



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

**EVALUACIÓN DE VULNERABILIDAD DE ESTRUCTURAS Y RIESGO
ESPECÍFICO ASOCIADO FRENTE A ALUVIONES EN LA ZONA URBANA
DE LA COMUNA DE ANTOFAGASTA**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGA

LIBERTAD CATALINA MAC-CARTE MARTÍNEZ

PROFESOR GUÍA:
SERGIO SEPÚLVEDA VALENZUELA

PROFESORA CO-GUÍA:
MARISOL LARA CASTILLO

COMISIÓN
ALEJANDRO ALFARO SOTO

SANTIAGO DE CHILE
2021

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE GEÓLOGA
POR: **LIBERTAD CATALINA MAC-CARTE MARTÍNEZ**
FECHA: 2021
PROF. GUÍA: SERGIO SEPÚLVEDA VALENZUELA

EVALUACIÓN DE VULNERABILIDAD DE ESTRUCTURAS Y RIESGO ESPECÍFICO ASOCIADO FRENTE A ALUVIONES EN LA ZONA URBANA DE LA COMUNA DE ANTOFAGASTA

En Chile, uno de los peligros geológicos más comunes es el de flujos de detritos o aluviones, siendo generalmente desencadenados por precipitaciones de intensidades superiores a la norma local. Uno de los eventos más importantes, debido a sus consecuencias catastróficas, fue el del 18 de junio de 1991 en la región de Antofagasta. A partir de entonces, se han realizado diversos estudios y obras de mitigación, sin embargo, no hay publicaciones disponibles que estudien vulnerabilidad ni riesgo frente a aluviones.

Es bajo ese contexto que en este trabajo se adaptaron y aplicaron las metodologías de Li et al. (2010) y Liu et al. (2002) para evaluar y generar mapas de vulnerabilidad de estructuras y su riesgo específico asociado frente a aluviones, respectivamente. Para evaluar la vulnerabilidad de la zona urbana de la comuna de Antofagasta, principalmente de viviendas, se utilizaron los datos disponibles en el Censo Nacional de 2017 (INE, 2017) y modelos de flujos de detritos generados por Espinoza (2017). Con los resultados obtenidos y el mapa de peligro de remociones en masa publicado por el SERNAGEOMIN (Falcón et al., 2014), se evaluó riesgo específico en un sector más acotado, asociado a las quebradas Uribe, Baquedano y El Toro.

Los mapas generados con los resultados obtenidos para las estructuras de la zona urbana, considerando que son afectadas por un evento de una magnitud homogénea para toda el área, muestran una clara tendencia en los índices de vulnerabilidad, donde las estructuras que se encuentran dispuestas a lo largo del límite con la Cordillera de la Costa tienen una mayor vulnerabilidad, disminuyendo de este a oeste, siendo las estructuras ubicadas a lo largo de la costa las menos vulnerables.

Por otro lado, para el sector de las quebradas mencionadas, y bajo un escenario donde las estructuras son afectadas de distinta forma dependiendo de su ubicación, se observó que la mayoría de las estructuras tienen una baja vulnerabilidad, a excepción de un par de áreas puntuales de vulnerabilidad alta. Asimismo, la evaluación de riesgo mantiene las mismas áreas con un alto índice, y se suman otras, principalmente de riesgo medio. De todas formas, la mayoría de las estructuras resultaron tener un riesgo bajo.

Te esperamos, siempre.

Agradecimientos

Agradezco, antes que a cualquier otra persona, a mi mamá, mi papá y a mi pequi, mi persona, por su infinita paciencia y apoyo incondicional. Sé que no he sido fácil, pero me hacen sentir siempre inmensamente amada.

Agradezco a Los Divinos, mis amigos de u desde el primer semestre. De ellos, no puedo dejar de mencionar a Paez y al Pablo, a veces compañeros de estudio, a veces profesores, a veces pañuelos de lágrimas, porque sin ustedes no hubiese sobrevivido la u. Literal. Les amo. Gracias divinos por seguir en mi vida.

A mis amigos de taekwondo, mi antiguo equipo, al profe, al taekwondo. También me ayudaron a sobrevivir. u qla. Los llevo siempre en mi corazón, sueño con ustedes, y cada vez que veo un combate se me acelera el corazón. Ya volveré. Gracias Brunildo, por esforzarte en mantener esta amistad a pesar de mis malos momentos y de lo pésima que soy para juntarme, por ser tan bacán conmigo.

Agradezco a los Mantitos, mis amigos de geo, y más que eso, los amigos que hice después de renacer, con una mejor actitud frente a la vida y frente a la u. Gracias Ignana por tanto apañe esos primeros años, por tanta energía y dislexia, por no quedarte quieto mientras estudiamos, por la leche, y por prestarme ahora a tu mejor amigo.

Al Gabriel, por ayudarme a pasar petro, sin éxito. Pero nació una amistad bacán. Gracias por tu ánimo, comprensión, energía y apañe.

A mis ex (es broma, pero si quieren no es broma), porque mientras estuvimos juntos fueron grandes compañeros, y me acompañaron en momentos malísimos, entre tanta depre, igual lo pasamos bien .

Y finalmente a Mono, por su apañe, su eficiencia, su apoyo, su orden, su amor, que me ayudan a mantenerme estable y ha hecho un poco más fácil terminar este proceso, llamado u qla. Gracias por no ser de Beauchef. Te amo, te admiro, y me encanta que seamos tan distintos.

Pucha que lo pasé mal en la u... pero conocí a personas maravillosas. Que se acabe el cacho, que queden las amistades.

Tabla de Contenido

| | |
|---|----------|
| 1. Introducción | 1 |
| 1.1. Formulación del estudio propuesto | 1 |
| 1.2. Objetivos | 2 |
| 1.2.1. Generales | 2 |
| 1.2.2. Específicos | 2 |
| 1.3. Ubicación del área de estudio | 2 |
| 2. Antecedentes | 4 |
| 2.1. Marco geológico | 4 |
| 2.1.1. Geomorfología | 4 |
| 2.1.2. Rocas estratificadas | 7 |
| 2.1.2.1. Formación La Negra Jln | 7 |
| 2.1.2.2. Formación Caleta Coloso Kicc | 7 |
| 2.1.2.3. Formación La Portada MPp | 8 |
| 2.1.3. Rocas intrusivas | 8 |
| 2.1.3.1. Intrusivos Jurásicos Ji | 8 |
| 2.1.3.2. Diorita cuarcífera y tonalita Mantos de Varas Jsmv | 9 |
| 2.1.4. Depósitos sedimentarios | 9 |
| 2.1.4.1. Depósitos de Gravas Antiguas Mg | 9 |
| 2.1.4.2. Depósitos Aluviales y Coluviales Antiguos MPa | 10 |
| 2.1.4.3. Depósitos Marinos Aterrazados PPlm | 10 |
| 2.1.4.4. Depósitos Eólicos Inactivos Ple | 11 |
| 2.1.4.5. Depósitos Marinos PIHm | 11 |
| 2.1.4.6. Depósitos Sedimentarios Indiferenciados | 12 |
| 2.1.4.7. Depósitos Coluviales PIHc | 12 |
| 2.1.4.8. Depósitos Aluviales PIHa | 12 |
| 2.1.4.9. Depósitos Eólicos Activos He | 13 |
| 2.1.4.10. Costras Salinas Hs | 14 |
| 2.1.4.11. Depósitos Antrópicos Han | 14 |
| 2.2. Clima y vegetación | 15 |
| 2.3. Marco teórico | 16 |
| 2.3.1. Remociones en masa | 16 |
| 2.3.2. Flujos | 18 |
| 2.3.3. Flujos de detritos | 19 |
| 2.3.4. Susceptibilidad | 20 |
| 2.3.5. Peligro o amenaza | 20 |
| 2.3.6. Vulnerabilidad | 21 |

| | |
|--|-----------|
| 2.3.7. Riesgo | 22 |
| 2.4. Antecedentes históricos | 23 |
| 2.4.1. Evento del 18 y 19 de junio de 1991 | 24 |
| 2.5. Plan Regulador Comunal de Antofagasta | 28 |
| 2.6. Programa de mitigación | 29 |
| 2.7. Antecedentes metodológicos | 30 |
| 3. Metodología | 33 |
| 3.1. Recopilación bibliográfica | 33 |
| 3.1.1. Riesgo | 33 |
| 3.1.2. Peligro | 34 |
| 3.1.3. Vulnerabilidad | 36 |
| 3.2. Caracterización de la zona y eventos a evaluar | 37 |
| 3.2.1. Zona de estudio | 38 |
| 3.2.2. Aluviones | 41 |
| 3.3. Aplicación | 42 |
| 3.3.1. Riesgo | 42 |
| 3.3.2. Peligro | 42 |
| 3.3.3. Vulnerabilidad | 43 |
| 4. Resultados | 50 |
| 4.1. Caracterización del lugar y eventos a evaluar | 50 |
| 4.2. Elementos expuestos | 53 |
| 4.3. Vulnerabilidad en la zona urbana de la comuna de Antofagasta | 55 |
| 4.4. Vulnerabilidad en el sector de las quebradas Uribe, Baquedano y El Toro . . | 58 |
| 4.5. Riesgo en el sector de las quebradas Uribe, Baquedano y El Toro | 60 |
| 5. Discusión | 63 |
| 6. Conclusiones | 68 |
| Bibliografía | 70 |

Índice de Tablas

| | | |
|------|--|----|
| 2.1. | Tipos de remociones en masa (Hungry et al., 2014) | 17 |
| 2.2. | Escala de velocidades de remociones en masa (Cruden y Varnes, 1996). | 18 |
| 2.3. | Clasificación de flujos de Hungry et al. (2001) | 19 |
| 3.1. | Rangos de valores propuestos por Liu et al. (2002), asignados a las clases Muy baja, Baja, Moderada, Alta y Muy alta de peligro (P), vulnerabilidad (V) y riesgo (R) | 34 |
| 3.2. | Rangos de valores propuestos asignados a las categorías Baja, Media y Alta de peligro (P), vulnerabilidad (V) y riesgo (R), basados en Liu et al. (2002). | 42 |
| 3.3. | Valores propuestos para tipos de materiales de construcción (modificado de Li et al., 2010), R_{ty} , considerando material de paredes externas según Censo 2017 (INE, 2017). | 48 |
| 3.4. | Valores propuestos para el estado de mantenimiento de los materiales (modificado de Li et al., 2010), R_{mn} , considerando tipo de materialidad según Censo 2017 (INE, 2017). | 48 |
| 3.5. | Valores propuestos para el índice que depende de la altura de la estructura, R_h , y para la profundidad de fundación, D_{fd} , (en m) (modificado de Li et al., 2010), considerando el tipo de vivienda según Censo 2017 (INE, 2017). | 48 |

Índice de Figuras

| | | |
|------|---|----|
| 1.1. | Ubicación del área de estudio. Comuna de Antofagasta. | 3 |
| 2.1. | Dominios geomorfológicos principales, de W a E Planicie Costera, Escarpe Costero y Cordillera de la Costa. Fuente: Falcón et al., 2014 | 5 |
| 2.2. | Principales hoyas hidrográficas de la comuna de Antofagasta. 1, La Portada; 2, La Chimba; 3, Las Rocas; 4, Las Conchas; 5, Bonilla Norte; 6, Bonilla Sur; 7, Farellones; 8, Salar del Carmen; 9, La Cadena; 10, El Ancla; 11, Uribe; 12, Baquedano; 13, El Toro, 14, Caliche; 15, La Negra; 16, Jardines del Sur; 17, El Huáscar; 18, El Way. Fuente: Falcón et al., 2014 | 6 |
| 2.3. | Precipitación anual en Antofagasta según las distintas estaciones meteorológicas del sector, asociadas a línea temporal de eventos aluvionales en el norte de Chile. Extraído de Mawün, 2021. | 16 |
| 2.4. | Corte esquemático típico de un flujo de detritos. Frente con bloques de un pulso del flujo de detritos (Diagrama de Pierson, 1986). Tomado de Proyecto Multinacional Andino (2007) | 20 |
| 2.5. | Plano regulador comunal de Antofagasta, basado en lo publicado por la I. Municipalidad de Antofagasta. | 29 |
| 3.1. | Extracto modificado del Mapa de Peligro de Remociones en Masa de Falcón et al. (2014). Áreas en rosado, de claro a oscuro, representan peligro de aluviones bajo, medio y alto respectivamente. Áreas en amarillo, anaranjado y rojo representan peligro de caída de rocas bajo, medio y alto respectivamente. | 35 |
| 3.2. | Comportamiento, según el modelo de Li et tal. (2010), del valor de vulnerabilidad en función de la razón I/R (a), y en función de la intensidad de la remoción en masa si se tiene una resistencia fija (b). Extraído de Li et al. (2010) | 37 |
| 3.3. | Zona de estudio. Delimitada por la línea naranja la zona urbana de Antofagasta, que corresponde a la primera zona de estudio, en marrón se muestran los polígonos que corresponden a manzanas censales, determinadas por el Censo 2017, y el recuadro morado indica la segunda zona de estudio, el sector de las quebradas Baquedano, Uribe y El Toro. | 39 |
| 3.4. | Sector de la zona de estudio. En rojo se presentan los polígonos que representan las manzanas censales, de los cuales se escogieron dos, indicados mediante una estrella amarilla y una verde respectivamente, para ejemplificar cómo se presenta la información que se tiene del Censo 2017 y a partir de qué se estimaron los datos de la infraestructura especial. | 40 |
| 3.5. | Imágenes de la infraestructura ubicada en la manzana censal representada por la estrella amarilla. Corresponden, por fila de arriba hacia abajo, a las cuadras SE, SW, NW y NE respectivamente. (Imágenes obtenidas desde Street view, con fecha de noviembre 2015.) | 40 |

| | | |
|------|---|----|
| 3.6. | Imágenes de la infraestructura ubicada en la manzana censal representada por la estrella verde. Corresponden, por fila de arriba hacia abajo, a las cuadras E, S, W y N respectivamente. (Imágenes obtenidas desde Street view, con fecha de noviembre 2015.) | 41 |
| 3.7. | Modelo de flujos de Espinoza (2017) para el sector de las quebradas Baquedano, Uribe y El Toro, donde en la figura de la izquierda se representan los rangos de velocidad de flujos y a la derecha los rangos de altura estimados (Modificado de Espinoza, 2017). | 42 |
| 3.8. | Diagrama de desarrollo de la evaluación de vulnerabilidad de estructuras frente a remociones en masa basado en modelo de Li et al. (2010) | 45 |
| 3.9. | Diagrama de desarrollo de la evaluación de vulnerabilidad de personas frente a remociones en masa basado en modelo de Li et al. (2010) | 46 |
| 4.1. | Zona de estudio que abarca todo el sector urbano de la comuna de Antofagasta. | 51 |
| 4.2. | Zona de estudio en el sector de las quebradas Baquedano, Uribe y El Toro. . . | 52 |
| 4.3. | Mapas utilizados para la evaluación de vulnerabilidad y riesgo, representando peligro de aluviones basado en Falcón et al. (2014) y velocidad y altura de flujo basado en Espinoza (2017). | 53 |
| 4.4. | Mapa de elementos expuestos en el sector de las quebradas Uribe, Baquedano y El Toro, con información extraída de Censo 2017 (INE, 2017). | 54 |
| 4.5. | Vulnerabilidad de estructuras frente a aluviones para la zona urbana de Antofagasta considerando una velocidad de flujo (u) de 0.4 m/s y alturas (h) de 0.4 m, 1 m y 3 m. | 56 |
| 4.6. | Vulnerabilidad de estructuras frente a aluviones para la zona urbana de Antofagasta considerando una velocidad de flujo (u) de 1.5 m/s y alturas (h) de 0.4 m, 1 m y 3 m. | 57 |
| 4.7. | Vulnerabilidad de estructuras frente a aluviones para la zona urbana de Antofagasta considerando una velocidad de flujo (u) de 10 m/s y alturas (h) de 0.4 m, 1 m y 3 m. | 58 |
| 4.8. | Mapa de riesgo frente a aluviones para las quebradas Uribe, Baquedano y El Toro. | 60 |
| 4.9. | Mapa de riesgo frente a aluviones para las quebradas Uribe, Baquedano y El Toro. | 62 |
| 5.1. | Plano regulador comunal de Antofagasta, modificado del publicado por la I. Municipalidad de Antofagasta. Sobrepuestas, en color rosa, se observan las manzanas residenciales (Censo 2017). | 64 |

Capítulo 1

Introducción

1.1. Formulación del estudio propuesto

En Chile, uno de los peligros geológicos más comunes es el de flujos de detritos o aluviones, siendo generalmente desencadenados por precipitaciones de intensidades superiores a la norma local. Desde 1980 a la fecha han ocurrido más de 40 aluviones que han provocado desastres, de los cuales un 25 % corresponden a eventos en el sector norte de Chile (Henriquez, 1972; Hauser, 1993; Hauser, 1997; Vargas et al., 2000).

Uno de los eventos más importantes en esta zona, tuvo lugar la madrugada del 18 de junio de 1991 en la región de Antofagasta, donde múltiples aluviones transportaron material desde las quebradas de la Cordillera de la Costa hacia el mar, atravesando la comuna del mismo nombre, afectando gravemente poblaciones e infraestructura local, registrándose más de 90 personas fallecidas, casi una veintena desaparecidas y alrededor de 20 mil damnificadas (Van Sint Jan et al., 1992; Ayala et al., 1993; Hauser, 1997). A partir de entonces, se han realizado diversos estudios y trabajos en el sector, buscando mitigar los efectos de eventos similares futuros, incluyendo modelación de flujos de detritos y mapas de evaluación de susceptibilidad y de peligro de remociones en masa (RM). Sin embargo, no hay publicaciones disponibles de estudios de vulnerabilidad ni riesgo, coincidiendo con que dentro del campo de estudio concerniente a RM estas abarcan un porcentaje menor en comparación con los ya mencionados (Hollenstein, 2005; Papathoma-Köhle et al., 2007; Douglas, 2007).

El menor número de investigaciones de vulnerabilidad y riesgo muchas veces se debe a que existe un conocimiento empírico suficiente por parte de las instituciones pertinentes como para no requerir investigaciones teóricas más profundas o a que, al ser eventos generalmente delimitados a un área específica, una de las soluciones es simplemente evitar las zonas afectadas (Papathoma-Köhle et al., 2007). Por otra parte, la comuna de Antofagasta cumple con casi la totalidad de las condiciones en que ABCB (2006) considera necesario realizar una evaluación de riesgo, siendo una comuna en constante expansión, cuya zona urbana y rural ha sido afectada a lo largo de su historia por numerosos eventos de remoción en masa, siendo objeto de estudios de peligro geológico, y habiéndose implementado grandes obras de mitigación y existiendo otras en proceso de construcción.

Finalmente, poseer un patrón espacial detallado de la vulnerabilidad y riesgo dentro de una comunidad, permite que las prioridades de las autoridades locales en cuanto a fases de

preparación del ciclo de desastre, tanto como las prioridades de los equipos de rescate en la fase de respuesta, puedan ser efectivamente establecidas.

1.2. Objetivos

1.2.1. Generales

El objetivo de este trabajo es adaptar una metodología de análisis de vulnerabilidad estructural y aplicarla en la zona urbana de Antofagasta para determinar el riesgo específico frente a aluviones.

1.2.2. Específicos

Los objetivos específicos que permitirán llevar a cabo lo propuesto anteriormente, son:

- Caracterizar la zona de estudio y evento aluvional determinado.
- Seleccionar un método de evaluación de vulnerabilidad estructural y riesgo específico de aluviones que pueda ser aplicado en la zona de estudio.
- Generar mapa de vulnerabilidad de estructuras frente a aluviones.
- Generar mapa de riesgo específico frente a aluviones.

1.3. Ubicación del área de estudio

Este trabajo se concentra en el sector urbano de la comuna de Antofagasta, perteneciente a la Región de Antofagasta, ubicada al norte de Chile. Este sector se encuentra situado entre las coordenadas 23° y 24°S y 70° y 71°W, emplazado en la planicie costera, limitado por el borde costero al W y la Cordillera de la Costa al E, abarcando aproximadamente 56 km^2 1.1.

La zona estudiada es, específicamente, el sector de la ciudad donde desembocan las quebradas Uribe, Baquedano y El Toro, abarcando un área de aproximadamente 13 km^2 (cuadro rojo en la figura 1.1).

Se puede acceder a la zona desde el sur desviándose de la Ruta 5 a la Ruta 28, o desde el este por medio de la siguiente desviación por la Ruta 26. Asimismo, se puede acceder desde el norte por la Ruta 1, pasando por el Aeropuerto Andrés Sabella.

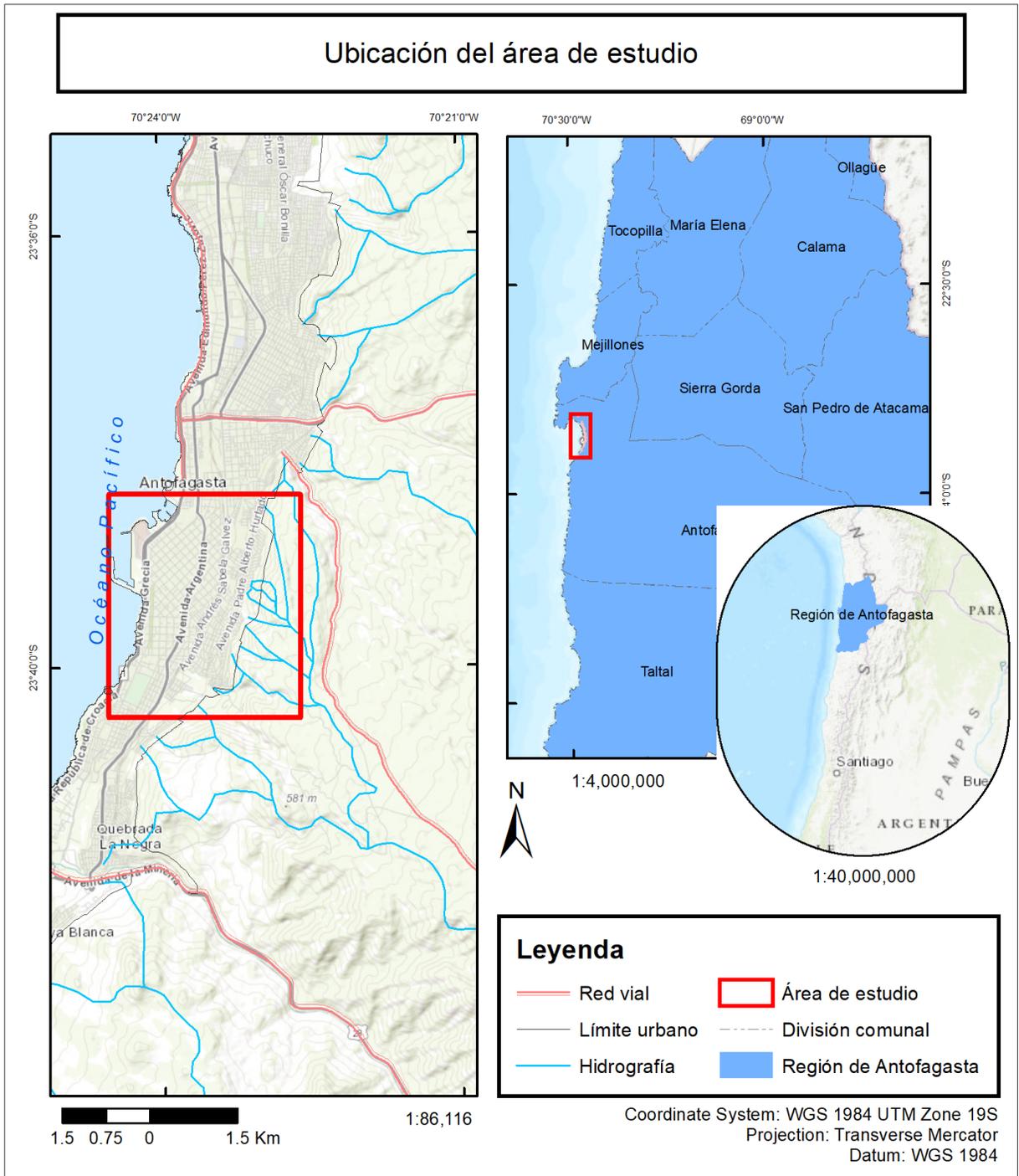


Figura 1.1: Ubicación del área de estudio. Comuna de Antofagasta.

Capítulo 2

Antecedentes

2.1. Marco geológico

2.1.1. Geomorfología

En la ciudad de Antofagasta se reconocen, según Falcón et al. (2014), tres dominios geomorfológicos principales, dispuestos de forma paralela en dirección norte-sur y distribuidos de W a E de la siguiente forma: Franja o Planicie Costera, Escarpe costero y Cordillera de la Costa (figura 2.1).

La Planicie Costera posee suaves pendientes de 5° en promedio, con alturas desde el nivel del mar y llegando a los 250 m s.n.m. hacia el E. Este dominio es comprendido por una serie de terrazas de abrasión marina, que siguen la geometría alargada y estrecha preponderante, cubiertas, parcialmente, por abanicos aluviales. Es en esta franja, limitada al W por el Océano Pacífico y al E por el Escarpe Costero, con un ancho máximo de 4 km al norte del sector y un mínimo de algunos metros al sur, donde se desarrolla la vida urbana de la comuna de Antofagasta (Falcón et al., 2014)

El Escarpe Costero se caracteriza por fuertes pendientes que varían entre 15° y 45° , presentando en algunos sectores depósitos aluviales y alcanzando alturas de hasta 700 m s.n.m. (Falcón et al., 2014).

La Cordillera de la Costa se encuentra limitada al W por la Planicie Costera, y al E por la Depresión Intermedia, definida esta última división por el sistema estructural de la falla de Atacama. Corresponde a una franja de ancho variable entre 4 y 11 km, constituida por una cadena montañosa que alcanza los 2000 m s.n.m. (Falcón et al., 2014)

En el tramo concerniente al sector urbano de la comuna de Antofagasta se reconocen 57 cuencas hidrográficas, todas drenando hacia el oeste. De estas, las principales corresponden a (de norte a sur) La Portada, La Chimba, Las Rocas, Las Conchas, Bonilla Norte, Bonilla Sur, Farellones, Salar del Carmen, La Cadena, El Ancla, Uribe, Baquedano, El Toro, Caliche, La Negra, Jardines del Sur, El Huáscar y El Way (figura 2.2) (Falcón et al., 2014).

