



UNIVERSIDAD DE CHILE
Facultad de Arquitectura y Urbanismo
Escuela de Pregrado
Carrera de Geografía

ANÁLISIS DE LA VULNERABILIDAD DEL SISTEMA DE ABASTECIMIENTO HÍDRICO DE LA CIUDAD DE ANTOFAGASTA

Memoria para optar al título de Geógrafo

MARCELO ALBERTO ANCÁN HENRÍQUEZ

Profesora Guía: María Christina Fragkou

SANTIAGO - CHILE

2018

Memoria financiada por Proyecto FONDECYT de Iniciación N°11130631
“Metabolizando agua, construyendo escasez: Impactos indirectos de la planta
desalinizadora La Chimba en la ciudad de Antofagasta”

“La tierra, por la magnificencia de sus horizontes, las frescuras de sus bosques y la pureza de sus fuentes, ha sido y continúa siendo la gran educadora, y no ha cesado de llamar a las naciones a la armonía y a la conquista de la libertad. Tal monte, cuyas nieves y hielos aparecen en pleno cielo por encima de las nubes, tal bosque en el que el viento ruje, o tal riachuelo que corre susurrante por prados y valles, han hecho con frecuencia mucho más que formidables ejércitos por la libertad de un pueblo. Así lo sintieron los antiguos vascos, nobles descendientes de los íberos, nuestros abuelos: por el anhelo de libertad y altiva valentía, construían sus residencias al borde de las fuentes, a las sombras de los grandes árboles, y más aún que su fiereza, el amor a la naturaleza aseguró durante siglos su independencia.”

Élisée Reclus
El Arroyo

Agradecimientos

A mi familia, por su constante e incondicional apoyo durante este largo proceso.

A mis amigos y amigas, en especial a quienes colaboraron de una u otra manera en el desarrollo de la investigación.

A la profesora María Fragkou por guiarme en esta etapa, y a los profesores Rodrigo Rauld y Gino Sandoval por la asistencia proporcionada.

A los Ramones y Evaristo, por hacer explotar mi mente.

Resumen

En la presente investigación se analiza la vulnerabilidad del sistema de abastecimiento hídrico de la ciudad de Antofagasta mediante la evaluación de variables e indicadores de vulnerabilidad y la exposición a diferentes factores de riesgo, y su variación asociada a la incorporación de nuevas fuentes de suministro hídrico, comprendiendo la vulnerabilidad de los aspectos operativos, físicos y administrativos del sistema de agua potable de la ciudad. Considerando que el área de estudio se emplaza en el desierto más árido del mundo, la escasa disponibilidad de aguas para el abastecimiento hídrico de sus habitantes ha representado un problema permanente, siendo mitigado mediante la gestión del recurso hídrico y la incorporación de nuevas fuentes de abastecimiento, hasta lograr suministrar actualmente un caudal óptimo a la ciudad mediante la producción de agua desalada. La investigación se basa en las Guías para la elaboración del análisis de vulnerabilidad propuestas por el Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (2000), recogiendo estudios previos de riesgo realizados en el área de estudio complementados con la aplicación de metodologías identificadas en estudios similares, y analizando la seguridad en el abastecimiento hídrico de Antofagasta a partir de la aplicación de indicadores de vulnerabilidad de sus componentes a diferentes amenazas. De esta manera, se analizó el sistema de abastecimiento en sus etapas de producción y distribución, con una infraestructura que, con sus 63 componentes, atraviesa gran parte de la región, con 6 captaciones de agua cruda, 3 plantas de tratamiento de agua potable, 29 estanques, y 10 plantas elevadoras, sumado a más de 700Km de conducciones y 650Km de red de distribución, evaluando la exposición de los diferentes componente y del sistema en conjunto a cada uno de los 16 factores de riesgo considerados, y sus implicancias para la ciudad y sus 11 sectores de distribución de agua.

Se obtuvo una caracterización completa del sistema, sus componentes y flujos de aguas, desde los orígenes de la ciudad y su abastecimiento con fuentes de agua convencionales, captadas en la cordillera, hasta el escenario actual con la incorporación y predominancia del agua desalada, y con un suministro caracterizado por una mala calidad del agua y continuidad del servicio, y por deficiencias en el caudal suministrado al 65% de la población. Se determinó además que ambas fuentes se exponen a diferentes amenazas asociadas a sus características específicas y que impactan individualmente sobre estas, como los sismos y el Invierno Altiplánico en la producción de cordillera y los tsunamis y cortes eléctricos en la desalación, pero que pueden presentarse en conjunto e impactar a la totalidad del sistema, como ocurre con los terremotos tsunamigénicos. De esta manera, se concluye que la implementación de la desalación como fuente de abastecimiento hídrico contribuye al aumento en la disponibilidad hídrica de la ciudad y a reducir el impacto de las amenazas a las que se exponen las fuentes de cordillera, pero también incorpora nuevos factores de riesgo al sistema, impacta negativamente en la calidad del agua suministrada e incrementa los costos debido a la elevada demanda energética del proceso de desalación respecto a las fuentes convencionales. Así, y considerando un escenario futuro con un suministro hídrico proveniente en su totalidad de fuentes marinas, la desalación en el contexto de Antofagasta se presenta como una oportunidad para mejorar las condiciones del suministro hídrico, siempre que su implementación se realice bajo un marco de sustentabilidad y gestión integrada del recurso, mediante el uso de energías renovables y un enfoque que garantice la seguridad hídrica de los habitantes de la ciudad, mitigando los problemas de calidad y la exposición a amenazas que comprometan la capacidad del sistema de abastecimiento de Antofagasta.

