.423	7.762.786	Depósito	Flujo	No observada	Depósito no consolidado	-	Activo	Compuesto	Relieve y morfología	-
-	386.639	7.762.891	Depósito	Flujo	No observada	Depósito no consolidado	-	Activo	Compuesto	Relieve y morfología	-
-	384.402	7.761.569	Depósito	Flujo	No observada	Depósito no consolidado	-	Activo	Compuesto	Relieve y morfología	-
-	387.729	7.766.388	Depósito	Flujo	No observada	Depósito no consolidado	-	Activo	Compuesto	Relieve y morfología	-
-	383.466	7.764.799	Depósito	Flujo	No observada	Depósito no consolidado	-	Activo	Compuesto	Relieve y morfología	-
-	383.743	7.764.977	Depósito	Flujo	No observada	Depósito no consolidado	-	Activo	Compuesto	Relieve y morfología	-
-	384.241	7.765.010	Depósito	Flujo	No observada	Depósito no consolidado	-	Activo	Compuesto	Relieve y morfología	-

Fuente: Opazo et al. (2018)