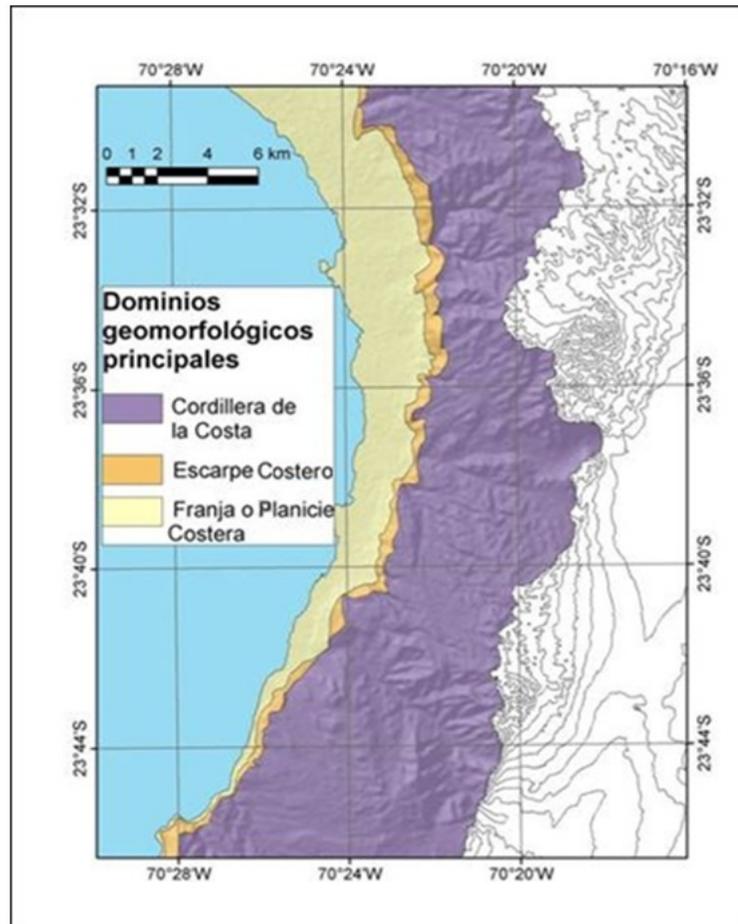


Figura 2.1: Dominios geomorfológicos principales, de W a E Planicie Costera, Escarpe Costero y Cordillera de la Costa. Fuente: Falcón et al., 2014

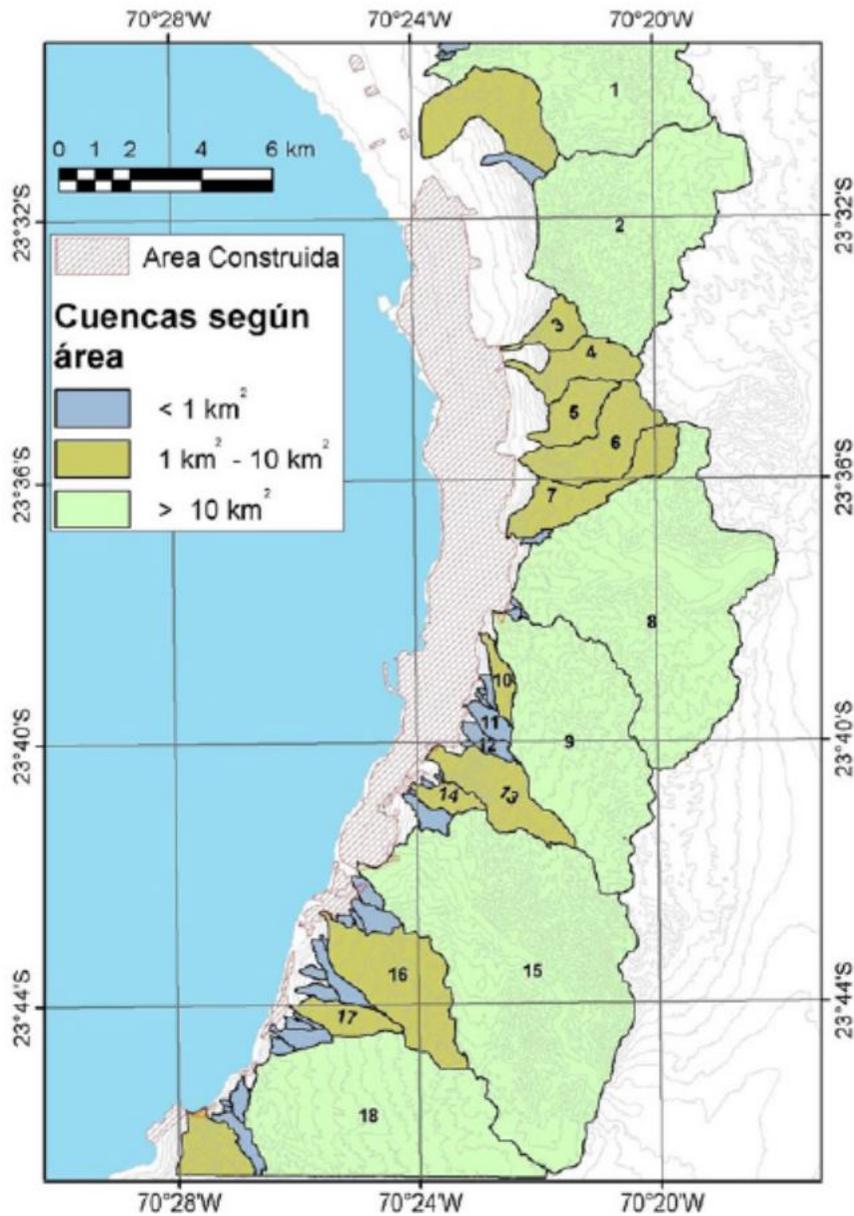


Figura 2.2: Principales hoyas hidrográficas de la comuna de Antofagasta. 1, La Portada; 2, La Chimba; 3, Las Rocas; 4, Las Conchas; 5, Bonilla Norte; 6, Bonilla Sur; 7, Farellones; 8, Salar del Carmen; 9, La Cadena; 10, El Ancla; 11, Uribe; 12, Baquedano; 13, El Toro, 14, Caliche; 15, La Negra; 16, Jardines del Sur; 17, El Huáscar; 18, El Way. Fuente: Falcón et al., 2014

El sector occidental del área de estudio se encuentra constituido principalmente por depósitos sedimentarios marinos y continentales de edades desde el Pleistoceno hasta el Holoceno, mientras que hacia el oriente la Cordillera de la Costa está comprendida por rocas y secuencias volcánicas y sedimentarias, principalmente continentales, e intrusivos jurásicos, cubiertos parcialmente por depósitos antiguos. Se describen a continuación las unidades geológicas ordenadas de más antigua a más reciente.

2.1.2. Rocas estratificadas

2.1.2.1. Formación La Negra Jln

(Jurásico inferior - Jurásico superior) (García, 1967)

Secuencia volcánica en la quebrada La Negra, al Sur de la ciudad de Antofagasta, definida por García (1967) como «una sucesión continua y homogénea de mantos de lavas porfídicas, parcialmente amigdaloidales, de colores gris y verde, con intercalaciones subordinadas de bancos de brechas porfídicas, areniscas gruesas y conglomerados arcillosos».

Aflora a lo largo del área de estudio, expuesta principalmente en 2 sectores como franjas continuas con dirección N-S que coinciden con gran parte de la Cordillera de la Costa y la Planicie Costera, limitadas la primera al poniente por el Océano Pacífico y al oriente cubierta por sedimentos, y la segunda al poniente por el Escarpe Costero y al occidente por el sistema de Falla de Atacama (Basso, 2007). Con una potencia de al menos 7000 m, aflorando dentro del área de estudio solo su miembro superior, se encuentra constituida principalmente por andesitas y andesitas basálticas de piroxeno con texturas porfídicas, afaníticas, amigdaloides y brechosas, y presenta intercalaciones métricas de brechas sedimentarias, conglomerados brechosos y areniscas rojas de grano medio a fino (Falcón et al., 2014).

En el sector poniente del área de estudio la Formación La Negra se encuentra cubierta por sedimentos cenozoicos, principalmente depósitos marinos (PIHm), depósitos indiferenciados (PIHi), depósitos aluviales (PIHa) y depósitos eólicos activos (He), mientras que al oriente sobreyace a los Estratos de Rencoret (Triásico Superior-Sinemuriano). Al sur subyace a la Formación Caleta Coloso (Kicc) y al norte a la Formación La Portada (MPp), en ambos casos en discordancia erosiva. Por otro lado, al norte la intruye la unidad Diorita Cuarzifera y Tonalita de Mantos de Varas (Jsmv).

De acuerdo con sus relaciones de contacto y por dataciones radiométricas (U-Pb en circones y K-Ar en roca total), el rango de edad de la Formación La Negra es Sinemuriano - Titoniano (González y Niemeyer, 2005; Basso, 2007; Falcón et al., 2014).

En el sector de la Cordillera de la Costa la mayoría de los afloramientos se encuentran cubiertos por regolito debido a la alta meteorización en la zona, por lo que se logra diferenciar entre rocas sin cobertura (a), observables en las cimas y sectores de alta pendiente, y rocas cubiertas por regolito (b), de potencias entre 5 y 30 cm, o por depósitos marinos, aluviales y eólicos que no superan los 50 cm de espesor (Falcón et al., 2014).

2.1.2.2. Formación Caleta Coloso Kicc

(Cretácico Inferior) (Brüggen, 1950)

Compuesta por conglomerados y areniscas rojas, integrada por 2 facies, a y b (González y Niemeyer, 2005), de las cuales solo la primera aflora dentro de la zona de estudio, llegando a tener un espesor de 600 m. Esta corresponde principalmente a conglomerados matriz y clasto soportados, con clastos de hasta 50 cm, mayoritariamente subredondeados a redondeados, subordinadamente subangulosos, con mala a moderada selección y compuestos de 95 % de fragmentos volcánicos de la Formación La Negra (Jln) y de 5 % de fragmentos intrusivos. La

matriz es de tamaño arena y se encuentra cementada por material silíceo y óxidos de Fe que le dan tonalidades rojizas, y en algunos sectores por óxidos de cobre (Falcón et al., 2014).

Se presentan estratos de lutitas de espesores entre 10 y 30 cm y areniscas rojizas de espesores entre 20 y 100 cm intercalados en los conglomerados, en los que se observa, localmente, cierta imbricación en los clastos, y hace evidente una clara estratificación en la unidad (Flint et al., 1986; González y Niemeyer, 2005; Basso, 2007). Las areniscas varían de grano fino a grueso, gradan de areniscas de grano fino a areniscas conglomerádicas, y se pueden encontrar cementadas por hematita o en menor medida por calcita. Dentro de la unidad se pueden encontrar sectores con gradación inversa o normal, y fallas locales (Falcón et al., 2014).

Esta formación aflora al suroeste de la zona de estudio, y se pueden observar terrazas de abrasión en la costa, formadas a partir de afloramientos erosionados por el oleaje, y oquedades y surcos formados por acción del viento. La unidad sobryace a la Formación La Negra (Jln) por contacto erosivo y subyace, fuera del área de estudio, a la Formación El Way (Hauteriviano - Barremiano) (Wetzell, 1927). De acuerdo con estas relaciones de contacto, se le asigna un rango de edad Titoniano? - pre Hauteriviano (Falcón et al., 2014).

2.1.2.3. Formación La Portada MPp

(Mioceno - Plioceno) (Ferraris y Di Biase 1978)

Corresponde a una secuencia sedimentaria marina fosilífera, con un espesor máximo expuesto de 200 m. Contiene capas alternadas de coquinas, areniscas y margas y, en menor medida, de conglomerados, fangolitas, brechas, diatomitas, fosforitas y yeso (Suárez et al., 2003), observándose como capas centimétricas a métricas de colores grises y pardos. Contiene abundantes fósiles de moluscos y foraminíferos y en menor porcentaje fragmentos de peces, aves y cetáceos (Marquardt et al., 2003; Falcón et al., 2014).

Esta formación aflora al norte del área de estudio, en el sector de La Portada, como una franja continua a lo largo de la línea de costa. Sobryace en discordancia angular a la Formación La Negra (Jln) y se encuentra cubierta parcialmente por depósitos eólicos activos (He) (Falcón et al., 2014).

Con base en el contenido fósil, se le asigna un rango de edad Mioceno Medio a Plioceno (Suárez et al., 2003), y, de acuerdo con el tipo de fauna registrado, «se habría depositado en aguas cálido-temperadas y a profundidades no superiores a los 200 m bajo el nivel del mar» (Falcón et al., 2014).

2.1.3. Rocas intrusivas

2.1.3.1. Intrusivos Jurásicos Ji

(Jurásico)

Correponde a rocas intrusivas conformadas, principalmente, por "metadioritas gris verdosa, pertenecientes a la unidad denominada Metadioritas Bolfin-Punta Tetras, con aspecto córneo, compuesta por cristales de cuarzo, plagioclasa, biotita y abundante hornblenda, debi-

do a una anfibolitización extrema, observándose bandas de anfibolitas de grano fino" (Falcón et al., 2014). También se pueden observar gabros color gris oscuro de la unidad Gabros Cerro Coloso, con fuertes variaciones texturales, compuestos por piroxeno, hornblenda y plagioclasa (Falcón et al., 2014).

Esta unidad se encuentra al suroeste del área de estudio, y presenta fracturas con una frecuencia de 0.5 m promedio, favoreciendo la caída de rocas de forma aislada (Falcón et al., 2014).

A las Metadioritas Bolfín-Punta Tetas se les asigna un rango de edad entre 200 a 150 Ma a partir de dataciones según métodos U-Pb, Rb-Sr, Ar-Ar en hornblenda, K-Ar en hornblenda y K-Ar en biotita (González y Niemeyer, 2005), mientras que a los Gabros Cerro Coloso se les asigna un rango entre 183 y 143 Ma mediante dataciones con métodos U-Pb, Sm-Nd, Rb-Sr en roca total y Ar-Ar en biotita (González y Niemeyer, 2005).

2.1.3.2. Diorita cuarcífera y tonalita Mantos de Varas Jsmv

(Jurásico superior) (González y Niemeyer, 2005)

Rocas intrusivas comprendidas principalmente por dioritas cuarcíferas, tonalitas y granodioritas de color gris rosáceo, medianamente meteorizadas. Son por lo general de grano fino a medio, compuestas fundamentalmente por cuarzo, plagioclasa, ortoclasa, hornblenda y biotita (Falcón et al., 2014).

Dentro del área de estudio se encuentra dividida en 2 zonas, al norte de la quebrada La Chimba, en la localidad de Mantos de Varas, y afloramientos menores al norte de la quebrada La Negra. Intruyen a lavas andesíticas de la Formación La Negra (Jln), en algunos sectores es intruida por diques afaníticos dioríticos y monzoníticos (Roldan, 2019), y se encuentra parcialmente cubierta por depósitos eólicos activos (He). El contacto entre esta unidad y Formación La Negra (Jln) se presenta de forma irregular, observándose xenolitos de Jln en Jsmv y filones centimétricos intruyendo las rocas volcánicas de Jln (Falcón et al., 2014).

Se le asigna a esta unidad una edad aproximada de 159.8 ± 5 Ma, Jurásico Superior, producto de dataciones Rb/Sr en roca total hechas por Pichowiak (1994) y recalculadas por González y Niemeyer (2005) (Falcón et al., 2014).

De acuerdo con su grado de meteorización y la cubierta parcial de depósitos eólicos activos (He), se puede diferenciar en a, rocas sin cobertura (principalmente en los sectores de alta pendiente) y b, rocas cubiertas por regolito entre 5 y 30 cm de potencia, o por depósitos eólicos activos de espesores no superiores a 50 cm (Falcón et al., 2014).

2.1.4. Depósitos sedimentarios

2.1.4.1. Depósitos de Gravas Antiguas Mg

(Mioceno) (González y Niemeyer, 2005)

Secuencia de gravas de origen coluvial y aluvial, de una potencia menor a 50 cm, parcialmente consolidadas y pobremente estratificadas, de color pardo a gris pardo, con intercalacio-

nes locales de arenas finas. Son gravas polimícticas y oligomícticas pobremente seleccionadas, con clastos de tamaño desde milimétrico hasta 50 cm (Basso, 2007) mal redondeados que corresponden principalmente a fragmentos volcánicos provenientes de la Formación La Negra (Jln) y en segundo lugar a fragmentos de intrusivos (Falcón et al., 2014).

Aflora de forma discontinua en el sector centro-sur y suroeste de la zona de estudio, en la quebrada Caliche y frente a la playa El Huáscar respectivamente. Sobreyace a la Formación La Negra (Jln) y se encuentra cubierta por depósitos aluviales y coluviales antiguos (MPa) y por depósitos aluviales (PIHa), coluviales (PIHc) y eólicos activos (He).

Se le asigna un rango de edad Mioceno Inferior a Medio a partir de relaciones estratigráficas y correlaciones con unidades similares definidas en la Cordillera de la Costa y Depresión Intermedia de la Región de Antofagasta (Basso, 2007).

2.1.4.2. Depósitos Aluviales y Coluviales Antiguos MPa

(Mioceno superior - Pleistoceno) (Basso, 2007)

Compuestos por «gravas y arenas de color pardo de origen aluvial y coluvial, semiconsolidadas y, excepcionalmente, con intercalaciones de arenas eólicas» (Falcón et al., 2014). Las gravas presentan una pobre estratificación con capas de espesor centimétrico a métrico, clasto soportadas a matriz soportadas, matriz de arena gruesa y cementada en ocasiones por cloruros (halita) y/o sulfatos (yeso, anhidrita) (Roldan, 2019). Los clastos son mal seleccionados, angulosos a subangulosos, de tamaño variable entre 1 y 60 cm, y corresponden en su mayoría a fragmentos de la Formación la Negra (Jln), y en menor medida a fragmentos de la unidad Diorita cuarcífera y tonalita Mantos de Varas (Jsmv). En algunos sectores, de forma local, se presentan estratos lenticulares de cenizas volcánicas (Falcón et al., 2014).

Distribuidos a lo largo de toda el área de estudio, se encuentran parcialmente cubiertos por los depósitos aluviales (PIHa), coluviales (PIHc), eólicos activos (He) y marinos (PIHm), mientras que, por otro lado, sobreyacen a los depósitos de gravas antiguas (Mg), a la unidad de Diorita cuarcífera y tonalita Mantos de Varas (Jsmv) y a las lavas andesíticas de la Formación La Negra (Jln).

Se le asigna a estos depósitos una edad pliocena superior a pleistocena a partir de dataciones radiométricas mediante K-Ar y biotita realizadas en intercalaciones de ceniza que arrojaron edades de 3 ± 0.2 Ma (Naranjo, 1987) y en depósitos equivalentes fuera del área de estudio de edades entre 10 y 5 Ma (González y Niemeyer, 2005).

2.1.4.3. Depósitos Marinos Aterrazados PPlm

(Plioceno - Pleistoceno) (Martínez y Niemeyer, 1982)

Corresponde a una secuencia estratificada de una potencia máxima de 5 m compuesta por gravas, arenas gruesas y coquinas depositada sobre terrazas de abrasión marina. Las gravas se encuentran parcialmente consolidadas, con clastos principalmente andesíticos provenientes de la Formación La Negra (Jln), angulosos a subangulosos, cuyo tamaño varía desde unos

pocos centímetro a 1 m, y una matriz de arenas gruesas de color grisáceo con presencia de bioclastos subredondeados y mala esfericidad, que gradan a coquina (Falcón et al., 2014).

Estos depósitos afloran de forma diseminada principalmente en la zona centro del área de estudio cercanos a la cota 100 m, se encuentran parcialmente cubiertos por depósitos aluviales (PIHa) y coluviales (PIHc) y sobreyacen rocas volcánicas de la Formación La Negra (Jln) (Falcón et al., 2014).

De acuerdo con el contenido fósil se les asigna una edad entre el Pleistoceno y Plioceno (González y Niemeyer, 2005).

2.1.4.4. Depósitos Eólicos Inactivos Ple

(Pleistoceno) (Basso, 2007)

Corresponde a depósitos subhorizontales de arenas semiconsolidadas de color gris a marrón amarillento, de tamaño fino a medio, de buena a muy buena selección, parcialmente cementadas por carbonatos de calcio y sales. Según Falcón et al. (2014), son mayoritariamente constituidas por material bioclástico aportado desde el borde costero, reconociéndose gastrópodos bien a medianamente conservados, granos de cuarzo con esfericidad media a regular, líticos de lavas andesíticas de la Formación La Negra (Jln) e intrusivos de la unidad Diorita cuarcífera y Tonalita de Mantos de Varas (Jsmv) y minerales accesorios como magnetita (Falcón et al., 2014; Roldan, 2019).

Se presentan afloramientos aislados diseminados a lo largo del área de estudio principalmente expuestos en quebradas, donde se observa estratificación subhorizontal y cruzada. Cubren en sectores a rocas de la Formación La Negra (Jln), de la unidad Diorita cuarcífera y tonalita Mantos de Varas (Jsmv), y subyacen a los depósitos aluviales (PIHa), coluviales (PIHc) y eólicos activos (He) (Falcón et al., 2014; Roldan, 2019).

2.1.4.5. Depósitos Marinos PIHm

(Pleistoceno - Holoceno) (González y Niemeyer, 2005)

Secuencias subhorizontales, bien estratificadas y semiconsolidadas de capas centimétricas de coquinas, gravas y arenas bioclásticas, depositadas sobre terrazas de abrasión marina a lo largo del borde costero. Pueden presentar variaciones laterales e incipiente gradación normal (Basso, 2007). Las coquinas están constituidas por bioclastos que miden entre 0.2 y 10 mm, bien redondeados y de baja esfericidad, con presencia de líticos volcánicos y graníticos, mientras que las arenas bioclásticas, que varían de gruesas a conglomerádicas, contienen alrededor de un 80 % de bioclastos (pelecípodos y equinodermos) y 15 % de terrígenos, con un redondeamiento y esfericidad media (González y Niemeyer, 2005).

En la zona de estudio cubren gran parte de la franja costera. Sobreyacen el sustrato rocoso, y en algunos sectores a los depósitos aluviales y coluviales antiguos (MPa) y a los depósitos eólicos antiguos (Ple). Además, se pueden encontrar intercalados con estos últimos o con depósitos aluviales (PIHa), o cubiertos por depósitos eólicos activos (He) (Falcón et al., 2014).

2.1.4.6. Depósitos Sedimentarios Indiferenciados

PIHi (Pleistoceno - Holoceno) (Falcón et al., 2014)

Depósitos sedimentarios de origen aluvial, coluvial y eólico de una potencia máxima de 5 m, compuestos por gravas, arenas y limos no consolidados y mal seleccionados dispuestos en estratos de unos 20 cm de espesor. En algunos sectores se pueden observar estratos de cenizas volcánicas retrabajadas (Falcón et al., 2014).

Estos depósitos se encuentran distribuidos en la zona de estudio a lo largo de la franja de la Planicie Costera, cubriendo parte del sustrato rocoso y asociado espacialmente a los depósitos marinos (PIHm), aluviales (PIHa) y eólicos (He) (Falcón et al., 2014).

Se definen como indiferenciados por la escasez de datos para su identificación debido a que los afloramientos están cubiertos o cercados por construcciones urbanas y/o terrenos privados inaccesibles (Falcón et al., 2014).

2.1.4.7. Depósitos Coluviales PIHc

(Pleistoceno - Holoceno)

Depósitos sedimentarios clásticos de origen coluvial, compuestos por gravas pobremente estratificadas, clasto a matriz soportadas y arenas medias a gruesas. Las gravas contienen clastos angulosos a subangulosos, de mala selección, y bloques angulosos de hasta 1 m, insertos en una matriz de arena gruesa. Por otro lado, las arenas se encuentran bien seleccionadas y regularmente redondeadas. Ambas son monomíticas, con una composición predominantemente andesítica, al ser fragmentos producto de la erosión y meteorización de rocas de la Formación La Negra y en menor medida de intrusivos.

Estos depósitos se encuentran distribuidos a lo largo de toda el área de estudio, expuestos principalmente en laderas de pendientes pronunciadas de la Cordillera de la Costa. En algunos sectores sobreyacen el sustrato rocoso (Jln y Jsmv), y en otros a los depósitos aluviales y coluviales antiguos (MPa) y depósitos eólicos antiguos (Ple). En otras áreas se intercalan con estos dos últimos y con los depósitos aluviales (PIHa), o se encuentran cubiertos por depósitos eólicos activos (He). Por esto último se distinguen dos tipos dentro de esta unidad, el tipo a como gravas y arenas sin intercalaciones o cubierta por depósitos eólicos, y el tipo b, como gravas y arenas con intercalaciones de arenas eólicas (Ple) de hasta 10 cm de espesor, y/o cobertura de depósitos eólicos activos (He), de espesor menor a 10 cm (Falcón et al., 2014).

2.1.4.8. Depósitos Aluviales PIHa

(Pleistoceno - Holoceno)

Corresponden a depósitos sedimentarios clásticos de origen aluvial, compuestos por gravas, arenas y limos de tonalidades grises a pardos, no consolidados a ligeramente cementados, de capas de espesores desde centimétricos a métricos, cuya potencia total es variable y puede alcanzar los 50 m (Roldan, 2019). Las gravas son principalmente clastosoportadas, presentan clastos mal seleccionados, subangulosos a redondeados, mala esfericidad y monomíticos, conteniendo principalmente clastos de lavas andesíticas y fragmentos ígneos. La matriz está

compuesta principalmente por arena, y en sectores cementada por sales. El tamaño de los clastos varía de forma decreciente desde los afloramientos al interior de la región, hacia la costa, encontrándose desde los 40 cm a máximo 10 cm respectivamente. La potencia de la unidad también varía siguiendo esta tendencia, teniendo entre 10 m y 15 m e incluso alcanzando los 50 m en los ápices de los abanicos, y llegando como máximo a 5 m en la franja costera (Falcón et al., 2014).

Estos depósitos se encuentran a lo largo de toda el área de estudio, predominantemente en los cauces de quebradas actuales y en forma de abanicos en el borde oeste de la Cordillera de la Costa y de la franja costera. Presentan estratificación horizontal y localmente paleocanales con tendencias granodecipientes, acuñamiento de estratos e imbricaciones (Falcón et al., 2014).

Cubren parcialmente a los depósitos aluviales y coluviales antiguos (MPa), depósitos eólicos antiguos (Ple) y a la Formación La Negra (Jln) (Falcón et al., 2014).

De acuerdo con Basso (2007), algunos depósitos aluviales se pueden relacionar directamente con cierta recurrencia existente de períodos pluviales interglaciares durante el Pleistoceno. Por otro lado, también sugiere que los abanicos aluviales se habrían depositado después de los 125 ka, debido aun período de mayores precipitaciones que en la actualidad. Con esto, y considerando que esta unidad se encuentra aún activa, se le asigna a estos depósitos un rango de edad Pleistoceno - Holoceno (Roldan, 2019).

En algunos sectores se pueden encontrar desechos antrópicos y estratos de cenizas volcánicas retrabajadas de menos de 30 cm de espesor. Los primeros pueden asociarse a flujos detríticos históricos, lo que en conjunto «evidenciaría su relación genética y/o espacial con flujos detríticos del pasado reciente e histórico, como por ejemplo, los flujos detríticos que afectaron a la ciudad de Antofagasta durante la madrugada del 18 de junio de 1991» (Falcón et al., 2014).

2.1.4.9. Depósitos Eólicos Activos He

(Holoceno)

Depósitos eólicos no consolidados que corresponden a arenas de color pardo amarillento, de tamaño medio a fino, buena selección y buen redondeamiento y esfericidad. Su composición varía entre un 30 a 50 % de granos calcáreos, un 20 a 40 % de granos monominerales (mayoritariamente cuarzo, feldespato, y en menor medida piroxenos, anfíboles, magnetita y epidota) y un 10 a 20 % de lítico andesíticos y plutónicos. Presentan estratificación horizontal y cruzada en capas de menos de 5 cm (Basso, 2007; Falcón et al., 2014).

Estos depósitos se encuentran distribuidos a lo largo de toda el área de estudio. Al norte cubren gran parte de la franja costera, observándose dunas longitudinales con rumbo N18E, mientras que al sur se encuentran hacia el interior de la Cordillera de la Costa, cortados por drenajes esporádicos, dejando expuesta una estratificación levemente inclinada 10° al oeste. Sobreyacen a depósitos aluviales y coluviales (antiguos y contemporáneos), a depósitos eólicos antiguos, y en sectores se encuentran cubiertos parcialmente por capas finas de gravas, evidenciando la interacción entre procesos eólicos y gravitacionales (Falcón et al., 2014).

Al norte del área de estudio, en el sector de La Chimba, Ortlieb et al. (1997) realizaron dataciones radiocarbono en caparazones de *Concholepas concholepas* pertenecientes a acumulaciones antrópicas dispuestas sobre dunas no cementadas, reportando una edad de $10,120 \pm 70$ años Antes del Presente (AP). Según estos autores, la ocupación humana habría sido contemporánea con el inicio de la acumulación de arenas eólicas, bajo condiciones climáticas propias del límite Pleistoceno - Holoceno, es decir, alrededor de 10,000 años AP (Falcón et al., 2014).

2.1.4.10. Costras Salinas Hs

(Holoceno)

Arenas y gravas de origen aluvial y coluvial, cementadas por sales, principalmente cloruros, formando una capa de 30 cm de espesor aproximadamente. Arenas y gravas presentan distinta selección y redondeamiento de acuerdo con su origen (Falcón et al., 2014).

Se encuentran concentradas principalmente al poniente de los afluentes de las quebradas El Carmen, Caracoles y Cadenas, lo que indicaría que las sales provendrían desde el Salar del Carmen. Si bien la capa formada por estos depósitos es dura, es altamente soluble, por lo que durante las precipitaciones podrían liberar los detritos cementados y pasar a aportar material para la generación de remociones en masa (Falcón et al., 2014).

2.1.4.11. Depósitos Antrópicos Han

(Holoceno)

Corresponden a rellenos artificiales y residuos sólidos domiciliarios e industriales. Los rellenos artificiales están compuestos por arenas, gravas, bloques y bolones, utilizados principalmente en obras de construcción relacionadas al puerto, costanera y playas artificiales, además de desmontes de la extracción de áridos (Falcón et al., 2014).

Los residuos domiciliarios son principalmente depositados en el vertedero municipal, ubicado en el sector de La Chimba, abarcando un área aproximada de $709,000 m^2$, cubriendo los depósitos aluviales (PIHa) (Roldan, 2019). Se observan también, a menor escala, residuos domiciliarios en quebradas de la Cordillera de la Costa y en bordes de caminos secundarios que la cruzan (Falcón et al., 2014).

Los residuos industriales corresponden, fundamentalmente, al escorial de la Fundición de Huanchaca, lugar donde actualmente se encuentra el casino Enjoy. El depósito contiene plomo, hierro, cobre, zinc, cadmio, mercurio, cromo, bario, selenio, arsénico y plata, y fue definido como residuo peligroso por su alto contenido de plomo. Estos habrían sido tratados mediante un proceso de solidificación durante la construcción del casino (Operaciones El Escorial Sociedad Anónima, 2006; Falcón et al., 2014).

2.2. Clima y vegetación

El norte de Chile se caracteriza por poseer un clima extremadamente árido y estable (Garreaud y Rutllant, 1996), con condiciones xéricas (carencia de lluvias). Esta falta de precipitaciones se puede explicar por «la presencia del Anticiclón del Pacífico, que impide el ingreso de masas de aire húmedas que provienen del océano; por la corriente fría de Humboldt, y por la gran elevación de la Cordillera de los Andes» (Biblioteca del Congreso Nacional, 2020). Esta condición es interrumpida por lo que se conoce como invierno boliviano, fenómeno estacional producido por el ingreso de masas de aire húmedas provenientes desde el sector oriente de la Cordillera de Los Andes (Biblioteca del Congreso Nacional, 2020).

En la franja costera de la ciudad de Antofagasta el clima es desértico costero nuboso, y destaca la presencia de abundante humedad y neblinas matinales, pero precipitaciones casi nulas. Las temperaturas varían entre 1 y 2°C de noche, a 30°C durante el día (Biblioteca del Congreso Nacional, 2020). El promedio anual de precipitaciones varía entre 1 y 3 mm, sobrepasando muy ocasionalmente los 10 mm. Como se muestra en la figura 2.3, la mayoría de estos *peaks* coinciden con eventos que generaron aluviones, siendo el más importante el de 1991, llegando a intensidades de 24 mm/h y acumulando más de 40 mm de agua caída entre el 18 y 19 de junio.

En cuanto a vegetación, la humedad de la costa permite el desarrollo de vegetación baja y espinosa, como pingo-pingo, chamicilla, llantén, chañar y chilcaybrea, y, comúnmente, en laderas del Escarpe Costero, se encuentran distintos tipos de cactus.

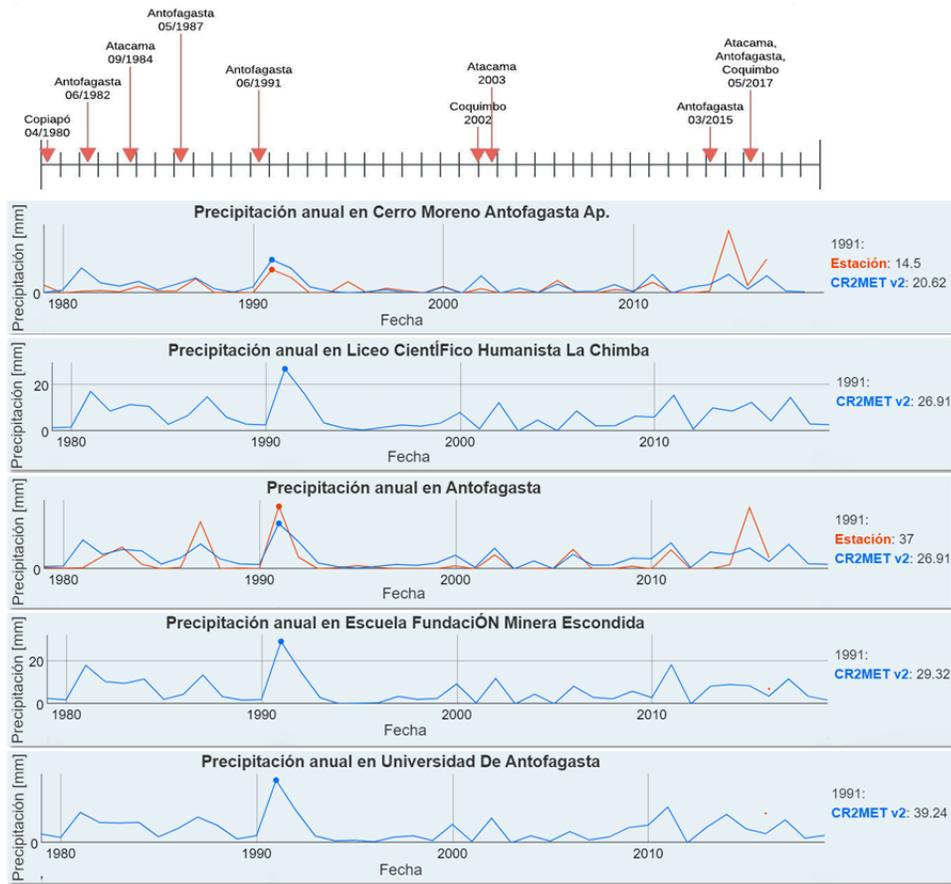


Figura 2.3: Precipitación anual en Antofagasta según las distintas estaciones meteorológicas del sector, asociadas a línea temporal de eventos aluvionales en el norte de Chile. Extraído de Mawün, 2021.

2.3. Marco teórico

2.3.1. Remociones en masa

Los fenómenos de remoción en masa corresponden a un proceso de transporte de material que comprende todos aquellos movimientos, lentos o rápidos, ladera abajo de una masa de rocas, detritos o suelo, generado por distintos factores, principalmente gravitacionales (Cruden, 1991; Cruden y Varnes, 1996).

Estos eventos son clasificados por Cruden y Varnes (1996) en términos de tipo de movimiento (caída, volcamiento, deslizamiento, propagación o extensión lateral y flujo) y material (roca y suelo), y posteriormente reclasificados por Hungr et al. (2014), basado en los mismos conceptos, generando subdivisiones según el comportamiento del material durante la remoción. Así, se determinan 32 tipos de remociones en masa, como se muestra en la tabla 2.1.

Se debe tomar en cuenta que estos fenómenos varían en velocidad, caracterizándose algunos tipos por ser extremadamente rápidos, como las caídas de rocas, y otros por todo lo

contrario, como las reptaciones de suelo, pero también variando dentro de una misma categoría, pudiendo clasificarlos de acuerdo con la escala de velocidades propuesta por Cruden y Varnes (1996) (tabla 2.2).

De todas formas, es necesario considerar que, en la naturaleza, una remoción en masa muy difícilmente puede ser encasillada en un solo tipo de remoción, siendo por lo general un proceso complejo (Glade, 2003), y además, independientemente de la categoría o tipo de remoción, pueden variar ampliamente en cuanto a extensión espacial, alcance, volumen de material removido, entre otros aspectos. Por ejemplo, el deslizamiento de tierra de una ladera, activo por varios años, que afectó una autopista en Caracas, Venezuela, donde se estima que el volumen removido es del orden de los $6 * 10^6 m^3$ y se han determinado variaciones de velocidad de su desplazamiento dentro de un rango de 5 cm/mes y 1.5 cm/año entre los años 1987 y 2006 (Proyecto Multinacional Andino, 2007), o el deslizamiento de tierra en el Cerro Tamuga en la región Andina del Ecuador ocurrido el año 1993, que removió una masa de aproximadamente 19.4 millones de m^3 (Sevilla, 1994; Proyecto Multinacional Andino, 2007) generando un escarpe de 200 m en unos segundos (Egüez y Plaza, 1996; Proyecto Multinacional Andino, 2007).

Tabla 2.1: Tipos de remociones en masa (Hungry et al., 2014)

| Tipo de movimiento | Roca | Suelo |
|--------------------------|---|---|
| Caída | 1. Caída de roca/hielo | 2. Caída de peñasco/detrito/limo |
| Volcamiento | 3. Volcamiento de bloques 4. Volcamiento flexural de roca | 5. Volcamiento en bloque de grava/arena/limo |
| Deslizamiento | 6. Deslizamiento rotacional de roca 7. Deslizamiento planar de roca 8. Deslizamiento en cuña 9. Deslizamiento compuesto de roca 10. Deslizamiento irregular | 11. Deslizamiento rotacional de arcilla/limo 12. Deslizamiento planar de arcilla/ limo 13. Deslizamiento de grava/arena/detrito 14. Deslizamiento compuesto de arcilla/limo |
| Propagación lateral | 15. Propagación de talud de roca | 16. Propagación por licuefacción de arena/limo 17. Propagación por arcillas sensitivas |
| Flujo | 18. Avalancha de roca/hielo | 19. Flujo de arena/limo/grava/ detrito seco (o no licuado) 20. Deslizamiento de flujo de arena/limo/detrito 21. Deslizamiento de flujo de arcillas sensitivas 22. Flujo de detritos 23. Flujo de barro 24. Crecida de detritos 25. Avalancha de detritos 26. Flujo de tierra 27. Flujo de turba |
| Deformación de pendiente | 28. Deformación de montaña 29. Deformación de talud de roca | 31. Reptación de suelo 32. Solifluxión/ gelifluxión |

Tabla 2.2: Escala de velocidades de remociones en masa (Cruden y Varnes, 1996).

| Clase de velocidad | Descripción | Velocidad [mm/s] | Velocidad típica |
|--------------------|-----------------------|-----------------------------|-----------------------|
| 7 | Extremadamente rápida | $> 5 * 10^3$ | > 5 m/s |
| 6 | Muy rápida | $5 * 10^3 - 5 * 10$ | 5 m/s – 3 m/min |
| 5 | Rápida | $5 * 10 - 5 * 10^{-1}$ | 3 m/min – 1.8 m/h |
| 4 | Moderada | $5 * 10^{-1} - 5 * 10^{-3}$ | 1.8 m/h – 13 m/mes |
| 3 | Lenta | $5 * 10^{-3} - 5 * 10^{-5}$ | 13 m/mes – 1.6 m/año |
| 2 | Muy lenta | $5 * 10^{-5} - 5 * 10^{-7}$ | 1.6 m/año – 16 mm/año |
| 1 | Extremadamente lenta | $< 5 * 10^{-7}$ | < 16 mm/año |

2.3.2. Flujos

Los flujos son procesos que afectan a una masa de suelo en que, durante su desplazamiento, el material exhibe un comportamiento semejante al de un fluido. Puede ser rápido o lento, saturado o seco, y puede alcanzar una concentración de agua y partículas tal, que se comporte mecánicamente como un fluido no newtoniano (relación *stress-strain* no lineal), tendiendo a un comportamiento semejante al de un fluido plástico viscoso (Varnes, 1978; Proyecto Multinacional Andino, 2007).

El suelo involucrado se diferencia entre tierra o lodo (más del 80 % partículas menores a 2 mm), y detritos (entre 20 % y 80 % partículas mayores a 2 mm), donde la proporción de material fino es la que controla el comportamiento mecánico de la masa, siendo alrededor del 10 % la proporción crítica: si se tiene un porcentaje menor al crítico se trata de un flujo de tipo granular, controlado por el choque entre partículas, mientras que si es mayor el flujo es de tipo viscoso, controlado por el fluido intersticial (Varnes, 1978).

Otro factor importante a considerar es la concentración volumétrica, definida como el porcentaje de volumen de sólidos con respecto al volumen de la mezcla. Si esta es menor al 20 % se denomina a la remoción como crecida de agua o inundación (Costa y Schuster, 1988), si se encuentra entre el 20 % y 50 % es un flujo hiperconcentrado o inundación de detritos, y si es mayor al 50 % es un flujo de detritos (Sepúlveda, 1998).

Por último, se hace referencia a si el movimiento en masa se desplaza a través de un canal o cauce, o libremente por laderas de alta pendiente, diferenciando así un flujo de una avalancha, respectivamente.

Hungr et al. (2001) presenta una clasificación de flujos basada en el material, contenido de agua, velocidad y condiciones especiales, expuestos en la tabla 2.3.

Tabla 2.3: Clasificación de flujos de Hungr et al. (2001)

| Material | Contenido de agua | Condiciones especiales | Velocidad | Nombre |
|--|--------------------------------------|--|-----------------------|-------------------------------------|
| Limo, arena, grava, detritos (coluvios) | Seco, húmedo o saturado | Sin exceso de presión de poros. Volumen limitado | Variada | Flujo de material sin licuefacción |
| Limo, arena, grava, detritos, roca meteorizada y/o poco resistente | Saturado en la superficie de ruptura | Material susceptible a licuefacción. Humedad constante | Extremadamente rápido | Flujo por deslizamiento de material |
| Arcillas sensitivas | En o sobre el límite líquido | Licuefacción in situ. Contenido constante de agua | Extremadamente rápido | Flujo por deslizamiento de arcilla |
| Turba | Saturado | Exceso de presión de poros | Lento a muy rápido | Flujo de turba |
| Arcilla o tierra | Cerca del límite plástico | Lentos. Cuerpo más rígido desliza | <Rápido | Flujo de tierra |
| Detritos | Saturado | En canal preexistente. Contenido de agua en aumento | Extremadamente rápido | Flujo de detritos |
| Barro | En o sobre el límite líquido | Flujo de detritos de grano fino | >Muy rápido | Flujo de barro |
| Detritos | Presencia libre de agua | Inundación | Extremadamente rápido | Inundación de detritos |
| Detritos | Parcial o totalmente saturados | Sin encauzamiento. Superficiales y con fuente en zonas de alta pendiente | Extremadamente rápido | Avalancha de detritos |
| Roca fragmentada | Variado, principalmente secos | Roca intacta en la fuente. Grandes volúmenes | Extremadamente rápido | Avalancha de rocas |

2.3.3. Flujos de detritos

Los flujos de detritos son unos de los tipos de peligro geológico más comunes en Chile, siendo desencadenados, principalmente, por fuertes precipitaciones (relativas y variables con respecto a la zona geográfica) (Sepúlveda et al., 2006). Estos corresponden a movimientos muy rápidos a extremadamente rápidos de detritos saturados, no plásticos (índice de plasticidad (IP) menor a 5%), que transcurren confinados a lo largo de un canal o cauce preexistente (Cruden y Varnes, 1996).

Durante su desarrollo, estos flujos se componen principalmente por oleadas o pulsos (Pierson, 1986), los que exhiben una morfología típica. Esta, de acuerdo con Solis (1995), responde a la mecánica de movimiento del flujo, que se puede explicar por dos efectos: la fuerza boyante, asociada a la diferencia de densidad entre el sólido sumergido y la matriz, con lo cual los bloques se mantienen en suspensión, y la fuerza dispersiva, que al ser proporcional al diámetro del sedimento permite que las partículas de mayor tamaño sean arrastradas a la parte superior del flujo. Así, se distinguen tres regiones principales en un flujo (Pierson, 1986), indicadas en la figura 2.4.

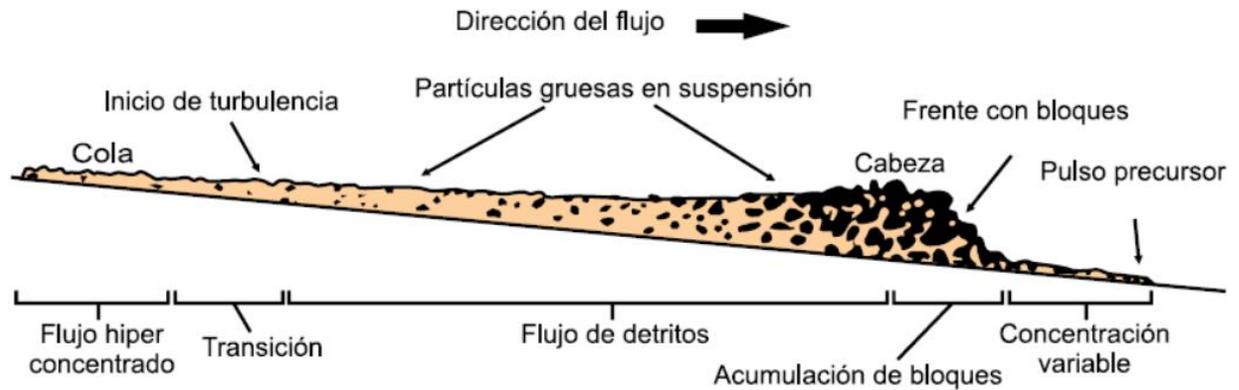


Figura 2.4: Corte esquemático típico de un flujo de detritos. Frente con bloques de un pulso del flujo de detritos (Diagrama de Pierson, 1986). Tomado de Proyecto Multinacional Andino (2007)

El frente o cabeza corresponde a la zona más alta del flujo, pudiendo superar los 10 m, característica que les otorga un gran poder destructivo. Posee un comportamiento turbulento y transporta material granular, incluyendo grandes bloques si se encuentran entre el material disponibles.

A continuación de la cabeza se encuentra el cuerpo, región más extensa del flujo. Posee un comportamiento semiturbulento y transporta gran porcentaje de partículas gruesas en suspensión.

Finalmente, la cola es la zona de menor altura en un pulso. Posee un comportamiento laminar, transporta partículas finas y, en función de la disponibilidad de estas, puede presentarse de líquida a hiperconcentrada.

2.3.4. Susceptibilidad

De acuerdo con Sepúlveda (1998), susceptibilidad corresponde a la «capacidad o potencialidad de una unidad geológica o geomorfológica de ser afectada por un proceso geológico determinado», mientras que Gonzalez et al. (2002) indica que puede definirse como «la posibilidad de que una zona quede afectada por un determinado proceso, expresada en diversos grados cualitativos y relativos».

En otras palabras, en este trabajo se considerará susceptibilidad como la potencialidad de una unidad geológica o geomorfológica de ser afectada por un proceso determinado que genere un evento de remoción en masa.

2.3.5. Peligro o amenaza

Se define peligro o amenaza geológica como la «condición o proceso geológico potencialmente catastrófico», o como la «probabilidad de que suceda un evento de este tipo durante un período de tiempo en un sitio dado» (Hauser, 1985; Sepúlveda, 1998). La Oficina para la Reducción de Riesgo de Desastres de las Naciones Unidas UNISDR (2009) detalla un poco más el concepto, y define explícitamente peligro geológico como «un proceso o fenómeno

geológico que podría ocasionar la muerte, lesiones u otros impactos a la salud, al igual que daños a la propiedad, la pérdida de medios de sustento y de servicios, trastornos sociales y económicos, o daños ambientales».

Por otro lado, Gonzalez et al. (2002) define peligrosidad, concepto asociado a peligro, como «la probabilidad de ocurrencia de un proceso de un nivel de intensidad o severidad determinado, dentro de un período de tiempo dado y dentro de un área específica».

Esta probabilidad puede expresarse de distintas formas, entre las cuales, Lee y Jones (2014) presentan las siguientes cuatro como las más comunes: (1) peligro identificado dentro de una zona determinada donde obviamente co-existe con vulnerabilidad, pero sin especificar su probabilidad debido a falta de datos; (2) expresiones cualitativas de probabilidad, con un máximo de 5 categorías, como por ejemplo 'raro' o 'improbable' para una probabilidad casi nula o si se puede asumir que no ocurrirá dentro de un período determinado de tiempo, 'poco común' o 'remoto' para una probabilidad baja pero posible, 'infrecuente' u 'ocasional' para probabilidad moderada o si se asume que ocurrirá en algún momento dentro del período estudiado, 'probable' si ocurrirá varias veces durante el período, y 'frecuente' para una alta probabilidad o si ocurrirá muchas veces; (3) expresiones cualitativas de probabilidad usando categorías numeradas entre 1 y 5 o de 1 a 10, donde 1 es muy poco probable y el máximo representa una muy alta probabilidad; (4) y por último, estimaciones cuantitativas de frecuencia y probabilidad, representadas por porcentajes o con valores decimales, entre 0 y 1.

2.3.6. Vulnerabilidad

En la literatura existen numerosas definiciones para este concepto, dependiendo de los fundamentos o principios desde donde se define (ecología política, ecología humana, ciencia física, análisis espacial, etc.) y sus subsecuentes métodos de análisis y evaluación, distintos peligros (inundaciones, eventos sísmicos, hambruna, deslizamientos, etc.), diferentes focos de investigación o visiones (biológica, social, económica, etc.), entre otros. Cutter (1996) presenta una selección de 18 definiciones distintas.

Lee y Jones (2014) indican que corresponde, desde una mirada general, al «potencial para que algo sufra daño desde una perspectiva humana». Asimismo, sugieren que su importancia, desde el punto de vista de las ciencias de la tierra, reside en que el peligro, asociado a fenómenos físicos como remociones en masa, existe debido a la presencia de vulnerabilidad y en que permite vincular niveles de peligro con exposición y posteriormente generar evaluaciones cuantitativas de riesgo a partir de la determinación de distintos niveles de pérdida.

A grandes rasgos, vulnerabilidad correspondería al nivel de las consecuencias o impacto adversos esperados dado un evento de remoción en masa de un tipo y magnitud determinados.

Desde el punto de vista del estudio de remociones en masa Lee y Jones (2014) identifican tres grandes enfoques: vulnerabilidad física, refiriéndose a vulnerabilidad de edificios, estructuras, infraestructura, etc.; societal, refiriéndose a vulnerabilidad de sistemas socio-político-económicos, producción industrial y agrícola, activos como viviendas y otros tipos de generación de ingresos; y social, refiriéndose a vulnerabilidad de sustentos, resiliencia comunitaria, y mecanismos de supervivencia.

2.3.7. Riesgo

Así como existen numerosas definiciones para vulnerabilidad, también las hay para riesgo, conviniendo, en términos genéricos, en que corresponde al potencial para obtener consecuencias adversas, pérdida o daño, o la posibilidad de pérdida (Lee y Jones, 2014).

Riesgo corresponde a un concepto humano, que gira en torno al humano y las cosas que estos valoran, por lo que la construcción de este concepto y el valor que se le da puede variar entre cada individuo dependiendo de su contexto, conjunto de creencias, experiencias, apreciación de la amenaza, etc., variando también a lo largo y ancho de los distintos continentes, e incluso con el tiempo, a medida que van aumentando las expectativas del nivel de vida (salud y seguridad) con el desarrollo de la ciencia y la tecnología (Lee y Jones, 2014). La falta de conocimiento y dificultad para predecir la variación del riesgo en un futuro variable, hace que el concepto de riesgo, así como su evaluación, se deba limitar a un espacio y tiempo razonables.

Desde un punto de vista científico, se ha definido riesgo como «una combinación de la probabilidad o frecuencia de ocurrencia de una amenaza determinada y la magnitud de las consecuencias de ocurrencia» (Royal Society, 1992), indicando la importancia del agente generador del riesgo y dando peso a las consecuencias al momento de determinar el riesgo (Lee y Jones, 2014). Las distintas fuentes que definen este concepto siguen en general la misma línea, coincidiendo en sus alcances. El grupo de Gonzalez et al. (2002) se refieren a riesgo desde el punto de vista de su evaluación, donde indica que se realiza a partir de las causas y consecuencias de un determinado proceso, es decir, de su peligrosidad y subsecuentes efectos sobre los elementos expuestos (personas, infraestructura, bienes, etc.), estos últimos expresados mediante parámetros como vulnerabilidad, pérdidas, costes, exposición, etc.

Por otro lado, coincidiendo con lo anterior, la UNISDR (2009) define riesgo como «la combinación de la probabilidad de que se produzca un evento y sus consecuencias negativas», aclarando que existen otras connotaciones en el lenguaje popular, pues en general se piensa en riesgo como la posibilidad o probabilidad de algo, como 'el riesgo de tener un accidente', mientras que técnicamente se hace más énfasis en las consecuencias.

Finalmente, el riesgo, en general, se define en función del peligro de una remoción específica (P), vulnerabilidad de los elementos en riesgo (V) y la exposición de estos (E^*), donde los elementos en riesgo corresponden al valor total al considerar o sumar las distintas categorías en que se pueden clasificar aquellos elementos con algún valor para el humano, y exposición se refiere a una medida de este valor considerando sus variantes (como la presencia o no de una persona en un lugar específico), y su vulnerabilidad, de la forma $E^* = V \times E$ (Lee y Jones, 2014).

Lee y Jones (2014) presentan como riesgo específico el grado esperado de pérdida debido a una magnitud particular de remoción, desglosando más los elementos:

$$R_s = \mathbb{P}(P_i) \times (E \times V \times E_x)$$

donde R_s corresponde al riesgo específico; (P_i) al peligro de la remoción o evento evaluado; E a los elementos en riesgo; V a la vulnerabilidad y E_x a la exposición o a la proporción del

valor total de la posibilidad del elemento en riesgo de estar presente y por lo tanto susceptible a ser impactado de forma adversa por la remoción, en una escala entre 0 y 1. Así, el riesgo total sería la suma de los riesgos específicos, calculados para el rango total de magnitudes de la remoción evaluada.

2.4. Antecedentes históricos

Si bien no existe una gran cantidad de registros históricos de flujos o aluviones en Antofagasta, sí se han contabilizado algunos eventos importantes en la zona norte de Chile, generalmente con consecuencias catastróficas:

Los días 13 y 14 de julio de 1905 se generaron aluviones en el río Salado y en algunas quebradas costeras en la región de Atacama (Vargas et al., 2018).

El 21 de agosto de 1930 lluvias de hasta 39 mm/24h provocaron aluviones en la Quebrada Conchuelas, en la comuna de Chañaral, inundando y arrastrando barro hacia el barrio del mismo nombre (Vargas et al., 2018).

El 12 de junio de 1940 precipitaciones de 17 mm/24h de intensidad provocaron en la ciudad de Antofagasta cortes de camino, interrupciones eléctricas y daños en numerosas viviendas, en Chañaral intensidades de 29 mm/24h también generaron cortes de camino y algunos flujos, mientras que en la ciudad de Taltal, al día siguiente, flujos de detritos generados por lluvias de 39 mm/24h de intensidad descendieron desde 3 quebradas y causaron la muerte de 4 personas, dejando a más de 200 personas damnificadas y dañando severamente 60 viviendas e instalaciones públicas y privadas (Hauser, 1993, 1997; Vargas et al., 2018).

El 25 de julio de 1940, en Tocopilla, región de Antofagasta, precipitaciones de 17 mm/24h de intensidad generaron aluviones que arrasaron con casi la totalidad de algunas poblaciones obreras y afectaron en menor medida algunas de los barrios altos y el centro de la ciudad, mientras que el mismo día, en Taltal, se registraron precipitaciones de 38 mm/24h, provocando aluviones que alcanzaron el casco urbano desde 3 quebradas distintas, registrándose 20 víctimas fatales y graves daños materiales en numerosas viviendas. En total quedaron al menos 1500 personas damnificadas, 40 muertos y decenas de desaparecidos y heridos (Hauser, 1993, 1997; Vargas et al., 2018).

El 25 y 26 de agosto de 1969 la Quebrada Juan Godoy, en La Serena, y la Quebrada Monardez, en Vallenar, encauzaron flujos que generaron daños leves a pequeñas comunidades ubicadas a su paso (Vargas et al., 2018).

El 6 de abril de 1980 flujos de detrito y barro descendieron por algunas quebradas hacia el valle de Copiapó (Vargas et al., 2018).

El 7 de febrero de 1972 precipitaciones que alcanzaron 39.4 mm/24h de intensidad provocaron daños en la Compañía Minera Sagasca en la región de Tarapacá (Henriquez, 1972; Hauser, 1993).

El 23 de mayo de 1982 precipitaciones de 5.5 mm/24h de intensidad causaron severos

daños en 12 viviendas del sector El Huáscar, al sur de la ciudad de Antofagasta (Hauser, 1997; Vargas, Ortlieb, 1997).

El 4 de julio de 1984 flujos de barro generados por intensidades aproximadas de 24 mm/24h en las provincias de El Huasco y Copiapó provocaron cortes de caminos y daños leves. El 7 del mismo mes, los sectores de El Huasco y Freirina se encontraron sin agua potable porque la cañería de aducción había sido arrastrada 70 m por el flujo que descendía de la Quebrada Maitencillo (Vargas et al., 2018).

Los días 6 y 7 de mayo de 1987 se registraron aluviones que descendieron por algunas quebradas de Vallenar, desencadenados por precipitaciones de 20 mm/24h de intensidad. El 28 de julio del mismo año, en Antofagasta, lluvias que alcanzaron los 22.8 mm/24h causaron anegamientos en calles y daños en viviendas, mientras que la descarga de la Quebrada La Negra al mar fue incrementada desde algunas decenas de l/s a 7 m³/s. Al mismo tiempo, Para el 31 de julio Chañaral era la ciudad más afectada de la región, habiendo sufrido las consecuencias de aluviones e inundaciones luego de casi 63 mm de agua caída entre los días 25 y 28, con más de 2000 damnificados (Hauser, 1997; Vargas et al., 2018).

Entre el 17 y 19 de junio de 1991 un gran temporal afectó a toda la zona norte del país. Precipitaciones de hasta 50 mm/24h generaron graves aluviones en Antofagasta, registrándose más de 90 personas fallecidas, casi una veintena desaparecidas y alrededor de 20 mil damnificadas. Al mismo tiempo, el temporal produjo nevazones, inundaciones y aluviones en varias quebradas de Atacama, afectando a 1700 personas y dejando a 450 damnificadas. En algunos sectores, como el agua caída superó los 100 mm entre el 17 y 19 de junio. (Hauser, 1997; Vargas et al., 2018).

Entre el 25 y 26 de marzo de 2015 lluvias torrenciales provocan severos aluviones e inundaciones en toda la región de Atacama. Se reactivó el río Salado y su crecida arrasó con el pueblo homónimo y con Chañaral, sector donde desemboca al mar. La reactivación del río Copiapó y la quebrada Paipote, transportando lodo y troncos a su paso, inundó las ciudades de Tierra Amarilla y Copiapó. Casi la totalidad de la región quedó sin energía eléctrica e incomunicada. Las precipitaciones llegaron a acumular entre 20 y 90 mm de agua caída en distintos sectores de la cuenca del río Salado. (Vargas et al., 2018)

El 13 de mayo de 2017 precipitaciones activan 18 quebradas en las comunas de Alto del Carmen, Freirina y Tierra Amarilla, en la región de Atacama. Más de 50 mm de agua cayó en el lapso de 2 días en el Huasco y Copiapó, mientras que en Chañaral y Vallenar cayeron 23.8 mm y 37.9 mm respectivamente. Más de 4 mil personas quedaron aisladas en la región, y casi mil tuvieron que recurrir a albergues improvisados. (Vargas et al., 2018)

A continuación se describe con mayor detalle uno de los eventos más importantes y que dejó daños más graves en la comuna de Antofagasta.

2.4.1. Evento del 18 y 19 de junio de 1991

La madrugada del 18 de junio de 1991, entre las 00:30 y las 03:30 horas, dio lugar a un temporal con vientos de hasta 70 km/h (máximos entre las 00:30 y 1:00 horas) y un total de precipitaciones de entre 14 y 42 mm en tres estaciones pluviométricas separadas por

menos de 20 km entre sí (Cerro Moreno, Universidad Católica del Norte (UCN) y Barrio Industrial (DGA)). Las intensidades de las precipitaciones variaron entre 4.7 mm/h en la estación Cerro Moreno y 14 mm/h en la estación de la UCN, alcanzando por momentos hasta 24 mm/h (Ayala y Vidal, 1993; Garreaud y Rutllant, 1996; Hauser, 1997; Vargas et al., 2000).

Las quebradas se activaron poco tiempo después de comenzadas las lluvias (aproximadamente a las 00:40 horas) (Hauser, 1997), produciéndose los flujos más importantes al cabo de 3 horas (Vargas et al., 2000). Al cesar las precipitaciones (aproximadamente a las 03:30 horas) el caudal y magnitud de los flujos disminuye, poniendo de manifiesto, de acuerdo con Hauser (1997), la respuesta casi instantánea de las hoyas hidrográficas, con tiempos de concentración muy breves.

Los flujos descendieron a través de fondos de quebradas donde no había presencia de asentamientos humanos ni obras civiles, desembocando en la explanada donde se despliega la ciudad. En este punto un importante volumen de las precipitaciones se habría infiltrado en los depósitos permeables de los abanicos o conos de deyección hasta superar su capacidad de infiltración, provocando posteriormente voluminosas remociones cuyo material se sumó al inicial (Hauser, 1997). En algunos sectores, al desembocar en el llano los flujos lo hicieron con gran energía, generando «olas» o un frente de altura muy superior a los depósitos finales. Esto último podría haberse debido a «estrechamientos locales de las quebradas, y al colapso de entrampamientos por la presencia de labores de extracción de áridos en algunos cauces» (Vargas et al., 2000). Este frente se abre paso a través de calles destruyendo y llevándose casas hasta toparse con un nuevo cambio topográfico, abriéndose en la zona de la costa, donde deposita nuevamente una gran carga.

La razón media entre agua y sólidos de los flujos que transportaron este material habría sido de 3:2, mientras que su velocidad de avance fue de entre 15 y 30 km/h. (Ayala y Vidal, 1993)

El total del material transportado por los flujos y depositado a lo largo de su trayectoria se eleva a $700.000 m^3$, del cual aproximadamente $400.000 m^3$ habría sido depositado en plena zona urbana (y posteriormente retirado de las calles) (Ayala y Vidal, 1993). Gran volumen del material transportado por los flujos fue depositado en zonas de cambios de pendientes abruptos, es decir, primero en la desembocadura de las quebradas hacia la zona urbana y una segunda descarga al llegar a la línea de costa (Hauser, 1997).

Según lo presentado por Ayala y Vidal (1993), en informes anteriores se describió en base a observaciones en terreno que la composición del material depositado corresponde principalmente a material fino (ceniza volcánica), y de forma esporádica se encontró presencia de gravas y gravillas. Solo en las quebradas Baquedano, La Chimba, Salar del Carmen, El Ancla y La Negra se observó material grueso, bolones y bloques, probablemente transportados desde zonas de extracción de áridos existentes.

Si se analizan los efectos en las distintas quebradas, Hauser (1997) señala que tanto el caudal de los flujos como su capacidad de transporte dependen directamente de la superficie o tamaño de las hoyas hidrográficas, de la pendiente del eje hidráulico principal de las quebradas y sus tributarios, la permeabilidad del sustrato rocoso, la disponibilidad de depósitos

granulares sueltos y la composición de estos materiales. Siguiendo la misma línea, Vargas et al. (2000) dice que «existen diferencias entre los sedimentos originados en los distintos sectores de la ciudad», asociado más o menos a los mismos factores ya mencionados. Así, describe los depósitos entre las quebradas La Negra y Salar del Carmen, en el sector de la ciudad cercano a las quebradas, como depósitos proximales masivos compuestos por 50 a 80 % de clastos entre 5 y 15 cm, contenidos en matriz de arena, grava fina y escaso limo (3-5 %). En los sectores proximales cercanos a la desembocadura de las quebradas ubicadas entre El Toro y El Ancla, señala la presencia de bloques de hasta 1 m de diámetro. Hacia el norte de la quebrada Bonilla y hacia el sur de la quebrada Jardines del Sur, describe depósitos con clastos de menor y mayor porcentaje de matriz de arena (40 a 70 %), debido a la mayor disponibilidad de material fino (arena de depositación eólica) para transportar.

Quebradas Caracoles, Salar del Carmen, Cadena, Ancla y Baquedano sustentaban en numerosos sectores extracciones de áridos (mecanizadas o artesanales) para la preparación de hormigones y pavimentos asfálticos, liberando importantes volúmenes de material detrítico, que fue luego incorporado fácilmente a los flujos torrenciales. Basura y escombros que rellenaban extensos sectores del cauce de las quebradas también estuvieron disponibles para ser removidos. Estos últimos generaron, a su vez, obstáculos temporales al desplazamiento de los flujos, lo que habría magnificado la energía instantánea del flujo generando 'olas' u ondas de gran poder destructivo.(Hauser, 1997)

Van-Sint-Jan et al. (1992) y Hauser (1997) concuerdan con que una parte importante del material grueso transportado por los flujos fue depositado en zonas donde este proceso es favorecido por el cambio de una alta pendiente a una más suave, es decir, principalmente a la salida de la zona montañosa. De acuerdo con Hauser (1997), hay 2 zonas donde se produjo esta desaceleración de la energía del flujo debido a quiebres morfológicos, la primera en la zona ya mencionada, y otra en el borde litoral. En esta primera zona fue depositada gran parte de la 'carga', constituida mayoritariamente por fragmentos rocosos de diverso tamaño (ripió, gravas) y grandes volúmenes de basura y escombros. Numerosas viviendas de material ligero y albañilería fueron arrastradas por el paso del torrente antes que éste minimizara su energía. Los flujos, luego de 'descargar' su material más pesado, continuaron hacia la costa, encauzados por el eje y favorable pendiente de calles hacia el mar (las calles Nicolás Tirado, Paraguay, Salar del Carmen, Magallanes, Buenos Aires, Lima, Barón de la Rivera, Playa Blanca, General Borgoño, Uribe, Prat, Baquedano y Maipú), donde un nuevo quiebre morfológico, unido a interrupciones en la continuidad de las calles de 'bajada', frenó el desplazamiento de los flujos, escurriendo por numerosas calles laterales con dirección nortesur, inundando con limo y arena numerosas viviendas, calles, veredas, plazas, establecimientos comerciales, bodegas, talleres, canchas de deportes, etc.

Según Van-Sint-Jan et al. (1992) y Ayala y Vidal (1993), los mayores daños fueron producidos en las quebradas Salar del Carmen y La Cadena. A continuación se detallan los efectos en algunas de las quebradas de la comuna, ordenadas de norte a sur.

- La Chimba: No afectó a zonas pobladas, solo provocó inundación de caminos y daños en ripiera cercana a su desembocadura (Covarrubias et al., 1991).
- Caracoles: Extracciones de áridos; basura y escombros; importantes daños materiales

y pérdidas de vidas(Hauser, 1997).

- Bonilla: Daños materiales a población Valdivieso, llegando su acción en forma reducida hasta población la Bonilla.
- Salar del Carmen: Extracciones de áridos; basura y escombros; importantes daños materiales y pérdidas de vidas; daños mayores en 4 primeras cuadras (Hauser, 1997). Socavación en varios sectores del camino de acceso a Antofagasta; destrucción de la aducción de agua potable que une la planta de filtro y la ciudad; daños serios en los pasajes Celta, Castro, Tres Marías y Aurora Boreal; erosión grave en la intersección entre Zegers y Av. Circunvalación (Van-Sint-Jan et al., 1992).
- La Cadena: Extracciones de áridos; basura y escombros (Hauser, 1997). Se produjo socavación, con profundidad de hasta 4 m, en la población El Salto; destrucción de todas las construcciones que se encontraban en su lecho; destrucción de 7 u 8 casas e la población Ferro-Baquedano; Inundación de las bodegas y talleres de FCAB (Van-Sint-Jan et al., 1992).
- El Ancla: Extracciones de áridos; basura y escombros.
- Baquedano: Extracciones de áridos; basura y escombros; importantes daños materiales y pérdidas de vidas; daños mayores en 4 primeras cuadras; torrente sobrepasa la capacidad de porteo de una alcantarilla dispuesta bajo el terraplén de cruce con Av. Circunvalación, momentáneamente embalsados hasta colapsar la estructura ocasionando violenta descarga del torrente a lo largo de su cauce predecesor, ocupado por numerosas viviendas de material ligero. Estas fueron arrasadas, creando una voluminosa cárcava que dificultó su reposición y restitución del tránsito por el sector. (Hauser, 1997)
- El Toro: Importantes daños materiales y pérdidas de vidas; en borde litoral impactó y derribó muros divisorios, grave anegamiento en numerosas casa calle Angamos incluyendo nivel inferior de edificio de departamentos (Av. Grecia 1160); torrentes oportunamente advertidos por centinelas del Regimiento Esmeralda, permitiendo la evacuación del contingente. La casi totalidad de las instalaciones militares construidas sobre el llano aluvial de la quebrada resultó con graves daños materiales. Gran cantidad de pertrechos bélicos (municiones y armamentos) fueron removidos y depositados en la zona urbana adyacente.
- La Negra: En torno al acceso sur de la ciudad repentino incremento de caudal erosionando terraplenes viales y ferroviarios e interrumpiendo las vías de acceso. Daños se extendieron a centros recreacionales: canchas deportivas y camping. En uno de estos, muy próximo al borde litoral, depósitos de limos y arcillas con abundantes escombros de 2 m de espesor.
- Jardines del Sur: Sector residencial de clase económica más alta. Torrentes generados a lo largo de una pequeña quebrada dañaron numerosas viviendas, obras de elevado costo diseñadas y construidas de acuerdo a los mejores estándares, destruyendo muros y losas estructuradas. Los flujos ingresaron por vanos u oquedades creados por la destrucción de las partes más débiles, puertas y ventanas, barriendo con el equipamiento y mobiliario. Depósitos en interior de viviendas de barro y fracciones detríticas de 1.8 a 2 m de espesor.

La depositación y secado de importantes volúmenes de limo y arena en torno a calles marginales del borde litoral (A. Grecia, Brasil, B. O'Higgins, Pérez Zújovic) originó, con posterioridad al 18 de junio, el desarrollo de grandes nubes de polvo.

A partir de estos efectos se han originado distintos programas de mitigación, con el propósito de que una catástrofe de tal magnitud no se vuelva a repetir.

2.5. Plan Regulador Comunal de Antofagasta

El Plan Regulador Comunal de Antofagasta fue actualizado el año 2001. Hasta esa fecha, el desarrollo de la ciudad estaba regido por el plan del año 1989.

En el Plano publicado por la I. Municipalidad de Antofagasta se diferencia el terreno en numerosas categorías, que, con el objetivo de mejorar su visualización y para efectos de este trabajo, se agruparon en: zona montañosa; sector protegido del borde costero; desarrollo recreacional del borde costero; zonas de uso exclusivamente industrial; áreas verdes y espacio público; zonas de conservación e instalaciones culturales; área de seguridad del aeropuerto; sector de equipamiento para actividades productivas, como comercio, ciencia, educación, servicios, etc.; y sectores residenciales y relacionados (figura 2.5).

Se incluyeron en el mapa que se muestra en la figura 2.5, en rojo, los sectores que corresponden a campamentos y tomas, siendo un total de 60 campamentos en la región de Antofagasta, donde viven 6771 familias.

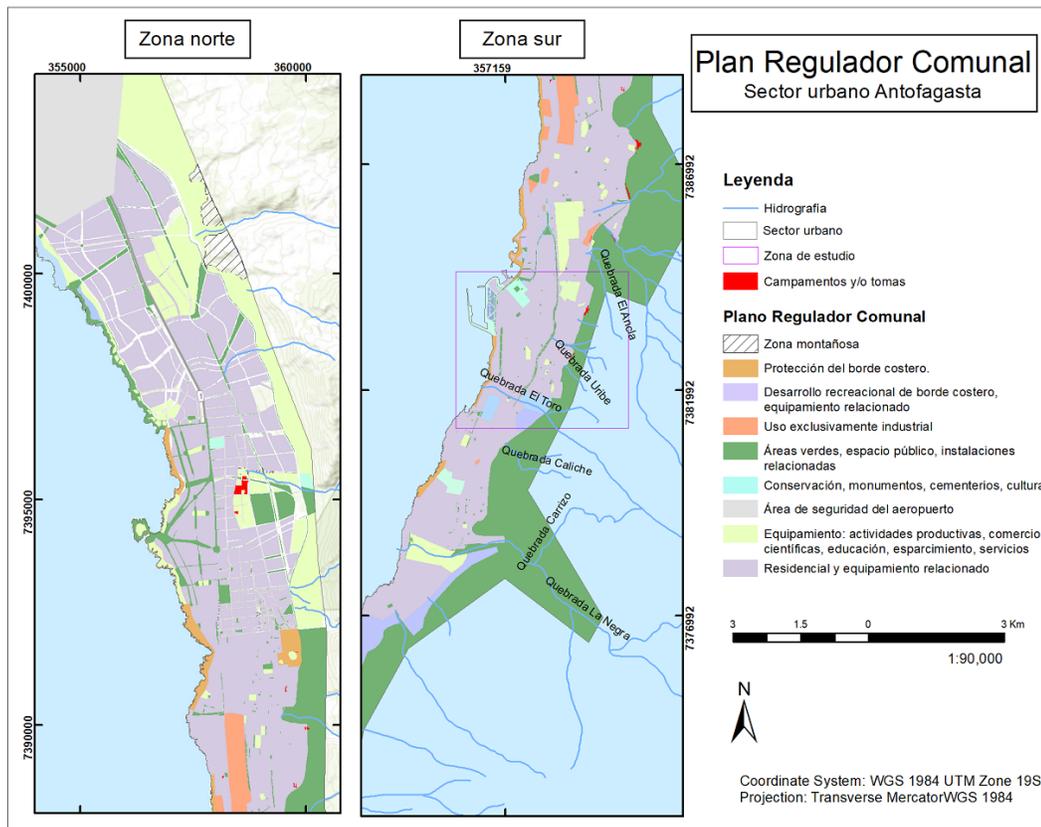


Figura 2.5: Plano regulador comunal de Antofagasta, basado en lo publicado por la I. Municipalidad de Antofagasta.

2.6. Programa de mitigación

La Oficina Nacional de Emergencia del Ministerio del Interior (ONEMI) desarrolló planos de evacuación con zonas demarcadas para quienes deben evacuar en caso de aluvión y puntos de encuentro y albergues definidos para las quebradas Bonilla, Caliche, Coloso, El Ancla, El Huáscar, El Toro, Farellones, Jardines del Sur, La Chimba, Roca Roja, Baquedano y Uribe, La Negra y Universidad de Antofagasta, Las Rocas y Club Hípico, René Schneider y Riquelme, Salar del Carmen y La Cadena (ONEMI, 2020).

Asimismo, la Unidad de Peligro Geológico y Ordenamiento Territorial (UPGOT) del SERNAGEOMIN tiene disponible un mapa de Peligro de Remociones en Masa donde destaca el peligro frente a aluviones (Falcón et al., 2014).

Construcción de obras de mitigación aluvional en quebradas financiadas por el MOP y el Gobierno Regional consta de muros estabilizadores y pozas colectoras. Desde sección Noticias de la MOP Regional:

- La Cadena: 54 pozas decantadoras distribuidas en un afluente principal y 3 afluentes aportantes. Es una de las obras de mayor capacidad de la región: más de 223 mil m^3 .

Quebrada que generó mayores efectos destructivos en el 91.

- Jardines del Sur: Etapa I y II: 93 muros estabilizadores de pendiente distribuidos en su cauce principal y afluente norte. Inversión total de \$9230 mill.
- Riquelme: Hasta ahora 28 muros estabilizadores de pendiente, protege 5200 personas. Falta aún la 3ra y última etapa de construcción. Inverión estimada para un total de 41 muros estabilizadores: \$3400 mill.
- Farellones: Protege a 18 mil vecinos. Capacidad de 23378 m^3 . 20 pozas decantadoras. 51 muros estabilizadores.
- La Chimba: Inversión estimada \$12300 mill. 10 pozas decantadoras en 3750 m de extensión.
- Uribe: 35 muros disipadores de energía y muros estabilizadores de pendiente.
- El Toro: 23 pozas decantadoras, 29 muros estabilizadores. Inversión total de \$8200 mill. 85 % de la obra construida. Capacidad material detrítico luego de las 3 fases de construcción es de 72500 m^3 . Protege a 12 mil habitantes.

2.7. Antecedentes metodológicos

La forma en que se expresan las medidas, escalas o niveles de vulnerabilidad y riesgo y, por lo tanto, los métodos de evaluación respectivos, varían de acuerdo con el enfoque u objetivo del estudio, con la zona y sus características, con el tipo de amenaza, etc. Sin embargo, algunos factores son comunes en las distintas metodologías, por ejemplo, la proximidad a la fuente del peligro, la frecuencia o probabilidad de los eventos, magnitud, duración e impacto espacial (Cutter, 1996).

Al existir tantas variables a considerar, resulta difícil elaborar una metodología estándar, sacrificando a veces resultados más detallados o locales por una que permita su aplicación en otros sectores o a escalas mayores (Cutter, 1996).

Cuando el objetivo es una evaluación de riesgo de remociones en masa, Lee y Jones (2014) recomiendan considerar una definición amplia de vulnerabilidad que permita establecer la naturaleza general de los impactos generados, como la propuesta por la UNISDR (2009): «las características y las circunstancias de una comunidad, sistema o bien que los hacen susceptibles a los efectos dañinos de una amenaza». Por otro lado, mencionan que hay abundantes trabajos acerca de vulnerabilidad, pero pocos que la abarquen desde la perspectiva del estudio de remociones en masa.

Este trabajo se centra en la vulnerabilidad física y, por ende, en el riesgo centrado en las estructuras, pues el análisis de las características de las actividades y sistemas económicos y políticos, así como la capacidad de supervivencia de las personas dependiendo de su edad o clase social, entre otras cosas, sobrepasan los alcances del estudio.

Existen numerosos métodos de evaluación de vulnerabilidad y riesgo, los cuales son principalmente cualitativos y, por lo general, concebidos a partir de extensos registros históricos,

por lo que se acotan siempre a escenarios específicos, considerando tipos e intensidades de remociones en masa determinadas, dificultando su aplicación en contextos diferentes. Sin embargo, existen ciertos patrones que se repiten entre ellos, pudiendo identificar y destacar algunas de sus características.

En el caso de la evaluación de vulnerabilidad física, en general las metodologías utilizadas caracterizan la situación en base a parámetros similares: identificación de los elementos expuestos en base a estudios de peligro, caracterización de la amenaza o juicio experto, y selección de las variables que describen las condiciones de la infraestructura, como materialidad y tipo de construcción, tamaño de la edificación, antigüedad de la construcción (si existen diferencias entre estilos o materialidad entre espacios temporales como décadas, barrios patrimoniales o muy nuevos, etc.), estado de mantención, entre otros (Alexander, 2002). La caracterización de la amenaza o remoción incluye volumen, velocidad, posición de la estructura relativa a la remoción, alcance, etc. A su vez, se realiza una clasificación del daño que afecta a estas estructuras, dividido en distintos niveles.

Alexander (1989) buscó estimar la vulnerabilidad de sectores urbanos estudiando las grietas (tamaño, profundidad y ángulo) en edificaciones antiguas provocadas por remociones en masa pasadas, y clasifica el daño en grados de 0 a 7, donde el mínimo implica que no hay daño y el máximo indica colapso total, pudiendo luego realizar una zonificación de la intensidad. Este método se dirige principalmente a deslizamientos de tierra, y requiere de un muestreo exhaustivo en terreno, válida solo si la mayoría de las estructuras se han conservado o no han sido remodeladas completamente.

Cardinali et al. (2002), guiados por el mismo concepto, consideraron vulnerabilidad como el daño esperado que causaría una remoción de intensidad alta, media o baja (considerando tipo, volumen y velocidad) sobre una construcción, clasificándolo en superficial, funcional y estructural, y generando, a partir de una revisión de la literatura relacionada al tema conocida hasta el momento, una tabla donde asignaron estos valores a distintos tipos de edificaciones y caminos. Si bien es un método que permite tener una estimación inmediata de la vulnerabilidad de determinadas estructuras, se requiere una base de datos confiable y suficientemente extensa de eventos pasados en el sector de estudio u otros con características similares para que pueda ser aplicado con cierto nivel de certeza, especialmente si el objetivo es realizar una evaluación de riesgo basada en estos resultados.

Por otro lado, de acuerdo con Li et al. (2010), se puede estimar vulnerabilidad física en términos de intensidad de la remoción en conjunto con la resistencia de los elementos en riesgo, dependiendo esta última de factores como profundidad de los cimientos, tipo de estructura, estado de mantención y altura de la edificación:

$$\text{vulnerabilidad} = \text{intensidad del evento} / \text{resistencia}$$

obteniendo así un valor de vulnerabilidad entre 0 y 1, y definidos de forma tal que cuando la intensidad es igual a la mitad de la resistencia de un elemento, el valor de vulnerabilidad es igual a 0.5 (Li et al., 2010; Lee y Jones, 2014). Esta metodología permite obtener resultados más precisos (siempre en función de la precisión de la información con la que se trabaje), sin embargo, requiere información más específica y mayor análisis que las demás, como la intensidad dinámica y geométrica de la remoción, haciéndola menos manejable en zonas muy

grandes, pero de gran confiabilidad en sectores más acotados. Se podría considerar como opción para este trabajo, pero teniendo en cuenta la limitación de recursos como el tiempo.

La ventaja de expresar la vulnerabilidad en un rango entre 0 y 1 (no solo con esta metodología, sino también mediante juicio experto), es que en estudios de riesgo como el de villa Bildudalur, Islandia (Bell y Glade, 2004), donde la principal amenaza son avalanchas de nieve, es directo presentar las pérdidas valoradas económicamente de la forma

$$\text{pérdida} = \text{valor del bien} \times (\text{proporción del valor del bien} | \text{magnitud de remoción})$$

donde la proporción del valor del bien corresponde al valor de vulnerabilidad, es decir, la vulnerabilidad representaría a la porción de la infraestructura que es dañada o afectada, dada una remoción de magnitud determinada. Variaciones de este método se dan caso a caso y se puede llevar también a riesgo, pues depende de la accesibilidad de la información, escala de trabajo y características de la amenaza. Por ejemplo, Galli y Guzzetti (2007) estudian riesgo en Umbria, Italia, ante peligro de deslizamientos lentos de tierra, donde reconocen que el daño causado depende principalmente del área de la remoción. Así, calculan las pérdidas valoradas económicamente bajo el mismo principio de la ecuación mostrada anteriormente, pero en función del área de la remoción.

Una vez obtenida la vulnerabilidad, de una forma más simplificada, se puede obtener una evaluación de riesgo mediante el producto entre peligro y vulnerabilidad:

$$\text{Riesgo (R)} = \text{Vulnerabilidad (V)} \times (\text{Peligro (P)})$$

La selección o desarrollo de una metodología para un sector o caso específico dependerá, en gran medida, del acceso a la información, de los datos disponibles, y del tiempo que se dispone.

Capítulo 3

Metodología

El área de estudio, la zona urbana de la ciudad de Antofagasta, fue escogida por contar con una mayor disponibilidad de información y datos que en otros sectores, debido a los numerosos estudios, investigaciones y construcción de obras de mitigación de gran calibre en el contexto nacional, inspirados por los antecedentes conocidos de flujos de detritos que han afectado el área de forma recurrente y las características catastróficas de sus consecuencias, principalmente las del año 1991.

Para el desarrollo de este trabajo primero se recopiló información acerca de la evaluación de vulnerabilidad y riesgo frente a remociones en masa, buscando conocer y comprender las características de los métodos utilizados en distintos contextos, seleccionando luego algunos de ellos en base a la factibilidad de su potencial aplicación en el área de estudio.

Como segundo paso se recopiló la información y datos disponibles acerca del área de estudio y eventos de flujos de detritos que pudieran cubrir los requerimientos de los métodos a aplicar. En base a lo anterior, se caracterizó y acotó el área de estudio y se determinaron las condiciones del evento a evaluar.

Por último, se aplicó el método finalmente escogido y se evaluó vulnerabilidad y riesgo frente a aluviones en la zona, adaptando algunos pasos de acuerdo con los datos disponibles.

3.1. Recopilación bibliográfica

3.1.1. Riesgo

De la recopilación bibliográfica se tiene que el riesgo se define en función de la exposición, vulnerabilidad y peligro, donde la exposición corresponde a una medida del valor de los elementos en riesgo asociada a su vulnerabilidad, y depende de la probabilidad de que el elemento en riesgo se encuentre presente en el momento del evento (por ejemplo, personas dentro de un edificio o vehículos en la zona de peligro), pudiendo tomar valores entre 0 y 1. En el contexto de este trabajo, como la evaluación del riesgo se enfoca en las estructuras, elementos en riesgo que no varían en cuanto a su presencia en el lugar y tiempo a evaluar, se asume el valor de la exposición como 1. En consecuencia, la estimación del riesgo depende del producto entre vulnerabilidad y peligro (Liu et al., 2002; Lee y Jones, 2014), como se muestra en la tabla 3.1.

Para evaluar riesgo, por tanto, se requieren los datos de peligro de aluviones y de vulnerabilidad para el área de estudio escogida.

Tabla 3.1: Rangos de valores propuestos por Liu et al. (2002), asignados a las clases Muy baja, Baja, Moderada, Alta y Muy alta de peligro (P), vulnerabilidad (V) y riesgo (R)

| | P | V | $R = P \times V$ |
|-----------------|-----------|-----------|------------------|
| Muy baja | 0.00-0.20 | 0.00-0.20 | 0.00-0.04 |
| Baja | 0.20-0.40 | 0.20-0.40 | 0.04-0.16 |
| Moderada | 0.40-0.60 | 0.40-0.60 | 0.16-0.36 |
| Alta | 0.60-0.80 | 0.60-0.80 | 0.36-0.64 |
| Muy alta | 0.80-1.00 | 0.80-1.00 | 0.64-1.00 |

3.1.2. Peligro

En el caso de peligro, se cuenta con el mapa de peligro de remociones en masa generado por Falcón et al. (2014), donde se categoriza el nivel de peligro de aluviones de forma cualitativa, en peligro alto, medio y bajo (Figura 3.1).

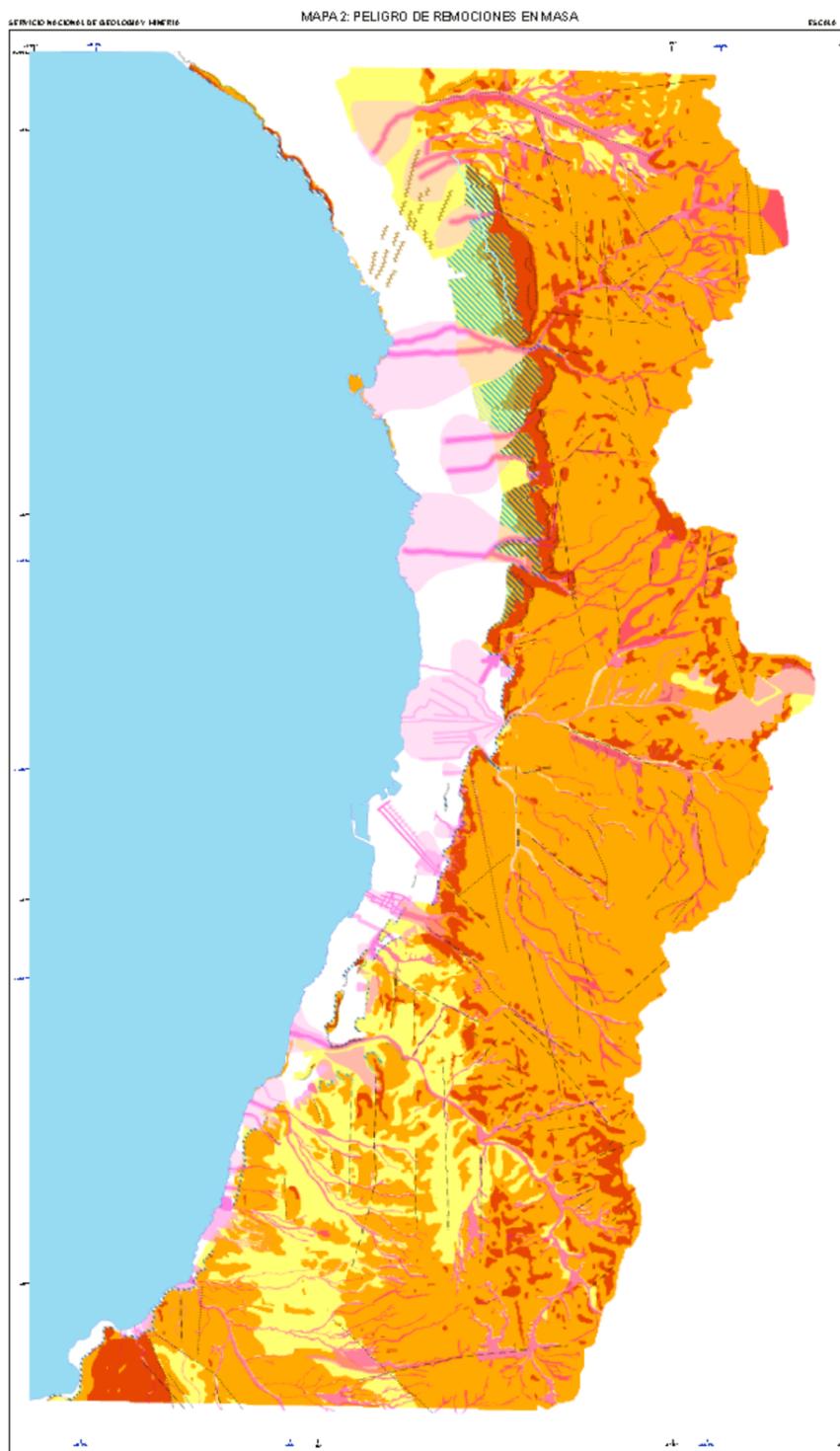


Figura 3.1: Extracto modificado del Mapa de Peligro de Remociones en Masa de Falcón et al. (2014). Áreas en rosado, de claro a oscuro, representan peligro de aluviones bajo, medio y alto respectivamente. Áreas en amarillo, anaranjado y rojo representan peligro de caída de rocas bajo, medio y alto respectivamente.

3.1.3. Vulnerabilidad

De la revisión de algunos trabajos sobre vulnerabilidad de remociones en masa y cómo evaluarlos o representarlos, varios mencionados previamente en la sección Antecedentes metodológicos, destacaron dos publicaciones: la de Li et al. (2010) titulada *Quantitative vulnerability estimation for scenario-based landslide hazards* y la de Zhang et al. (2020), *Quantification of human vulnerability to earthquake-induced landslides using Bayesian network*. Ambas engloban varios tipos de remociones, incluyendo flujos de detritos, y exponen de forma clara los métodos propuestos.

En el caso del método de Li et al. (2010), analizaron la vulnerabilidad física de estructuras y personas mediante la estimación de la intensidad de la remoción y resistencia de la edificación o persona respectivamente, requiriendo conocer la velocidad del flujo y su altura, y en el caso de las estructuras el tipo de construcción, incluyendo su altura o número de pisos, el tipo de material con que fue construida, estado de mantención y profundidad de sus fundaciones. Para estimar la resistencia de personas tomaron en cuenta su resistencia física, capacidad de evacuar frente a un evento catastrófico y posible experiencia previa asociada al tema, concluyendo que la edad sería un buen indicador de lo mencionado. Asignaron a cada parámetro un puntaje o valor, para luego aplicar la fórmula que proponen.

Zhang et al. (2020) evaluaron la vulnerabilidad de las personas utilizando redes bayesianas, considerando en su análisis factores asociados tanto a las características del evento como a la capacidad de evacuación y resistencia de las personas y estructuras, pero de forma más detallada que el anterior. Este método requiere el ingreso de parámetros similares al anterior como la velocidad, espesor del depósito y alcance de la remoción, pero también la hora a la que se produce, el tiempo que demora en afectar las zonas habitadas, distribución de la población y rango etario. A través de este método analizaron, por ejemplo, si el tiempo de alerta del evento es suficiente para evacuar a partir de la distribución de la población, la velocidad y distancia de alcance de la RM y la hora a la que ocurre, que va a incidir en qué tan preparadas se encuentran las personas. De esta forma, es un método mucho más preciso y que relaciona más variables, pero que depende de una base de datos contundente para poder calcular y asignar las probabilidades a priori de cada nodo que requiere el modelo. Para el caso de estudio de Zhang et al. (2020), se enfocaron en eventos generados a partir de terremotos, y utilizaron como base de datos 38 de las decenas de miles de remociones en masa desencadenadas en distintos países por el terremoto de Wenchuan, China.

Para determinar la factibilidad de utilizar alguno de los métodos seleccionados se debió verificar la disponibilidad de información, siendo fundamental identificar los parámetros mínimos requeridos para el desarrollo de estos. Así, a pesar de que el método de Zhang et al. (2020) es más preciso, fue descartado, porque no se cuenta con un número significativo de eventos registrados en Chile, y menos con el nivel de detalle requerido para aplicar el análisis estadístico propuesto para crear una base de datos nueva y asignar índices a los nodos desde cero. Además, como los valores publicados se refieren específicamente a eventos desencadenados a partir de terremotos, se aleja de los eventos ocurridos en Antofagasta, que fueron principalmente generados por intensas precipitaciones, no pudiendo aplicarlos directamente. Por otro lado, el método de Li et al. (2010) fue concebido para ser aplicado de forma universal, motivados por la falta de un modelo que pudiera abarcar más que un área o un tipo

de remoción específicas. Si bien a lo largo de la publicación se refirieron principalmente a los deslizamientos de tierra, destacaron que el modelo se concentra en estimar una vulnerabilidad general, haciendo énfasis en la resistencia de los elementos expuestos y utilizando parámetros más bien genéricos. En consecuencia, es un método cuantitativo que permite obtener una buena estimación de vulnerabilidad, frente a una remoción en masa de una intensidad determinada, sin necesidad de contar con un gran registro histórico de eventos.

El modelo de Li et al. (2010) corresponde a la ecuación 3.2, donde I es la intensidad del evento de remoción en masa a evaluar, R la resistencia del elemento expuesto y V la vulnerabilidad, cuyo valor varía entre 0, para los sectores o elementos poco vulnerables, y 1, para los altamente vulnerables.

El comportamiento de este modelo se representa en la figura 3.2, donde la variación del valor de la vulnerabilidad irá aumentando a medida que se incrementa la razón entre intensidad y resistencia hasta llegar a 0.5, donde esta variación comenzará a descender y la vulnerabilidad aumente cada vez más lento, hasta que la razón I/R llega a 1.0, donde la vulnerabilidad será 1.0 para valores mayores de la razón. Por otro lado, si se considera un valor fijo de resistencia, cuando este valor es bajo, la vulnerabilidad aumentará rápidamente con el incremento en la intensidad de la remoción, mientras que si la resistencia es alta, la vulnerabilidad aumentará de forma más paulatina.

$$V = f(I, R) = \begin{cases} \frac{2I^2}{R^2} & \frac{I}{R} \leq 0.5 \\ 1.0 - 2\frac{(R-I)^2}{R^2} & 0.5 < \frac{I}{R} \leq 1.0 \\ 1.0 & \frac{I}{R} > 1.0 \end{cases} \quad (3.1)$$

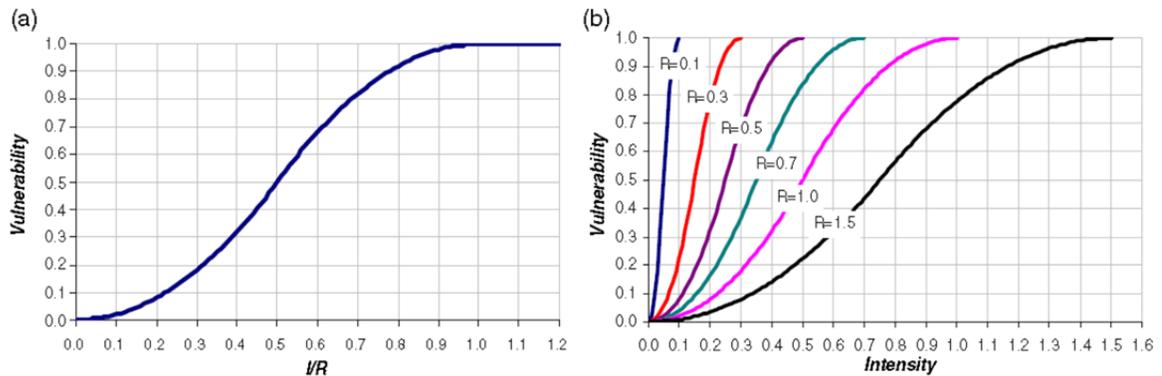


Figura 3.2: Comportamiento, según el modelo de Li et al. (2010), del valor de vulnerabilidad en función de la razón I/R (a), y en función de la intensidad de la remoción en masa si se tiene una resistencia fija (b). Extraído de Li et al. (2010)

3.2. Caracterización de la zona y eventos a evaluar

3.2.1. Zona de estudio

Para caracterizar el área de estudio, se recurrió a documentos como la Carta Geológica de Chile (área de la Región de Antofagasta) (Falcón et al., 2014) y herramientas como imágenes satelitales y Google Earth.

Para determinar los elementos expuestos se tomaron los datos del Censo 2017, que contienen información acerca de la infraestructura residencial, agrupados en manzanas censales. Estos pueden ser visualizados en el *software* ArcMap, donde cada polígono corresponde a una unidad censal (figura 3.3). Las áreas que no son abarcadas por el censo nacional de hogares (Censo 2017), fueron revisadas rigurosamente para un sector acotado del área de estudio con la ayuda de la herramienta Street view, como se ejemplifica más adelante, y se estimaron los datos en base a comparaciones con los del censo.

La infraestructura no considerada en el Censo 2017 corresponde principalmente a infraestructura no residencial, como áreas verdes, servicios comerciales, bancarios, instituciones públicas, educacionales, entre otras, que, a su vez, fueron clasificadas en infraestructura crítica e infraestructura estratégica, considerando su importancia en el funcionamiento del sector, la cantidad de personas que reúnen, y su posterior función en caso de emergencia.

Para ilustrar cómo se presenta la información y a partir de qué se estimaron los datos faltantes, se tomaron dos polígonos distintos de la zona de estudio, marcados en la figura 3.4 con una estrella amarilla y una estrella verde respectivamente. Cada uno representa una manzana censal, compuesta por un grupo de estructuras ubicadas en un terreno delimitado por calles por sus 4 lados, cuyos datos censales relevantes para el estudio se encuentran en detalle en la tabla adjunta en anexos.

En el caso de la representada por la estrella amarilla 3.4, ubicada hacia el sector oriental de la zona urbana, corresponde a una manzana con 46 viviendas, 45 de ellas ocupadas albergando un total de 154 personas. De estas viviendas, 42 son tipo casa, mientras 3 son departamentos en edificio y 1 es vivienda móvil. Se declaró que en 7 de ellas el material principal de sus paredes exteriores es hormigón, en 20 viviendas es albañilería, 8 son de tabique forrado, y 10 de tabique sin forro. Se tiene entonces que en esta manzana la moda es la infraestructura tipo casa, con paredes exteriores de albañilería. Algunas de sus estructuras, principalmente las con vista hacia la calle, pudieron ser examinadas mediante la herramienta Street view, y son las que se muestran en la figura 3.5, donde se observa que son principalmente estructuras de uno a dos pisos, con excepciones de tres niveles, destacando algunas por sus paredes exteriores de ladrillo a la vista o madera y/o tabique. En el caso de la mayoría de las viviendas no se puede distinguir a simple vista el tipo de material, pero se sabe, por los datos del censo, que la mayoría es de albañilería.

En el caso de la representada por la estrella verde 3.4, ubicada en el sector centro del casco urbano, corresponde a una manzana con 94 viviendas, 84 de ellas ocupadas, albergando a 256 personas en total. De estas viviendas, 31 son tipo casa y 63 son departamentos en edificios. Se declaró que en 54 de ellas el material principal de sus paredes exteriores es hormigón, en 29 viviendas es albañilería, y en una es tabique forrado. Se tiene entonces que en esta manzana la moda es la infraestructura tipo departamento en edificio, con paredes exteriores de hormigón. De las imágenes obtenidas por medio de Street view presentadas en la figura

3.6, se observa la presencia de varios edificios de más de 5 niveles y viviendas de 2 pisos. El aspecto es de una buena mantención y de estructura sólida, que es consecuente con los datos del censo.

En este último caso, destacan un par de estructuras de 1 o 2 niveles de uso comercial. Estas no son consideradas por el Censo, pero al estar dentro de la manzana censal, tampoco son consideradas como infraestructura especial, pues esta se identificó solo para los espacios sin información.

Repitiendo el ejercicio de observación anterior, se puede ir relacionando el tipo de material principal con el aspecto o tipo de construcción, lo que ayuda para estimar la información requerida para crear la base de dato para la infraestructura especial.

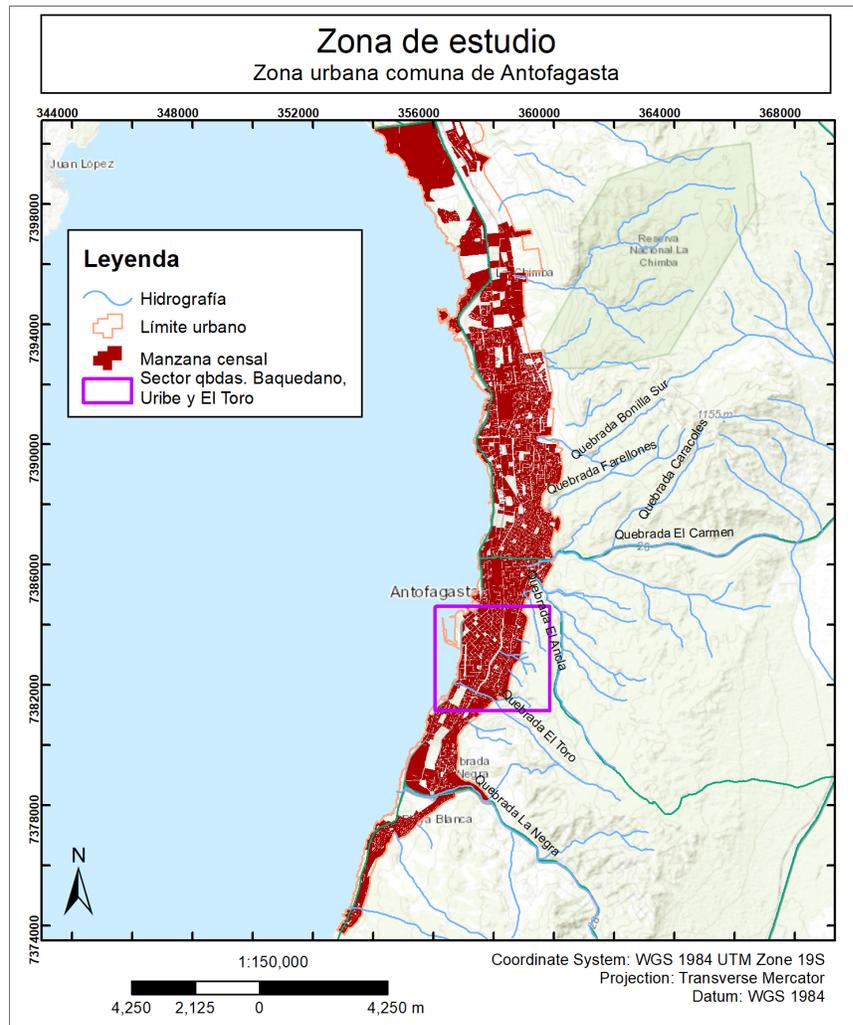


Figura 3.3: Zona de estudio. Delimitada por la línea naranja la zona urbana de Antofagasta, que corresponde a la primera zona de estudio, en marrón se muestran los polígonos que corresponden a manzanas censales, determinadas por el Censo 2017, y el recuadro morado indica la segunda zona de estudio, el sector de las quebradas Baquedano, Uribe y El Toro.



Figura 3.4: Sector de la zona de estudio. En rojo se presentan los polígonos que representan las manzanas censales, de los cuales se escogieron dos, indicados mediante una estrella amarilla y una verde respectivamente, para ejemplificar cómo se presenta la información que se tiene del Censo 2017 y a partir de qué se estimaron los datos de la infraestructura especial.



Figura 3.5: Imágenes de la infraestructura ubicada en la manzana censal representada por la estrella amarilla. Corresponden, por fila de arriba hacia abajo, a las cuadradas SE, SW, NW y NE respectivamente. (Imágenes obtenidas desde Street view, con fecha de noviembre 2015.)



Figura 3.6: Imágenes de la infraestructura ubicada en la manzana censal representada por la estrella verde. Corresponden, por fila de arriba hacia abajo, a las cuadras E, S, W y N respectivamente. (Imágenes obtenidas desde Street view, con fecha de noviembre 2015.)

3.2.2. Aluviones

En cuanto a los eventos que han afectado al sector, al ser un área urbana y haber sufrido consecuencias tanto humanas como económicas, se han realizado numerosas investigaciones y se han tomado diversas medidas de mitigación, pudiendo encontrarse información disponible en distintos formatos, especialmente acerca de los aluviones ocurridos el 18 y 19 de junio de 1991 por ser los más catastróficos. Esta caracterización se basó en artículos de prensa, reportes de ingeniería, boletines publicados por el SERNAGEOMIN, y publicaciones de estudios geofísicos y geológicos (la mayoría mencionados ya en el capítulo anterior) que abarcan desde los fenómenos climáticos que desencadenaron los flujos, hasta el alcance, velocidad y descripción de los depósitos del material removido y los daños que causaron.

En consecuencia, y de acuerdo con los parámetros requeridos por los métodos seleccionados para realizar la evaluación de vulnerabilidad y riesgo, las características de los aluviones que afectan Antofagasta se sintetizaron principalmente a partir de investigaciones que analizaron los eventos del 18 y 19 de junio de 1991, y los datos específicos de velocidad y altura de flujos con que se evaluó vulnerabilidad en la zona de estudio fueron extraídos del modelo de flujos realizado en el sector por Espinoza (2017) para un período de retorno de 50 años (figura 3.7). Debido a la limitación del área de este último trabajo, que fue aplicado al sector de las quebradas Uribe, Baquedano y el Toro, se consideraron 2 zonas a evaluar, la zona urbana completa de Antofagasta en el caso de la vulnerabilidad de estructuras, y el sector acotado según Espinoza (2017) en el caso del riesgo (figura 3.3).

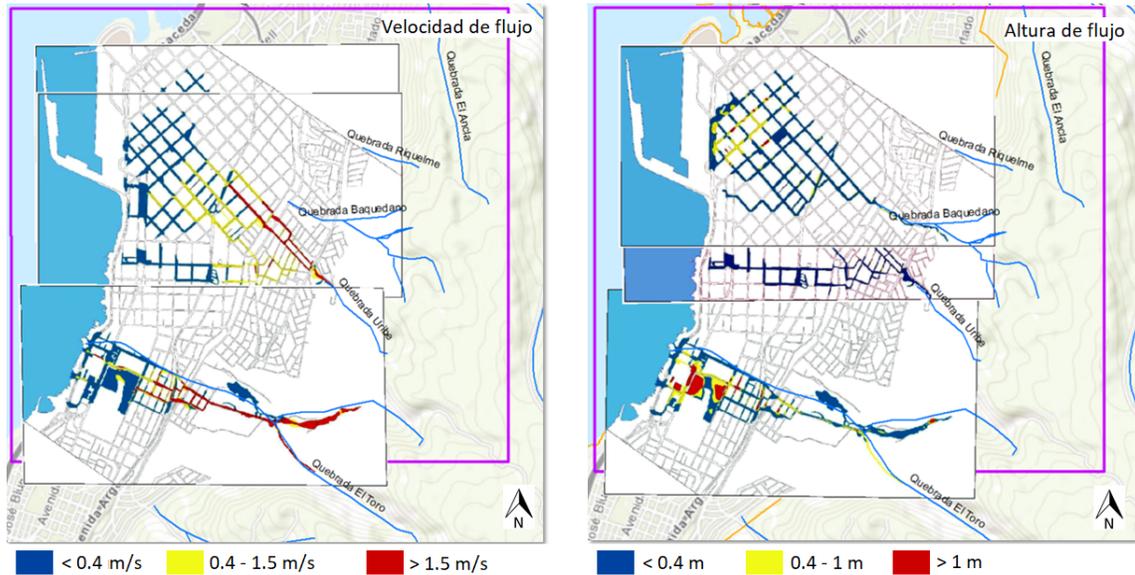


Figura 3.7: Modelo de flujos de Espinoza (2017) para el sector de las quebradas Baquedano, Uribe y El Toro, donde en la figura de la izquierda se representan los rangos de velocidad de flujos y a la derecha los rangos de altura estimados (Modificado de Espinoza, 2017).

3.3. Aplicación

3.3.1. Riesgo

Se evaluó el riesgo cruzando la información del mapa de peligro de aluviones con el mapa de vulnerabilidad, multiplicando los valores que corresponden a cada unidad expuesta (manzanas censales e infraestructura especial), obteniendo un resultado entre 0 y 1, y clasificándolos en alto, medio y bajo riesgo de acuerdo con la tabla 3.2, elaborada a partir del modelo propuesto por Liu et al. (2002) (tabla 3.1).

Tabla 3.2: Rangos de valores propuestos asignados a las categorías Baja, Media y Alta de peligro (P), vulnerabilidad (V) y riesgo (R), basados en Liu et al. (2002).

| | P | V | $R = P \times V$ |
|--------------|-----------|-----------|------------------|
| Baja | 0.00-0.30 | 0.00-0.30 | 0.00-0.09 |
| Media | 0.30-0.60 | 0.30-0.60 | 0.09-0.36 |
| Alta | 0.60-1.00 | 0.60-1.00 | 0.36-1.00 |

3.3.2. Peligro

Para poder evaluar riesgo, se debió asignar valores cuantitativos entre 0 y 1 a las categorías disponibles de peligro de aluviones. Esto se hizo en base al modelo propuesto por Liu et al. (2002), donde se estableció un rango entre 0 y 0.3 a peligro bajo, entre 0.3 y 0.6 a peligro medio y 0.6 y 1 a peligro alto.

Esta información fue ingresada al *software* ArcMap, donde al intersectar los polígonos de peligro con los de la infraestructura, queda establecido a qué área corresponden.

3.3.3. Vulnerabilidad

Para realizar las evaluaciones de vulnerabilidad y de riesgo se utilizaron los *softwares*, ArcMap y Excel. En el primero se visualizó el área de estudio con sus límites geográficos y políticos, hidrografía, curvas de nivel y elementos expuestos, que fueron identificados y categorizados con la ayuda de Google Maps, gracias a la herramienta Street View, que cuenta con imágenes de noviembre del 2015. Esta herramienta resultó ser de gran ayuda, debido a la dificultad para recoger datos en terreno, dado el contexto nacional con respecto a la pandemia que se vivió durante el desarrollo de este trabajo. En el segundo programa se ingresaron los datos recogidos del Censo 2017 y los complementarios para la zona urbana de la comuna de Antofagasta (IDE, 2018), y es el programa donde se realizaron los cálculos. Estos datos se encuentran agrupados en distintas unidades censales, como distrito censal, área urbana/rural o localidad, siendo la más pequeña y la que se utilizó para efectos de estudio, la manzana, que agrupa las viviendas ubicadas en el área abarcada por una cuadra por lado (INE, 2018a).

Los elementos expuestos fueron categorizados en manzanas de la zona urbana e infraestructura especial. Las primeras corresponden a las manzana censales (INE, 2018a), e incluyen solo estructuras habitacionales, donde también se agregan grupos de campamentos o tomas (IDE, 2016; Un Techo para Chile, 2020). La segunda es a su vez clasificada en infraestructura estratégica y crítica, la primera abarcando instituciones gubernamentales y servicios básicos, mientras que la segunda se refiere a lugares de gran relevancia a las que se recurre en situaciones de catástrofe o que concentran aglomeraciones importantes de personas, como hospitales, albergues y escuelas. Como los datos del Censo 2017 (INE, 2017) no abarcan la infraestructura especial, la información necesaria para evaluar su vulnerabilidad fue obtenida mediante la utilización de la herramienta Street View, e ingresada de forma manual en ArcMap.

En total, se consideraron 111784 estructuras que corresponden a viviendas distribuidas en toda la zona urbana de la comuna de Antofagasta, agrupando en ellas a 105687 hogares, conformados por 354104 personas (INE, 2017). Por otro lado, se evaluaron 58 estructuras consideradas especiales, que corresponden a las contabilizadas por encontrarse fuera de las manzanas censales y solo para el sector de las quebradas Uribe, Baquedano y El Toro.

Para evaluar vulnerabilidad de estructuras y personas frente a una remoción en masa de magnitud definida, Li et al. (2010) proponen un modelo cuantitativo determinístico basado en la resistencia de los elementos expuestos a la amenaza (R) y en la intensidad del evento (I), que busca abarcar, tomando ciertas consideraciones a o largo del cálculo, los distintos tipos de remociones según se requiera, asignando un índice adimensional con valores entre 0, para los sectores o elementos poco vulnerables, y 1, para los altamente vulnerables (ecuación 3.2).

$$V = f(I, R) = \begin{cases} 2 \frac{I^2}{R^2} & \frac{I}{R} \leq 0.5 \\ 1.0 - 2 \frac{(R-I)^2}{R^2} & 0.5 < \frac{I}{R} \leq 1.0 \\ 1.0 & \frac{I}{R} > 1.0 \end{cases} \quad (3.2)$$

La intensidad de remoción puede ser expresada en términos de energía de impacto, velocidad promedio y/o profundidad de zonas potencialmente erodables de suelos, mientras que la resistencia es definida como la capacidad de los elementos expuestos de enfrentar la acción de una remoción de un cierto grado o magnitud.

Como se menciona anteriormente, este método considera, a lo largo de su desarrollo, elementos de tipo estacionario (estructuras: edificaciones, residencias) y no-estacionario (personas, vehículos) (Li et al., 2010) y a su vez intenta abarcar distintos tipos de remociones en masa, debiendo seguir el modelo que corresponda a cada caso (diagramas en figuras 3.8 y 3.9).

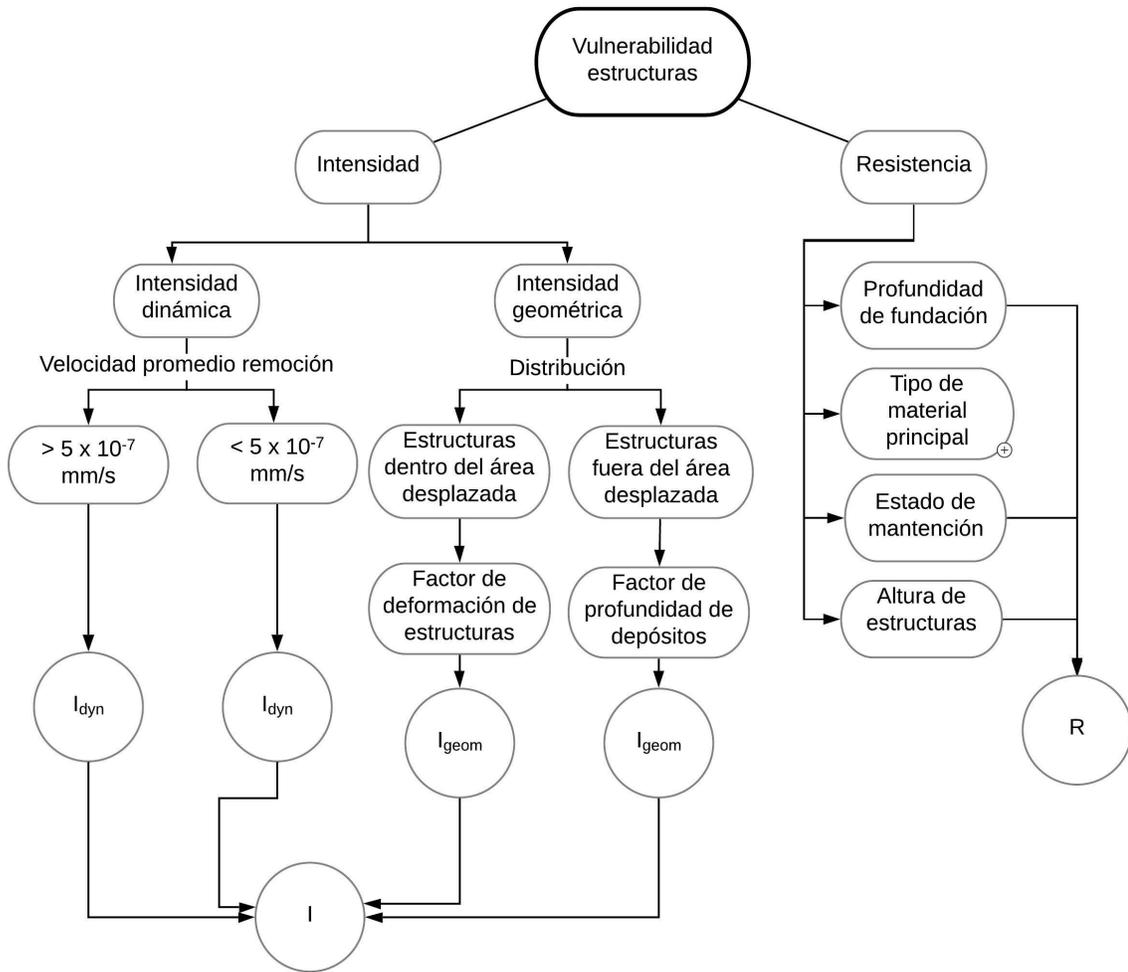


Figura 3.8: Diagrama de desarrollo de la evaluación de vulnerabilidad de estructuras frente a remociones en masa basado en modelo de Li et al. (2010)

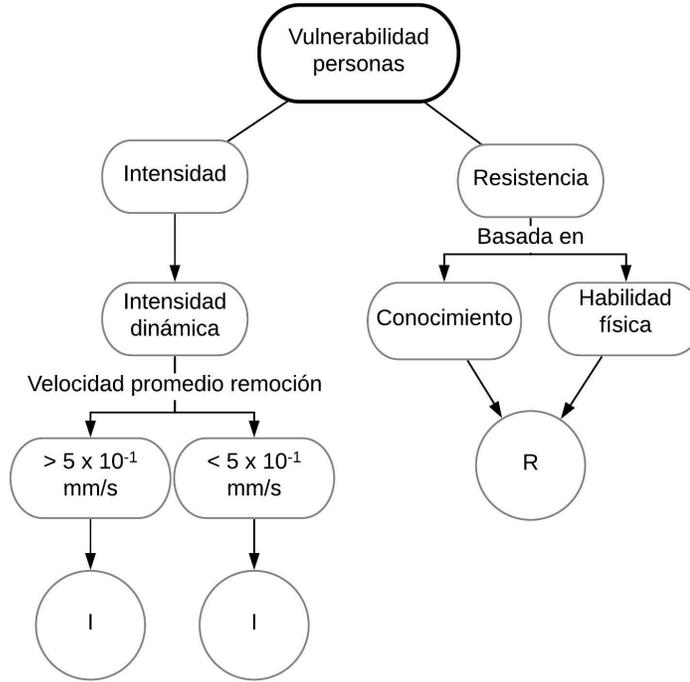


Figura 3.9: Diagrama de desarrollo de la evaluación de vulnerabilidad de personas frente a remociones en masa basado en modelo de Li et al. (2010)

Para calcular I se distingue intensidad dinámica (I_{dyn}) de intensidad geométrica (I_{geom}). La primera depende de la velocidad de la remoción en masa que, para estructuras, se asume 0 para velocidades menores a 5×10^{-7} mm/s por su casi nula capacidad destructiva, mientras que para personas este límite es de 5×10^{-1} mm/s (Cruden y Varnes, 1996; Li et al., 2010). En el caso de flujos de detritos, que corresponden a RM rápidas, superan con creces esa velocidad, por lo que I_{dyn} se calcula, para estructuras y personas respectivamente, mediante las ecuaciones en 3.3.

$$I_{dyn} = \begin{cases} \frac{1}{36}(\log_{10} C + 6.30)^2 & \text{para estructuras} \\ \frac{1}{16}(\log_{10} C + 0.30)^2 & \text{para personas} \end{cases} \quad (3.3)$$

donde C es la velocidad en mm/s de la remoción.

Por otro lado, el cálculo de I_{geom} depende de si las estructuras a evaluar se encuentran sobre el área que se desplaza (en el caso de deslizamientos o reptaciones de tierra o barro por ejemplo), o fuera de esta. En el primer caso se calcula un factor de deformación considerando la profundidad de la masa hasta la fractura y la profundidad de las fundaciones de las edificaciones, mientras que en el segundo, el factor corresponde al 10 % del espesor del depósito de la remoción (o altura del flujo) (ecuación 3.4).

$$I_{geom} = \begin{cases} \frac{D_s}{D_{s,t}} & \text{si se encuentra dentro del \u00e1rea desplazada} \\ 0.1 \times D_{dpt} & \text{si se encuentra fuera del \u00e1rea desplazada} \end{cases} \quad (3.4)$$

donde D_s corresponde al \u00edndice de desplazamiento de la fundaci\u00f3n de la estructura, $D_{s,t}$ es el valor (en metros) l\u00edmite de este \u00edndice sobre el cual se espera un grave da\u00f1o estructural o p\u00e9rdida de funcionalidad (calculado a partir de modelos te\u00f3ricos u obtenido a partir de literatura), y D_{dpt} es el espesor o profundidad de los detritos depositados en metros. Para efectos de este estudio, se utiliz\u00f3 la segunda expresi\u00f3n, puesto que la zona urbana se encuentra en un sector de paso y depositaci\u00f3n de los flujos, no de remoci\u00f3n, considerando las estructuras m\u00f3viles como con una profundidad de fundaci\u00f3n de 0 m.

La resistencia de las estructuras se mide a partir de 4 factores, a los cuales se les asignan valores de acuerdo con la profundidad de las fundaciones de las estructuras (R_{fd}), el tipo de material de construcci\u00f3n (R_{ty}), la \u00e9poca en que se construyeron o el estado de mantenci\u00f3n de las edificaciones (R_{mn}) y su altura o n\u00famero de niveles construidos (R_h) (3.8). Estos \u00edndices son propuestos dentro del mismo m\u00e9todo de manera subjetiva, manteni\u00e9ndose en este trabajo sus valores y homologando o adaptando las categor\u00edas planteadas de acuerdo con la informaci\u00f3n disponible, como se explica a continuaci\u00f3n.

El factor de resistencia asociado a la fundaci\u00f3n de las estructuras, R_{fd} , se calcul\u00f3 a partir de la ecuaci\u00f3n 3.5, donde D_{fd} corresponde a la profundidad de la fundaci\u00f3n, que para este trabajo fue estimada considerando que, seg\u00fan el Art\u00edculo 5.7.5 (2001) de la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones (OGUC), la profundidad m\u00ednima de los cimientos de hormig\u00f3n o de alba\u00f1iler\u00eda es de 0.60 m. Se les asign\u00f3 un valor fijo a los distintos tipos de vivienda, expresados en la tabla 3.5.

$$R_{fd} = \left(\frac{D_{fd}}{10} \right)^{\frac{1}{3}} + 0.05 \quad (3.5)$$

Las categor\u00edas para el factor R_{ty} se homologaron de forma directa con las del Censo 2017 (INE, 2017) correspondientes al tipo de material de las paredes exteriores. Por otro lado, en el caso del factor R_{mn} , al no poder comprobarse el estado de mantenci\u00f3n de cada una de las estructuras, se compar\u00f3 y asoci\u00f3 a si la materialidad es aceptable, recuperable o irreparable, tambi\u00e9n datos obtenidos del Censo 2017 (INE, 2017), tomando en cuenta que una vivienda se considera de materialidad aceptable si sus paredes exteriores son de tabique forrado por ambas caras o m\u00e1s firmes, la cubierta del techo es de planchas met\u00e1licas (de cinc, cobre o fibrocemento) o m\u00e1s firmes y el piso posee m\u00ednimo un cubrepiso sobre radier o vigas de madera; y se considera irreparable si las paredes exteriores y la cubierta del techo son de materiales precarios (lata, cart\u00f3n, pl\u00e1stico, etc.) o inexistentes, y el piso es de tierra (INE, 2018a). De esta forma, las categor\u00edas quedan como se expresa en las tablas 3.3 y 3.4 respectivamente.

En el caso del factor R_h , relacionado con la altura mediante el n\u00famero de pisos que tiene la edificaci\u00f3n, se tom\u00f3 en cuenta la categor\u00eda correspondiente al tipo de vivienda del Censo 2017 (INE, 2017), donde se consider\u00f3 que las viviendas de tipo m\u00f3vil, mediagua, pieza, ind\u00edgena, entre otras, tienen 1 solo nivel, las viviendas tipo casa son estructuras bajas a medianas (de 1

hasta 4 pisos) y las viviendas tipo departamento en edificio corresponden a estructuras altas (5 pisos o más), como se muestra en la tabla 3.5.

Cabe destacar que no se realiza el cálculo para cada vivienda, sino para una manzana censal, donde se agrupan varias estructuras. En consecuencia, se toma la moda de cada parámetro y se redefine cada unidad censal como una estructura representativa de los datos que contiene.

Tabla 3.3: Valores propuestos para tipos de materiales de construcción (modificado de Li et al., 2010), R_{ty} , considerando material de paredes externas según Censo 2017 (INE, 2017).

| Muros exteriores | R_{ty} |
|---|----------|
| Materiales precarios (lata, cartón, plástico, etc.) | 0.10 |
| Adobe, barro, quincha, pirca u otro artesanal tradicional | 0.20 |
| Tabique sin forro interior (madera u otro) | 0.40 |
| Tabique forrado por ambas caras (madera o acero) | 0.80 |
| Albañilería: bloque de cemento, piedra o ladrillo | 1.30 |
| Hormigón armado | 1.50 |

Tabla 3.4: Valores propuestos para el estado de mantención de los materiales (modificado de Li et al., 2010), R_{mn} , considerando tipo de materialidad según Censo 2017 (INE, 2017).

| Estado de mantención | R_{mn} |
|-----------------------------|----------|
| Materialidad irrecuperable | 0.1 |
| Materialidad recuperable | 0.8 |
| Materialidad aceptable | 1.2 |

Tabla 3.5: Valores propuestos para el índice que depende de la altura de la estructura, R_h , y para la profundidad de fundación, D_{fd} , (en m) (modificado de Li et al., 2010), considerando el tipo de vivienda según Censo 2017 (INE, 2017).

| Tipo de vivienda | Niveles | R_h | D_{fd} [m] |
|---|----------------|-------|--------------|
| Vivienda tipo móvil, mediagua, pieza, indígena, otros | 1 | 0.1 | 0.0 |
| Vivienda tipo casa | 1 - 4 | 0.9 | 0.8 |
| Vivienda departamento en edificio | < 5 | 1.5 | 6.0 |

Para evaluar la resistencia de las personas se consideran 2 factores, valorados de acuerdo con el grado de conocimiento o consciencia con respecto a la amenaza (R_{kng}) y su habilidad o estado físico, deducido a partir de un rango etario (R_{phy})(3.9). En el desarrollo de este trabajo se tuvo que descartar la evaluación de vulnerabilidad de las personas, debido a que no fue posible correlacionar las categorías correspondientes a los rangos de edad, siendo muy amplios los obtenidos del Censo 2017 (INE, 2017).

De esta forma, una vez asignados los índices R_{fd} , R_{ty} , R_{mn} y R_h para un elemento expuesto, su resistencia se obtiene mediante la ecuación 3.6.

$$R = \begin{cases} (R_{fd} \times R_{ty} \times R_{mn} \times R_h)^{\frac{1}{4}} & \text{para estructuras} \\ (R_{phy} \times R_{kng})^{\frac{1}{2}} & \text{para personas (que se descarta)} \end{cases} \quad (3.6)$$

Como los datos que se tienen no son por estructura, sino por agrupación de estructuras dentro de una manzana, el método anterior se aplicó considerando la moda de cada categoría para cada unidad.

Ya con I y R calculados, y dependiendo del resultado, se utilizaron las ecuaciones de vulnerabilidad presentadas previamente (ecuación 3.2), asignando así un valor de vulnerabilidad entre 0 y 1 a cada manzana, pudiendo generar un mapa al clasificarlas de acuerdo con los índices presentados en la tabla 3.2. Se tomó esta categorización considerando que el SERNAGEOMIN utiliza 3 niveles en sus mapas de peligro (Falcón et al., 2014), bajo, medio y alto, y que en la literatura propuestos en base a las categorizaciones de Liu et al. (2002) y Lee y Jones (2014).

Como el concepto de vulnerabilidad corresponde al potencial impacto sobre los elementos expuestos y no se encuentra ligado a un evento o lugar en particular, sino a posibles eventos, se evalúa primero aplicando valores hipotéticos a lo largo de toda la zona urbana de la comuna de Antofagasta, utilizando valores de velocidad y altura del flujo que se mantienen constantes en todo el sector, es decir, simulando que la totalidad del área es afectada de la misma forma. Para esto se tomaron las manzanas censales (INE, 2017) como elementos expuestos y se escogieron valores críticos basados en eventos ocurridos anteriormente en la región, expresando el resultado en mapas con distintas combinaciones, es decir, con velocidad y altura de flujo altas, velocidad y altura del flujo bajas, y combinaciones de estas.

Para obtener resultados más dinámicos, y como el objetivo era realizar también una evaluación de riesgo, se acotó la zona de estudio en base a la información disponible con respecto al comportamiento del flujo, seleccionando el sector de las quebradas Baquedano, Uribe y El Toro, que cuenta con un modelo de flujos realizado por Espinoza (2017). Se ampliaron sus datos al área que abarca el mapa de peligro del SERNAGEOMIN (Falcón et al., 2014), dividiendo así las manzanas y estructuras seleccionadas en áreas con distintos valores de velocidad y altura de flujo, obteniendo un nuevo resultado de vulnerabilidad.

Capítulo 4

Resultados

4.1. Caracterización del lugar y eventos a evaluar

Se evaluó la vulnerabilidad frente a aluviones en dos escalas distintas: primero se aplicó sobre toda la zona urbana de la comuna de Antofagasta (figura 4.1, tomando en cuenta solo las manzanas censales (INE, 2017) como elementos expuestos, y luego se acotó esta zona de estudio en relación al nivel de información disponible, específicamente a la información concerniente al comportamiento de los aluviones en el sector urbano, que correspondería al área urbana que se vería afectada por flujos o aluviones que descenderían desde las quebradas Uribe, Baquedano y El Toro, abarcando unos 13 km^2 , provenientes de hoyas hidrográficas de 0.7 , 0.9 y 4.9 km^2 respectivamente, siendo las dos primeras las de menor tamaño en la comuna (figura 4.2).

Los flujos generados en las quebradas mencionadas se originarían en alturas de unos 300 m s.n.m., acarreado el material disponible en el lecho del canal mientras desciende desde occidente a oriente con pendientes de hasta casi 40° en el caso de la quebrada Baquedano y 25° en las quebradas Uribe y El Toro, desembocando directamente en sectores urbanos emplazados sobre depósitos aluviales cuaternarios a 140 m s.n.m. aproximadamente, donde se encuentran con pendientes de unos 20° . Desde allí continúan su recorrido con dirección al mar a través del centro del casco urbano. Desde la desembocadura de las quebradas hasta la línea de costa la distancia es de 1.8 a 2 km, con pendientes de 5° a 10° .

Los caudales detríticos de salida en el *peak* del evento de 1991, según lo presentado por la Dirección General de Aguas (DGA) (Ayala y Vidal, 1993), fueron de alrededor de $8 \text{ m}^3/\text{s}$ para la quebrada Baquedano, entre 5 y $7 \text{ m}^3/\text{s}$ para la quebrada Uribe y entre 10 y $15 \text{ m}^3/\text{s}$ para El Toro, valores que fueron tomados en cuenta para definir el rango de mayor velocidad para el cálculo de la intensidad del flujo a evaluar. Esto, sumado al modelo de flujos de Espinoza (2017), permitió asignar o dividir las zonas de peligro (Falcón et al., 2014) en 4 rangos de velocidades: menor a 100 mm/s , de 100 a 400 mm/s , 400 a 1500 mm/s y 1500 a 6000 mm/s (ver figura 4.3).

De la misma forma, con respecto a las alturas de los flujos, se utilizó el modelo de Espinoza (2017) para dividir las zonas de peligro (Falcón et al., 2014) en los rangos de menos de 0.4 m, de 0.4 a 1 m y de 1 a 3 m (figura 4.3).

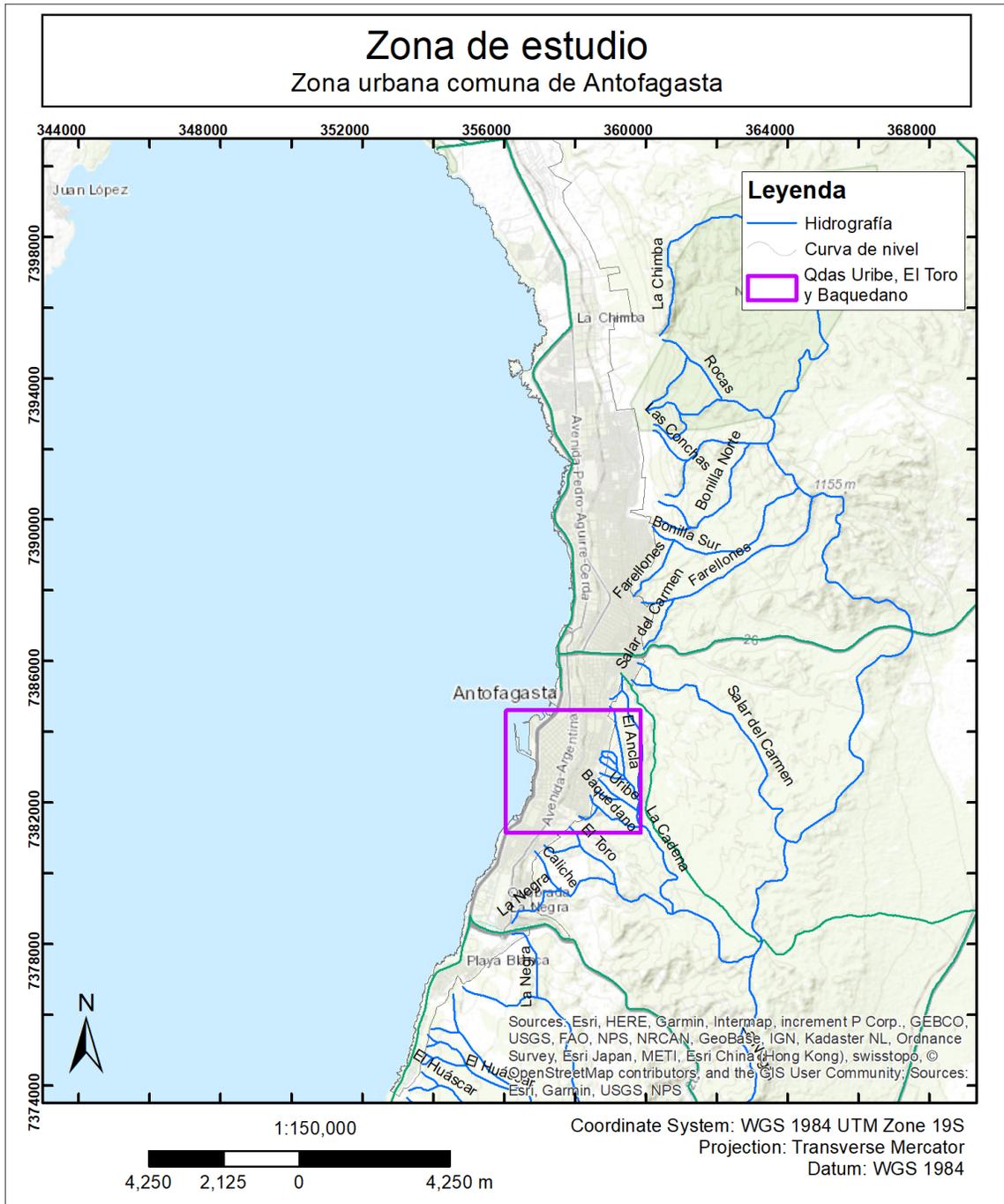


Figura 4.1: Zona de estudio que abarca todo el sector urbano de la comuna de Antofagasta.

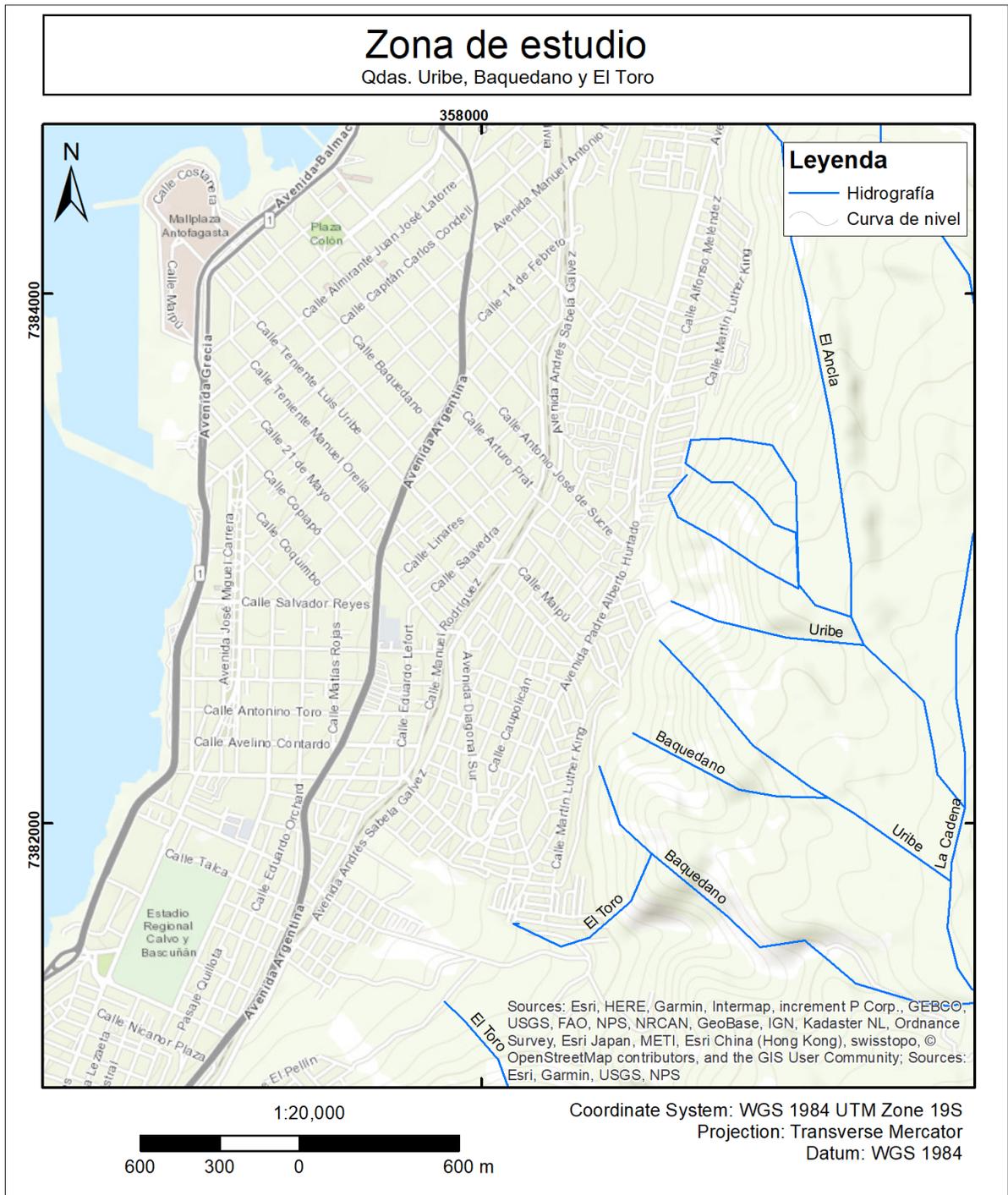


Figura 4.2: Zona de estudio en el sector de las quebradas Baquedano, Uribe y El Toro.

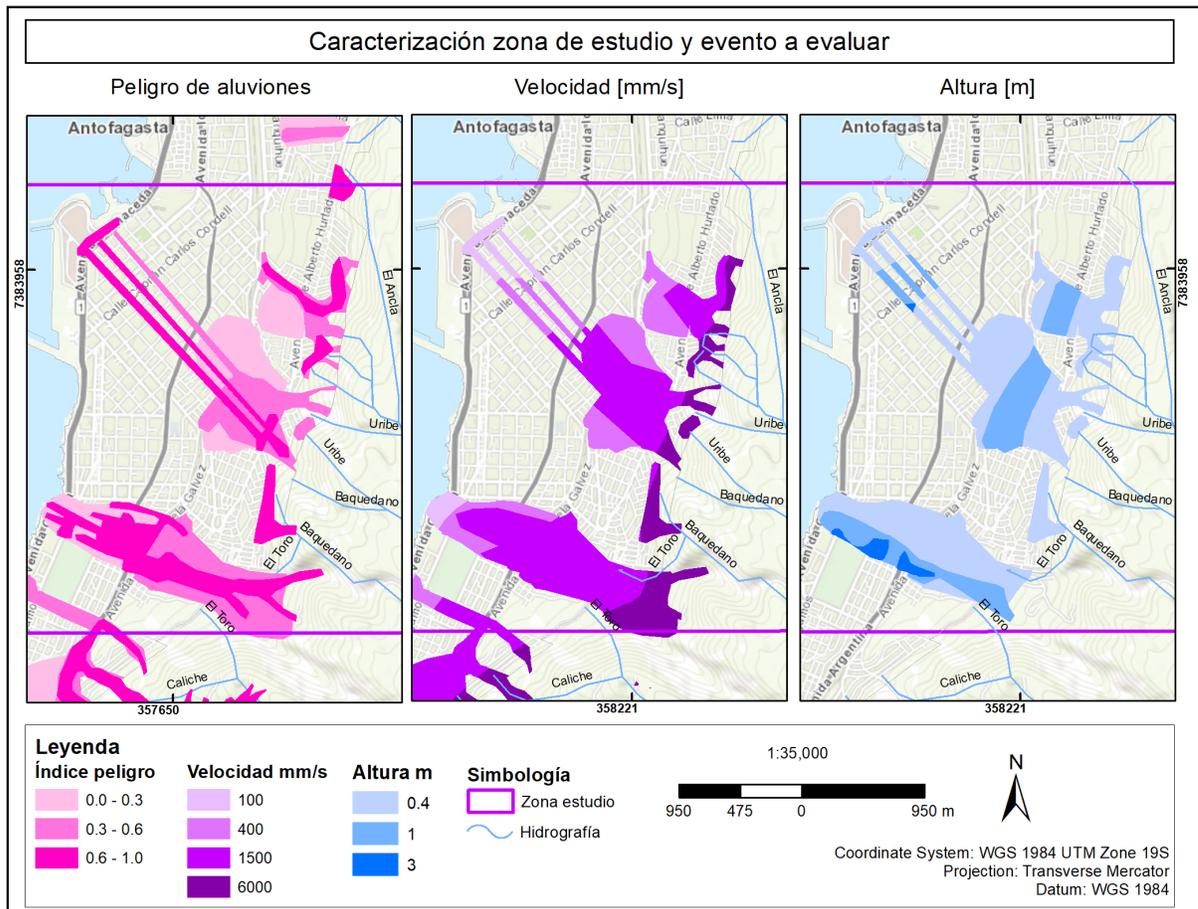


Figura 4.3: Mapas utilizados para la evaluación de vulnerabilidad y riesgo, representando peligro de aluviones basado en Falcón et al. (2014) y velocidad y altura de flujo basado en Espinoza (2017).

4.2. Elementos expuestos

Para la primera evaluación de vulnerabilidad se consideraron solo las manzanas censales (INE, 2017), es decir, solo estructuras habitacionales, como elementos expuestos, abarcando toda la zona urbana de la comuna. Los datos de viviendas y hogares recogidos del Censo 2017 (INE, 2017) fueron complementados con la información obtenida durante el desarrollo de este trabajo de forma remota, añadiendo así a los polígonos de manzanas censales, polígonos de infraestructura especial, es decir, infraestructura que no corresponde a viviendas y que son importantes para el funcionamiento de la comuna o que congregan un gran número de personas. El primer tipo corresponde a la infraestructura estratégica, como bancos, estaciones de bomberos, recintos municipales, registro civil, entre otros, y el segundo tipo es la infraestructura crítica, abarcando colegios, universidades, centros comerciales grandes y centros de salud y hospitalarios.

Con la información integrada se generó un mapa de elementos que se encuentran potencialmente expuestos a los efectos de cualquier tipo de evento, en este caso de aluviones, que se muestra en la figura 4.4. Estos son los elementos o estructuras que se consideraron al realizar

las evaluaciones de vulnerabilidad y riesgo.

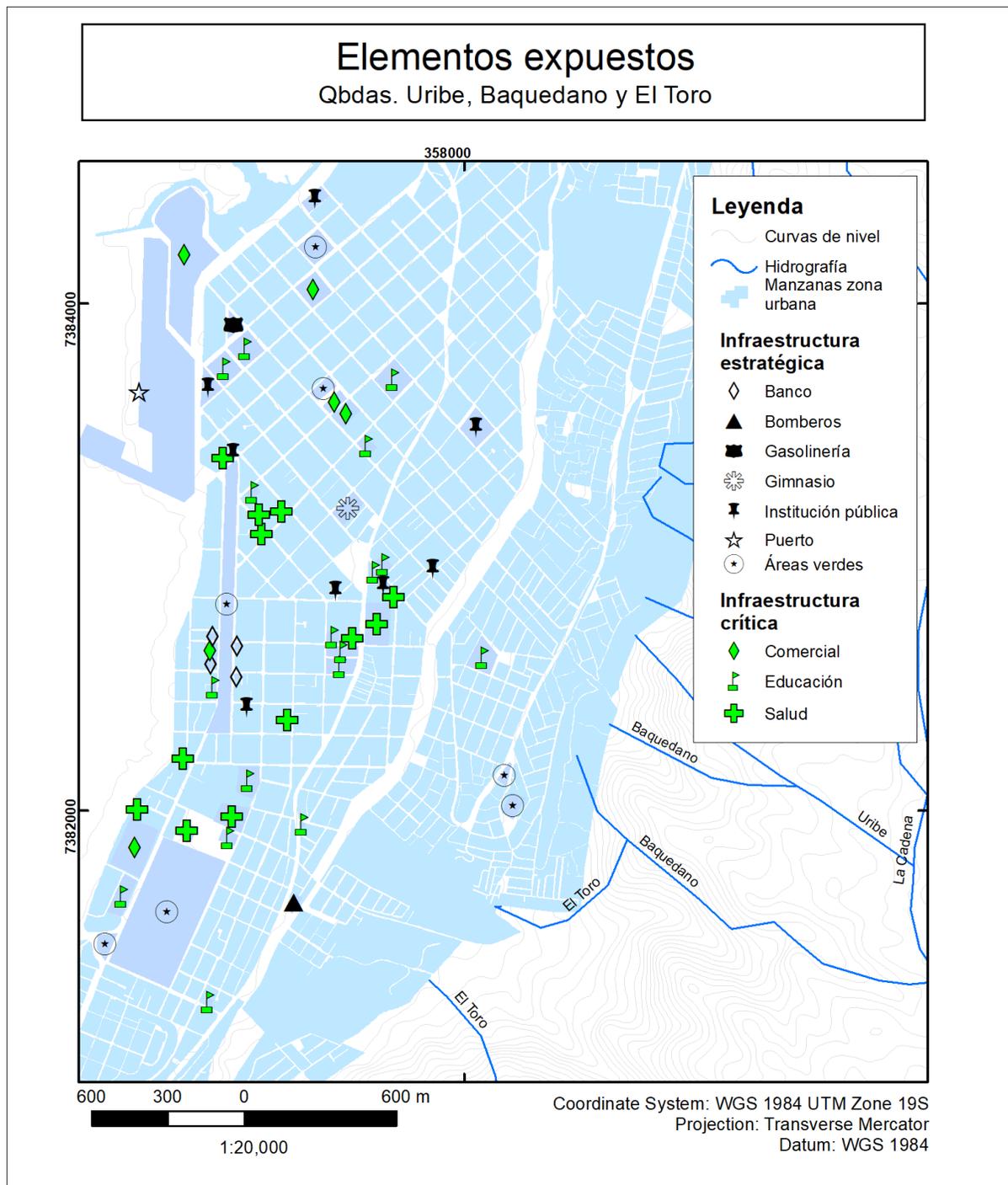


Figura 4.4: Mapa de elementos expuestos en el sector de las quebradas Uribe, Baquedano y El Toro, con información extraída de Censo 2017 (INE, 2017).

4.3. Vulnerabilidad en la zona urbana de la comuna de Antofagasta

Se evaluó vulnerabilidad de estructuras para toda la zona urbana de la comuna de Antofagasta, frente a distintas magnitudes de eventos hipotéticos, y expresando los resultados en tres figuras.

En cada figura, 4.5, 4.6 y 4.7, se representó la vulnerabilidad de las estructuras para una velocidad fija, u , de 0.4, 1.5 y 10 m/s respectivamente, variando la altura del flujo, h , en cada imagen, con 0.4, 1 y 3 m en orden ascendente de derecha a izquierda.

En la figura 4.5, con una velocidad de 0.4 m/s, se observa en la evaluación para un flujo de altura de 0.4 m que casi la totalidad de las estructuras tienen un índice bajo de vulnerabilidad, con excepción de algunas en el borde oriental de la zona urbana y al norte, hacia la costa, donde destacan algunas incluso con índices de vulnerabilidad altos. Para flujos de 1 m de altura aumenta de forma considerable la cantidad de estructuras con índices medios y altos, con una distribución norte-sur marcada a lo largo del límite con la Cordillera de la Costa, y dispersándose las zonas rojas hacia el centro, para desaparecer y tornarse casi totalmente verde en la costa, a excepción de la zona norte, cuyos índices pasaron de media a alta vulnerabilidad. Al aumentar la altura a 3 m, prácticamente toda la zona urbana se tiñe de color rojo, es decir, se torna altamente vulnerable, salvo algunos puntos en la zona norte y al occidente en el sector de las quebradas Uribe, Baquedano y El Toro (cuadro morado) y al sur de este.

En las figuras 4.6 y 4.7 el comportamiento es el mismo al variar las alturas del flujo, destacando que con una velocidad de 10 m/s con un flujo de 1 m de altura casi todas las estructuras son medianamente vulnerables, mientras que con una altura de 3 m la comuna se torna por completo en altamente vulnerable.

Por último, si se comparan las 3 figuras (4.5, 4.6 y 4.7), se puede observar que la diferencia en los índices es mucho más significativa al modificar los valores de altura del flujo que los valores de velocidad. Es decir, si se examinan los casos para una misma altura, por ejemplo 1 m, el resultado para el flujo con velocidad 0.4 m/s es levemente diferente al mapa con velocidad 1.5 m/s, y solo se aleja más el resultado al aumentar la velocidad a 10 m/s. Mientras tanto, al variar la altura, los índices cambian de manera notoria. Asimismo, destaca a su vez que, con una altura fija de 0.4 m, el resultado es prácticamente el mismo para las distintas velocidades consideradas, y se podría decir lo mismo para los resultados con 3 m.

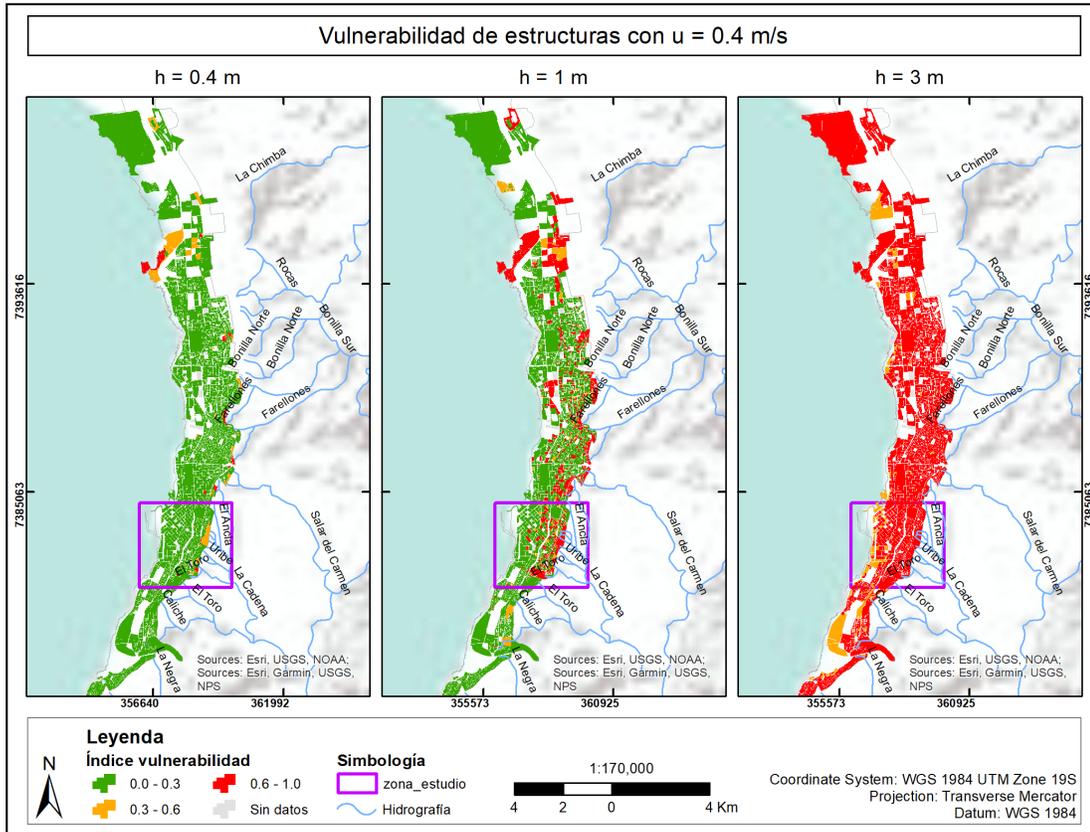


Figura 4.5: Vulnerabilidad de estructuras frente a aluviones para la zona urbana de Antofagasta considerando una velocidad de flujo (u) de 0.4 m/s y alturas (h) de 0.4 m, 1 m y 3 m.

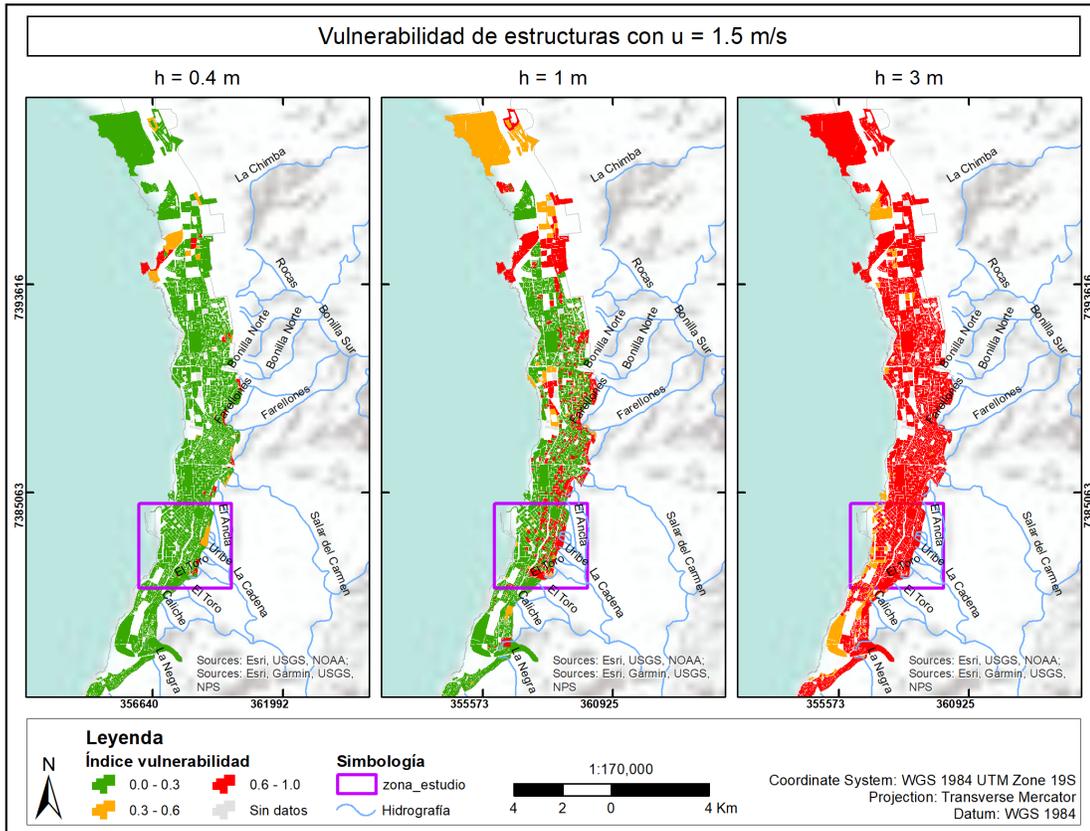


Figura 4.6: Vulnerabilidad de estructuras frente a aluviones para la zona urbana de Antofagasta considerando una velocidad de flujo (u) de 1.5 m/s y alturas (h) de 0.4 m, 1 m y 3 m.

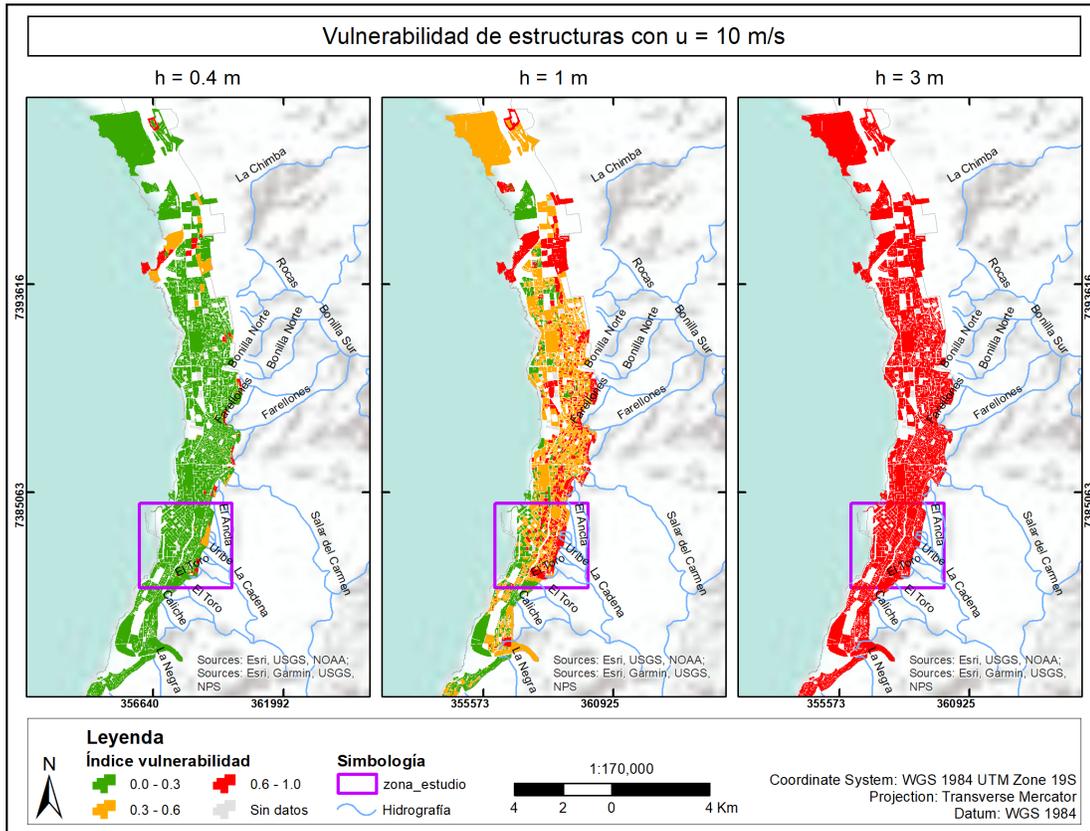


Figura 4.7: Vulnerabilidad de estructuras frente a aluviones para la zona urbana de Antofagasta considerando una velocidad de flujo (u) de 10 m/s y alturas (h) de 0.4 m, 1 m y 3 m.

4.4. Vulnerabilidad en el sector de las quebradas Uribe, Baquedano y El Toro

Se evaluó vulnerabilidad para el sector de las quebradas Uribe, Baquedano y El Toro dentro de las zonas delimitadas de peligro de aluviones (Falcón et al., 2014) (4.3), considerando un evento de magnitudes ya mencionadas en la sección de caracterización.

Para esta evaluación se incluyó dentro de los elementos expuestos la infraestructura especial, y se representó el resultado mediante un mapa (figura 4.8), donde cada polígono corresponde a las manzanas censales que se colorearon de verde, para indicar vulnerabilidad baja, con valores entre 0.0 y 0.3; anaranjado para vulnerabilidad media, entre 0.3 y 0.6; y rojo para vulnerabilidad alta, entre 0.6 y 1 (ver tabla 3.2).

Los polígonos grises en la figura 4.8 también corresponden a manzanas censales, pero al encontrarse fuera del área demarcada como peligro de aluviones, no fueron evaluados para este evento específico, mismo caso que la infraestructura especial.

En este mapa (4.8) se puede observar que la mayoría de las estructuras de este sector de Antofagasta que se encuentran dentro de las zonas de peligro de aluviones, cuentan con

un índice de vulnerabilidad bajo frente al evento considerado, mientras que las estructuras de mediana y alta vulnerabilidad son muy pocas y se encuentran dispersas en el área, a excepción de unas cuantas al sur.

Al concentrarse en las zonas de descenso de las quebradas, se puede notar que igualmente la vulnerabilidad de las edificaciones dispuestas allí son de baja vulnerabilidad, excepto por una pequeña área en una de las salidas de la quebrada Baquedano.

Cabe destacar que, aparte de uno de los recintos educacionales, la infraestructura tanto estratégica como crítica tienen una baja vulnerabilidad.

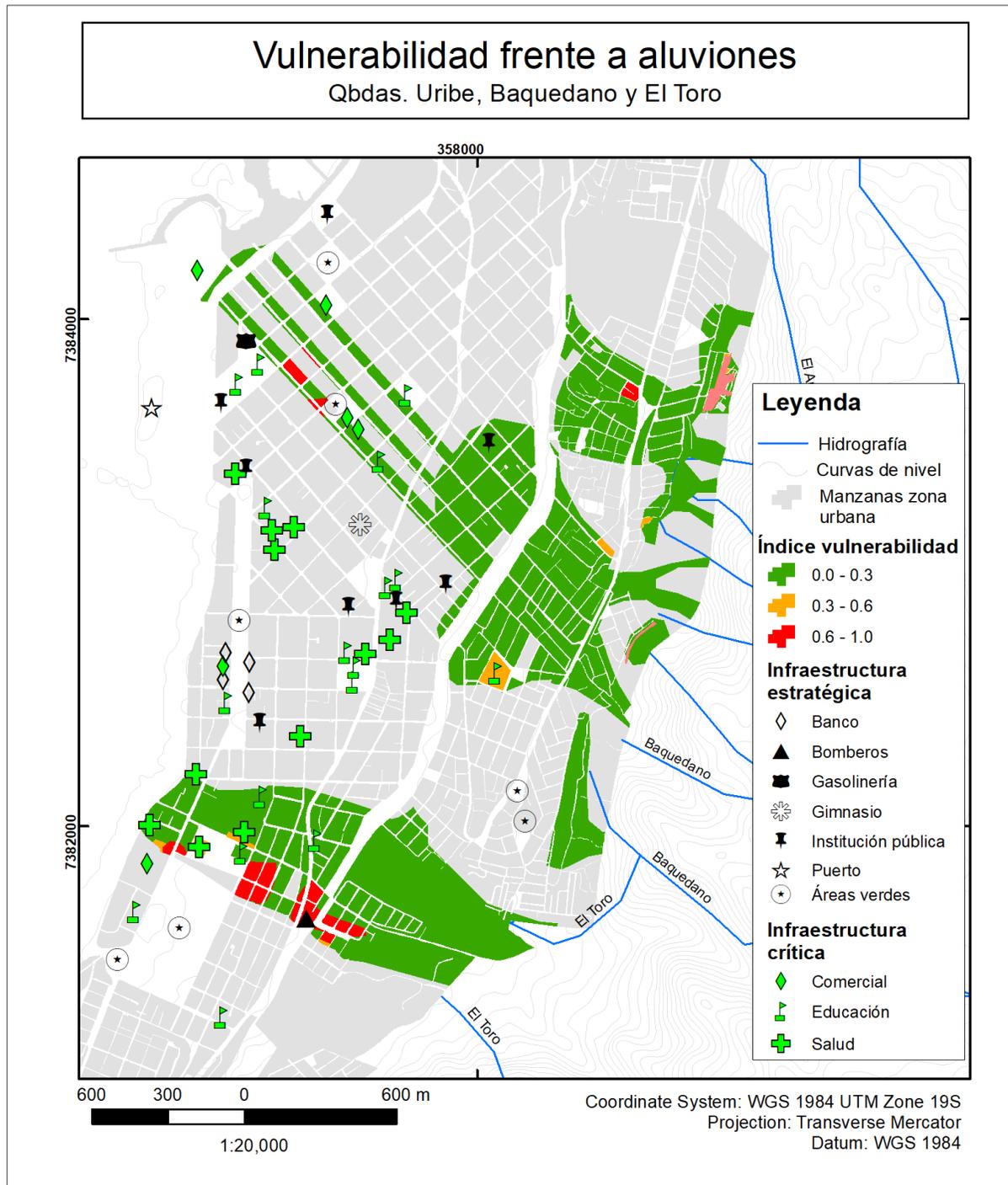


Figura 4.8: Mapa de riesgo frente a aluviones para las quebradas Uribe, Baquedano y El Toro.

4.5. Riesgo en el sector de las quebradas Uribe, Baquedano y El Toro

A partir de los resultados de la evaluación de vulnerabilidad (figura 4.8), el mapa de peligro del SERNAGEOMIN (Falcón et al., 2014) (figura 4.3) y los valores asignados a sus

categorías (ver tabla 3.2), se evaluó riesgo frente a aluviones, generando así el mapa que se muestra en la figura 4.9.

Del mapa (figura 4.9) se puede observar que, si bien la mayoría de las estructuras cuentan con un índice de riesgo bajo, se encuentran agrupaciones claras de estructuras de riesgo medio y alto, siendo estas últimas más puntuales.

En la zona de descenso de las quebradas se pueden encontrar estructuras de mediano riesgo en una de las salidas de El Toro, y también un área menor en la salida norte de la quebrada Baquedano.

Con respecto a la infraestructura especial, destaca un sector al suroeste del área de estudio donde un par de centros de salud poseen un índice de riesgo medio.

Riesgo frente a aluviones

Qbdas. Uribe, Baquedano y El Toro

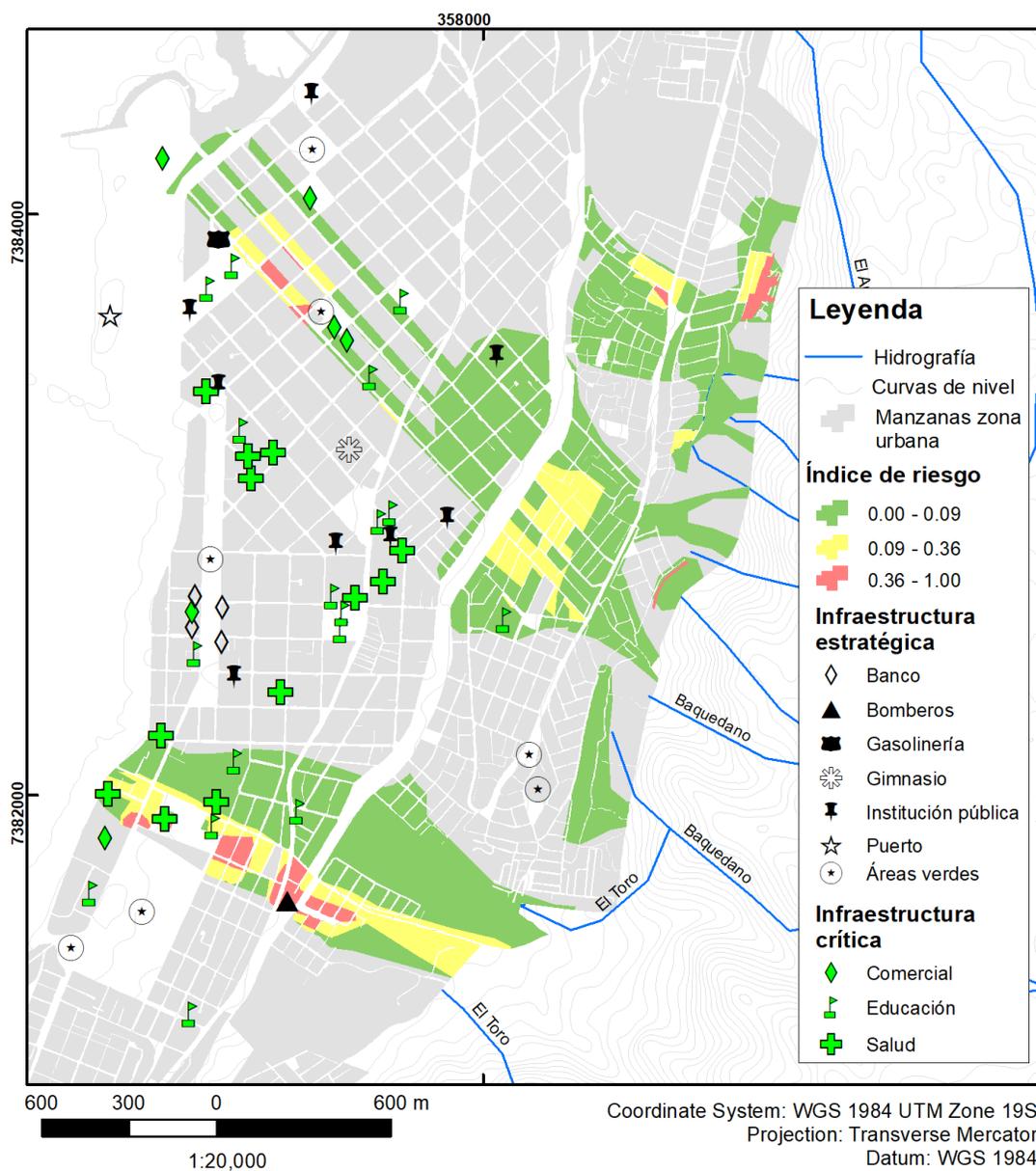


Figura 4.9: Mapa de riesgo frente a aluviones para las quebradas Uribe, Baquedano y El Toro.

Capítulo 5

Discusión

Generar mapas de riesgo de remociones en masa no es tan común como desarrollar mapas de susceptibilidad, peligro, o incluso vulnerabilidad. Un mapa de riesgo implica señalar los efectos potenciales y daños sobre aquello que se valora, y esto puede llegar a ser muy complejo si se considera toda la dinámica que abarca, incluyendo tanto infraestructura y vidas humanas, como sistemas económicos, entre otros.

Papathoma-Köhle et al. (2007) sugiere que muchas veces existe un conocimiento empírico suficiente por parte de las instituciones pertinentes como para no requerir investigaciones teóricas más profundas o a que, al ser eventos generalmente delimitados a un área específica, una de las soluciones es simplemente evitar las zonas afectadas.

En el caso de la comuna de Antofagasta, el crecimiento de la zona urbana desde 1991 hasta el presente ha sido importante, expandiéndose principalmente de forma longitudinal, a lo largo de la costa, pero también en dirección este-oeste, llegando a ocupar prácticamente la totalidad de la extensión de la Planicie Costera, desde el borde costero hasta los faldeos de la Cordillera de la Costa, que presenta un relieve irregular y numerosas quebradas con dirección este-oeste, donde se disponen gran parte de los depósitos aluviales de eventos aluvionales anteriores.

Antofagasta, al ser una región árida con gran cantidad de sedimentos disponibles, al producirse eventos climáticos extremos con intensas precipitaciones, suelen desencadenarse flujos aluvionales que transportan gran parte del sedimento disponible, encauzándose por los lechos de las quebradas en dirección al mar, y, dependiendo de la magnitud del evento, pueden perjudicar las estructuras a su paso.

Si bien el plano regulador actual de la comuna indica la prohibición de construir cualquier tipo de edificación en las zonas que resultan ser las más expuestas, considerando como ejemplo el borde oriental de la zona urbana, clasificándolas como zonas de áreas verdes y montañosas, si se compara con las zonas con edificaciones residenciales construidas hasta el 2017 (figura 5.1) se observa que estas no se limitan a las áreas destinadas para ello, ya sea porque las estructuras se encontraban allí antes de las últimas modificaciones al plano regulador, o porque corresponden a viviendas en condiciones irregulares o ilegales. Cabe destacar que la mayoría de los campamentos y/o tomas que se encuentran en este sector se ubican justamente distribuidos a lo largo de este límite.

En consecuencia de lo anterior y de los eventos registrados que han causado daños en la comuna, las autoridades han implementado medidas de mitigación como estructuras estabilizadoras y de contención en algunas quebradas y mapas de evacuación. Sin embargo, a pesar de esto, y de que no ha pasado tanto tiempo desde el último evento catastrófico (1991 si se considera solo la zona de estudio, 2015 para el sector norte de Chile), la comunidad no ha sido informada o educada de forma eficiente como para generar conciencia acerca del peligro de aluviones, a diferencia de otros peligros, como la inundación por tsunamis (relato hablado por Francisca Roldán, Geóloga de la Universidad Católica del Norte, residente en la región y Coordinadora de la Línea de investigación de amenazas por procesos de tierra sólida de Cigiden).

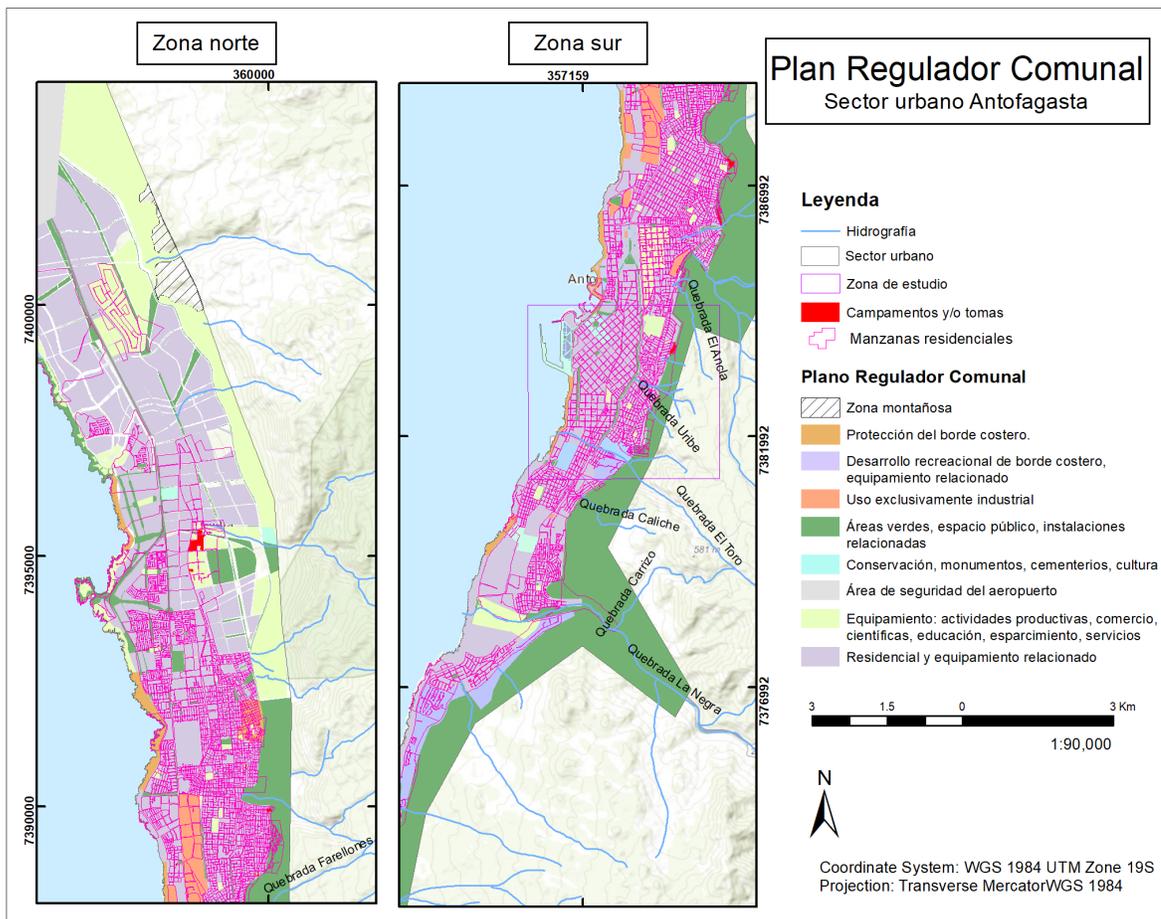


Figura 5.1: Plano regulador comunal de Antofagasta, modificado del publicado por la I. Municipalidad de Antofagasta. Sobrepuestas, en color rosa, se observan las manzanas residenciales (Censo 2017).

Los antecedentes mencionados, sumados a la disponibilidad de información y trabajos relacionados en la zona, hacen de Antofagasta el candidato perfecto para realizar una evaluación de riesgo. Es importante señalar que no se encontraron antecedentes de estudios de riesgos geológicos de remociones en masa de este tipo generados para otras regiones similares en Chile, a excepción de una publicación que se realizó en medio del proceso de este trabajo

a nivel nacional. Un equipo conformado por académicos y estudiantes de la Universidad de Chile, Carmen Paz Castro, Manuel Amaya, Isabel Alt, Ignacio Arce y Marisol Castro, en conjunto con la Agencia de EEUU para el Desarrollo Internacional y en coordinación con la Dirección de Gestión de Riesgos de Desastre de la I. Municipalidad de La Serena, presentaron los resultados de un exhaustivo estudio de riesgo de amenazas tanto naturales como tecnológicas para zona urbana de la comuna de La Serena (U. de Chile, 2020). De todas formas, no se encontró disponible el detalle de la investigación, por lo que no se pudo consultar acerca de su metodología.

Mediante este trabajo se buscó aplicar una metodología para determinar el riesgo de aluviones de una zona determinada. Tras analizar la información disponible, se decidió utilizar el método desarrollado por Li et al. (2010) para evaluar vulnerabilidad y tomar el modelo presentado por Lee y Jones (2014) para evaluar riesgo, esto para la zona urbana de la comuna de Antofagasta, asociada a las quebradas Uribe, Baquedano y El Toro (figuras 4.1 y 4.2). Para esto, se debieron adaptar algunos parámetros, pudiendo finalmente obtener una medición de vulnerabilidad y riesgo de estructuras frente a aluviones (figuras 4.8 y 4.9).

Antes de comenzar con la evaluación, se debieron determinar los elementos que se considerarían. Para efectos de este trabajo, se tomó en cuenta la infraestructura utilizada como vivienda, agrupada en manzanas censales (INE, 2018a), y en menor medida la infraestructura utilizada para fines comerciales, educacionales, instituciones públicas, entre otras que participan y aportan en la dinámica de la comunidad, categorizadas en infraestructura crítica y estratégica (figura 4.4). Las obras de mitigación, como muros estabilizadores y pozas decantadoras, no fueron consideradas en este trabajo, ya que los informes en los que se basó el estudio fueron desarrollados sin tomarlas en cuenta, y tampoco se encontró información específica disponible.

La metodología de Li et al. (2010) de evaluación de vulnerabilidad fue concebida para abordar los distintos tipos de remociones en masa, en función de la resistencia de las estructuras y de la intensidad de la remoción. Así, es posible evaluar vulnerabilidad en base a parámetros como la velocidad y altura del flujo, y características de construcción de las estructuras.

Se realizaron evaluaciones de vulnerabilidad para 2 zonas de estudio, con distintos objetivos. La primera, para la zona urbana completa de la comuna de Antofagasta (figura 4.1), con el objetivo de observar y comparar la vulnerabilidad de las viviendas de la comuna en el caso de que fueran afectadas de la misma forma. Para esto, se ingresaron tres valores distintos para la velocidad y otros tres para la altura de los flujos, combinándolos de tal manera que se representaron 9 casos distintos, como se puede ver en las figuras 4.5, 4.6 y 4.7.

La segunda zona de estudio fue el sector de la zona urbana asociado a las quebradas Uribe, Baquedano y El Toro (4.2), con el objetivo de realizar la evaluación de riesgo, por lo que se acotó al área definida por el mapa de peligro del SERNAGEOMIN (Falcón et al., 2014) (figura 4.3). En este caso, se buscó un resultado más dinámico, considerando la variación de intensidad de un flujo a lo largo de su trayectoria, dividiendo el área en valores distintos de velocidad y de altura, basados en el modelo de Espinoza (2017).

Con respecto a los resultados para la zona urbana de la comuna de Antofagasta (figuras

4.5, 4.6 y 4.7), se observó que para las alturas de 0.4 m y 3 m presentaron variaciones significativas respecto de la variación de velocidades. En el primer caso, esto muestra que hasta cierta altura, las estructuras tienen una alta resiliencia (o baja vulnerabilidad), no importa la velocidad con la que avance, siendo esto válido al menos hasta los 40 cm de altura y 10 m/s de velocidad (figura 4.7).

En el segundo caso, se puede interpretar como que hay una altura mínima desde la cual no importa la velocidad del flujo, las estructuras son altamente vulnerables. De esta forma, se puede explicar la mayor diferencia en los índices al variar la altura que la velocidad tomando en cuenta que los valores máximo y mínimo de la primera corresponderían a valores bajo y sobre el crítico.

Destaca también que los sectores más vulnerables frente a aluviones, recordando que todas las estructuras se evaluaron bajo las mismas condiciones, se encuentran a lo largo del límite entre la zona urbana y la Cordillera de la Costa, y al norte, cerca de La Chimba, que coincide con los sectores socioeconómicos más vulnerables (INE, 2017).

En cuanto al mapa de vulnerabilidad en el sector de las quebradas Uribe, Baquedano y El Toro (figura 4.8), los resultados son por lo general favorables, mostrando un alto nivel de resiliencia (o baja vulnerabilidad) frente a las características del aluvión definido (figura 4.3), excepto en zonas puntuales: al sur, el sector con alto índice de vulnerabilidad coincide con el área donde el flujo alcanzaría una altura de 3 m, que, como se mencionó anteriormente, sería más determinante que la velocidad y las características de las estructuras en el resultado, al igual que en el sector noroeste.

Por otro lado, a pesar de que la zona más cercana a las quebradas corresponde a áreas de mayor velocidad del flujo y estructuras menos resistentes (según el resultado anterior), coincide con que es también la zona de menor altura, y, siguiendo el razonamiento aprendido de los resultados previos, en ese rango lo que prima es la altura.

Una vez obtenidos los resultados de vulnerabilidad, se cruza la información con el mapa de peligro de aluviones basado en el de Falcón et al. (2014), al que se le asignaron índices. Estos índices, así como los de riesgo y vulnerabilidad, fueron escogidos de forma deliberada, dividiendo el rango de 0 a 1 en secciones similares y basado en los índices propuestos por Liu et al. (2002) (ver tabla 3.2).

El mapa de riesgo muestra (figura 4.9), mediante la categorización alto, medio y bajo, o sus respectivos índices, el nivel del potencial daño que podría afectar a las estructuras. Más específicamente, expresa la gravedad de las consecuencias que enfrentaría una estructura en función del nivel de vulnerabilidad definido en la evaluación respectiva (figura 4.8), y en función de la probabilidad de ser afectada por el evento, determinada por el mapa de peligro (figura 4.3). Este tipo de información es de gran valor para una comunidad si las autoridades pertinentes la toman en consideración al planificar medidas de mitigación, servicios y rutas de emergencia, capacitar al personal y civiles, y poner especial atención en las zonas más complejas o de mayor riesgo.

Para considerar las obras de mitigación se requeriría realizar modelos de flujos de detritos con nuevos datos. Como el objetivo de estas obras es disipar la energía con que desciende

el flujo, y, a su vez, retener parte de los sólidos arrastrados por este, se esperaría que la velocidad y altura de los flujos disminuyera con respecto a los ocupados en este trabajo. La vulnerabilidad, al depender solamente de las características de las estructuras, no variaría, pero sí el peligro, que, dependiendo de los resultados de los modelos, es posible que el alcance de los flujos se acorte, disminuyendo así la extensión de las áreas de peligro, concentrándose principalmente en el sector oriente. En consecuencia, la vulnerabilidad se mantendría, mientras que el riesgo disminuiría, manteniendo de todas formas la distribución y la tendencia a ser mayor hacia la cordillera.

Por otro lado, como se observó en los resultados presentados, si bien se evaluó la vulnerabilidad de las estructuras en toda la zona urbana, la evaluación de riesgo, considerando flujos de detritos de magnitudes determinadas, se aplicó solo para el sector de las quebradas Uribe, Baquedano y El Toro. Para aplicar esta evaluación en el resto de las quebradas, se debe contar con modelos o simulaciones del comportamiento de los eventos de flujos a considerar. En el caso de este trabajo, extrapolar información o considerar datos de altura y velocidad de flujos a partir de los datos existentes para aplicar el método en quebradas de características similares hubiese disminuido de forma considerable la calidad de los resultados.

Con respecto a los niveles de riesgo, en algunas metodologías las categorías de riesgo bajo, medio y alto indican niveles de daños como, por ejemplo, estéticos, reparables y estructurales o pérdida total respectivamente (Cardinali et al., 2002; Alexander, 2002), pero en este trabajo no se tienen los datos estadísticos suficientes como para realizar una categorización de este tipo, siendo índices relativos entre sí. En este caso, se podría tomar, por ejemplo, la peor consecuencia para un escenario determinado y asociarla al grado de riesgo alto, como pérdida total de la estructura dado un evento de gran magnitud, o inundación de las viviendas si el evento es menor, y considerar daños menores a este para los grados de riesgo más bajo. Esto permitiría una evaluación de la situación y toma de decisiones mucho más eficiente en una emergencia.

Retomando lo anterior, como se ha mencionado a lo largo de este trabajo, los mapas de vulnerabilidad y de riesgo frente a remociones en masa pueden ser un gran apoyo para las autoridades pertinentes, tanto en la fase de prevención y mitigación, como en las fases de preparación e incluso de emergencias, entregando herramientas y capacitación a funcionarios y civiles. Sin embargo, esta información debe ser manejada con responsabilidad, o puede, a su vez, ser causante de errores que pueden llevar a tragedias. Se debe recordar que se trabaja con escenarios hipotéticos, que si bien ayudan en el manejo de los recursos, no reflejan todas las posibles situaciones.

Finalmente, se debe señalar que, debido al contexto nacional, este trabajo no contó con un trabajo exhaustivo de terreno, por lo que los resultados se encuentran limitados por la información disponible de forma remota.

Capítulo 6

Conclusiones

La zona urbana de la comuna de Antofagasta se encuentra asentada en la planicie costera en la zona norte de Chile, ocupando toda su extensión en dirección este-oeste, limitada por la Cordillera de la Costa al oriente y el Océano Pacífico por occidente, distribuyéndose en dirección norte-sur entre las quebradas La Chimba y La Negra. Las viviendas se han dispuesto incluso hasta el Escarpe Costero, justo al pie de las quebradas, asentadas algunas sobre abanicos aluviales, depósitos cuaternarios de eventos de remociones en masa anteriores. Bajo este contexto, el presente estudio se realizó con el objetivo de encontrar y utilizar o adaptar una metodología aplicable en la zona urbana de Antofagasta para determinar el riesgo específico de estructuras frente a aluviones.

Las metodologías seleccionadas fueron la de Li et al. (2010) para evaluar vulnerabilidad de estructuras y el modelo presentado por Lee y Jones (2014) para evaluar riesgo específico. Estas fueron aplicadas sobre los elementos expuestos previamente definidos, principalmente estructuras de carácter residencial (figura 4.4), distribuidos en dos áreas de estudio: la primera corresponde a toda la zona urbana de Antofagasta (figura 4.1), y la segunda a un sector acotado de esta, asociado a las quebradas Uribe, Baquedano y El Toro (figura 4.2). Se generaron mapas de vulnerabilidad para las dos áreas, mientras que se generó un mapa de riesgo específico solo para el área más acotada, debido a la disponibilidad limitada de datos.

Cabe destacar que en este estudio no se consideraron las obras de mitigación construidas a lo largo de las quebradas pertinentes para evaluar riesgo, pues tampoco fueron consideradas en los estudios antecedentes en los que se apoyó, como los mapas de peligro publicados por el SERNAGEOMIN (Falcón et al., 2014) o el modelo de flujos de Espinoza (2017), debido a la limitada disponibilidad de información.

De la evaluación de vulnerabilidad para la zona urbana de Antofagasta (figuras 4.5, 4.6 y 4.7) se pudo comparar la vulnerabilidad de las estructuras habitacionales bajo un mismo escenario, determinando que las de mayor índice corresponden a las que se encuentran en el borde oriental del área, dispuestas a lo largo del límite con la Cordillera de la Costa. Le siguen las estructuras hacia el centro, y, por último, las menos vulnerables serían las que se encuentran desde el centro hacia la costa.

En el sector de las quebradas Uribe, Baquedano y El Toro (figura 4.8), bajo un escenario dinámico basado en el modelo de Espinoza (2017) (figura 4.3), se observó que la mayoría de las estructuras tienen una baja vulnerabilidad, a excepción de un par de áreas puntuales

altamente vulnerables. Asimismo, la evaluación de riesgo (figura 4.9) mantiene las mismas áreas con un alto índice, y se suman otras, principalmente de riesgo medio. De todas formas, la mayoría de las estructuras resultaron tener un riesgo bajo.

Finalmente, se recomienda y queda pendiente, para efectos de comparación y corroborar el nivel de precisión de este trabajo, una investigación en terreno que permita desarrollar un mapa de riesgo en base a juicio experto, esto cuando las condiciones y el contexto nacional lo permitan.

Bibliografía

- Planos de Evacuación, Chile Preparado. Consultado en 2020.
<https://www.onemi.gov.cl/mapas/region/antofagasta/>.
- Biblioteca del Congreso Nacional. consultado en 2020.
<https://www.bcn.cl/siit/nuestropais/clima.htm>.
- ABCB Australian Building Codes Board*. Landslide Hazards (the Handbook). 2006.
- Alexander D.* Principles of Emergency Planning and Management. 2002. ISBN 978-1-903544-10-5.
- Ayala L., Vidal F.* Crecidas súbitas y corrientes de detritos ocurridas el 18 de junio de 1991 en Antofagasta. 1993.
- Basso M.* Geología del área urbana de la ciudad de Antofagasta, Región de Antofagasta. 2007. Mapas Geológicos, No 109, 32 p., il; 1 mapa escala 1:50.000. Santiago.
- Bell R., Glade T.* Quantitative risk analysis for landslides - Examples from BÍldudalur, NW-Iceland // Natural Hazards and Earth System Science. 2004. 4. 117–131.
- Brüggen J.* Fundamentos de la geología de Chile. 1950. 374.
- Cardinali M., Reichenbach P., Guzzetti F., Ardizzone F., Antonini G., Galli M., Cacciano M., Castellani M., Salvati P.* A geomorphological approach to the estimation of landslide hazards and risks in Umbria, Central Italy // Natural Hazards and Earth System Sciences. 2002. 2. 57–72. doi: <https://doi.org/10.5194/nhess-2-57-2002>.
- Costa J.E., Schuster R.L.* The formation and failure of natural dams // Geological society of America bulletin. 1988. 100(7). 1054 – 1068.
- Covarrubias A., Misetic V., Araya V.* El aluvión del 18 de junio desde el punto de vista de la hidrología. 1991.
- Cruden D.M., Varnes D.J.* Landslide types and processes // Landslide investigation and mitigation. 1996. 3, 36–75.
- Cutter S.* Vulnerability to environmental hazards // Progress in Human Geography. 1996. 20, 4. 529–539. doi:10.1177/030913259602000407.
- Douglas J.* Physical vulnerability modelling in natural hazard risk assessment // Natural Hazards and Earth System Science. 2007. 7. 283–288.
- Espinoza L. D.* Aplicación de metodologías para la evaluación de la susceptibilidad de generación y peligro de flujos detríticos en las quebradas Baquedano, Uribe y El Toro en Antofagasta, Región de Antofagasta. 2017. Memoria para optar al título de Geólogo.

- Falcón F., Arenas M., Carrasco R., Fernández J., Gajardo A., Huerta S., Marín M., Merino A., Mourgues A., Pérez Y., Vaccaro H.* Geología para el ordenamiento territorial: área de Antofagasta, Región de Antofagasta. 19. 2014. 6 mapas escala 1:50.000. ISSN 0717-7305.
- Ferraris F., Di-Biase F.* Hoja de Antofagasta, Región de Antofagasta. Instituto de Investigaciones Geológicas. 1978. escala 1:250.000.
- Flint S., Clemmey H., Turner P.* Conglomerate-hosted copper mineralization in Cretaceous Andean molasse: the Coloso Formation of Northern Chile. 1986. 252–536.
- Galli M., Guzzetti F.* Landslide vulnerability criteria: A case of study for Umbria, Central Italy // Environmental Management. 2007. 40(4). 649–664. doi: 10.1007/s00267-006-0325-4.
- García F.* Geología del Norte Grande de Chile. In Simposium sobre el Geosinclinal Andino. // Sociedad Geológica de Chile. 1967. 3. 138.
- Garreaud R., Rutllant J.* Análisis meteorológico de los aluviones de Antofagasta y Santiago de Chile en el período 1991-1993 // Atmósfera. 1996. 9. 251–271.
- Glade T.* Vulnerability assessment in landslide risk analysis // Die Erde. 2003. 134(2). 123–146.
- Gonzalez G., Niemeyer H.* Cartas Antofagasta y Punta Tetas. Región de Antofagasta // Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geológica Básica. 2005. 89.
- Gonzalez L., Ferrer M., Ortuño L., Oteo C.* Ingeniería Geológica. Madrid: Pearson Educación, S.A., 2002. 609 – 613.
- Hauser A.* Flujos de barro en la Zona Preandina de la Región Metropolitana: Características, causas, efectos riesgos y medidas preventivas // Revista Geológica de Chile. 1985. 0, 24. doi:http://dx.doi.org/10.5027/andgeoV12n1-a06.
- Hauser A.* Remociones en masa en Chile. Boletín n°45. 1993.
- Hauser A.* Los aluviones del 18 de junio de 1991 en Antofagasta: un análisis crítico, a 5 años del desastre. Boletín n°49. 1997.
- Henriquez H.* Avenida del 7 de Febrero de 1972 que afectó instalaciones de la mina de cobre de Sagasca, Provincia de Tarapacá // Instituto de Investigaciones Geológicas - Ministerio de Minería. 1972. 3. (inérito).
- Hollenstein K.* Reconsidering the risk assessment concept: Standardizing the impact description as a building block for vulnerability assessment // Natural Hazards and Earth System Science. 2005. 5. 301–307.
- Hungr O., Evans S.G., Bovis M.J., Hutchinson J.N.* A review of the classification of landslides of the flow type // Environmental and Engineering Geoscience. 2001. 7(3). 221–238.
- Hungr O., Leroueil S., Picarelli L.* The Varnes classification of landslide types, an update // Landslides. 2014. 11(2). 167–194.
- IDE .* Programa de Campamentos. 2016. <https://www.ide.cl/index.php/planificacion-y-catastro/item/1846-campamentos>.
- IDE .* Microdatos Censo 2017: Manzana. 2018. <https://www.ide.cl/index.php/planificacion-y-catastro/item/1846-campamentos>.

- y-catastro/item/1948-microdatos-censo-2017-manzana.
- INE . Censo de Población y Vivienda. 2019. último ingreso diciembre, 2019.
- Li Z., Nadim F., Huang H., Uzielli M., Lacasse S. Quantitative vulnerability estimation for scenario-based landslide hazards // *Landslides*. 2010. 7. 125–134. doi:10.1007/s10346-009-0190-3.
- Liu X., Yue Z., Tham L., Lee Ch. Empirical Assessment of Debris Flow Risk on a Regional Scale in Yunnan Province, Southwestern China. 2002. 249–264.
- Martínez E., Niemeyer H. Depósitos marinos aterrizados del Plioceno Superior en la ciudad de Antofagasta, su relación con la Falla de Atacama. 1982. 1, A171-A188.
- Mawün . Explorador de precipitaciones. consultado en 2021. mawun.cr2.cl.
- Papathoma-Köhle M., Neuhäuser B., Ratzinger K., Wenzel H., Dominey-Howes D. Elements at risk as a framework for assessing the vulnerability of communities to landslides // *Natural Hazards and Earth System Science*. 2007. 7(6). 765–779.
- Pierson T.C. Flow behaviour of channelized debris flow, Mount St. Helens, Washington // *Hillslope processes*. 1986. 269 – 296.
- Proyecto Multinacional Andino Geociencias para las Comunidades Andinas. Movimientos en masa de la Región Andina: Una guía para la evaluación de amenazas. 2007. Servicio Nacional de Geología y Minería, Publicación Geológica Multinacional, No. 4, 432.
- Roldan F. Evaluación de la capacidad de generación de flujos de detritos y zonas susceptibles de la cuenca La Chimba y zona de desembocadura, Antofagasta. 2019.
- Sepúlveda S. Metodología para evaluar el peligro de flujos de detritos en ambientes montañosos: Aplicación en la Quebrada Lo Cañas, Región Metropolitana. 1998.
- Sepúlveda S., Rebolledo S., Vargas G. Recent catastrophic debris flows in Chile: Geological hazard, climatic relationships and human response // *Quaternary International*. 2006. 158. 83–95. doi:10.1016/j.quaint.2006.05.031.
- Sevilla J. Evaluación del volumen del material deslizado en el desastre de La Josefina: Informe inédito. 1994.
- Solis E. Modelación matemática de corrientes de detritos. 1995.
- Suárez M., Marquart C., Lavenu A., Marinovic N., Wilke H.-G. Vertebrados Marinos Neógenos de la Formación La Portada, II Región, Chile. 1978. Actas en CD-ROOM.
- UNISDR . UNISDR terminology on disaster risk reduction. 2009.
- Van-Sint-Jan M., Talloni P., Aracena I., Gallardo A. Informe del Aluvión en Antofagasta el 18 de junio de 1991. 1992.
- Vargas G., Ortlieb L. Registro de aluviones históricos en Antofagasta // Departamento de Ciencias Geológicas VIII Congreso Geológico Chileno Actas. 1997. I. 400–404.
- Vargas G., Ortlieb L., Rutllant J. Aluviones históricos en Antofagasta y su relación con eventos El Niño/Oscilación del Sur // *Revista Geológica de Chile*. 2000. 27, 2. 157–176. doi:https://dx.doi.org/10.4067/S0716-02082000000200002.
- Vargas G., Pérez S., Aldunce P. Aluviones y resiliencia en Atacama. Construyendo saberes

sobre riesgos y desastres. 2018. 3.

Varnes D. J. Slope Movement Types and Processes // Transportation Research Board Special Report. 1978. (176). 11 – 33.

Wetzel W. Beiträge zur Erdgeschichte der mittleren Atacama. Neues Jahrbuch für Mineralogie. 1927. 507–578.

Zhang S., Li C., Zhang L., Peng M., Zhan L., Xu Q. Quantification of human vulnerability to earthquake-induced landslides using Bayesian network. 2020.