Índices

Índice de Contenidos

Agradecimientos	iii
Resumen.....	iv
Índices	v
Índice de Contenidos.....	v
Índice de Anexos	viii
Índice de Cartografías	viii
Índice de Tablas.....	ix
Índice de Gráficos.....	x
I. Presentación de la investigación	1
1. Introducción	1
2. Caso de estudio	3
2.1. Características hidroclimáticos	3
2.2. Características geológicas	5
2.3. Características geomorfológicas	6
2.4. Características socioeconómicas y urbanas	7
3. Historia y antecedentes del abastecimiento hídrico.....	9
3.1. Primeros antecedentes de abastecimiento hídrico	9
3.2. Escasez y problemas con el arsénico.....	10
3.3. Avances en el abastecimiento y el agua desalada	12
4. Planteamiento del problema	15
4.1. Pregunta de investigación	17
4.2. Objetivos	17
4.2.1. Objetivo General	17
4.2.2. Objetivos Específicos	17
II. Marco de referencia.....	18
5. Marco Teórico	18
5.1. Gestión de aguas urbanas	18
5.1.1. Ciudades, ecosistemas y aguas urbanas	18
5.1.2. Abastecimiento hídrico en zonas áridas.....	20
5.1.3. Institucionalidad del agua y los servicios sanitarios.....	21
5.2. Vulnerabilidad y seguridad hídrica urbana	25
5.2.1. Amenaza, vulnerabilidad y riesgo	25
5.2.2. Vulnerabilidad de sistemas de agua potable	27
5.2.3. Evaluación de la vulnerabilidad y medidas de mitigación.....	29
5.3. Eventos catastróficos y emergencias	31
5.3.1. Manejo de emergencias	31
5.3.2. Actores y responsabilidades.....	32
5.3.3. Procedimientos y recomendaciones	33
6. Marco Metodológico.....	34
6.1. Descripción del abastecimiento, su evolución y vulnerabilidad operativa	35
6.2. Amenazas al sistema de abastecimiento hídrico	37
6.3. Evaluación de la vulnerabilidad del sistema de abastecimiento hídrico	43

III.	Resultados	45
7.	Caracterización del sistema de abastecimiento hídrico.....	45
7.1.	Descripción del sistema de abastecimiento.....	45
7.1.1.	Producción de agua potable.....	46
7.1.1.1.	Fuentes y sistemas de captaciones	48
7.1.1.2.	Aducciones	50
7.1.1.3.	Plantas de tratamiento de agua potable.....	51
7.1.1.4.	Estanques de producción	53
7.1.1.5.	Plantas elevadoras de agua cruda,.....	53
7.1.2.	Distribución de agua potable	54
7.1.2.1.	Conducciones	54
7.1.2.2.	Estanques de distribución	56
7.1.2.3.	Plantas elevadoras de agua potable	57
7.1.2.4.	Sectores y redes de distribución de agua potable	57
7.2.	Estimación de vulnerabilidad operativa	58
7.2.1.	Capacidad de abastecimiento	59
7.2.2.	Continuidad del suministro	61
7.2.3.	Calidad del agua potable	63
7.3.	Evolución del abastecimiento	63
7.3.1.	Evolución de infraestructura	64
7.3.2.	Evolución de capacidad.....	66
7.3.3.	Evolución de vulnerabilidad operativa.....	67
8.	Amenazas al abastecimiento hídrico	69
8.1.	Amenazas naturales	69
8.1.1.	Sísmica.....	69
8.1.2.	Tsunami	73
8.1.3.	Remociones en masa.....	73
8.1.4.	Volcánica	74
8.1.5.	Invierno Altiplánico	76
8.1.6.	Cambio climático	78
8.1.7.	Presencia natural de contaminantes.....	79
8.2.	Amenazas antrópicas	81
8.2.1.	Contaminación de fuentes	81
8.2.2.	Accidentes externos	82
8.2.3.	Geopolíticas.....	82
8.3.	Amenazas Tecnológicas.....	83
8.3.1.	Cortes eléctricos.....	83
8.3.2.	Envejecimiento de la infraestructura	84
8.3.3.	Materialidad	85
8.3.4.	Golpe de ariete.....	87
8.3.5.	Rotura y falla de tuberías	87
8.3.6.	Falla de equipos.....	88
9.	Evaluación de vulnerabilidad del sistema de abastecimiento	89
9.1.	Impactos en el abastecimiento por amenaza	89

9.1.1.	Amenaza sísmica	91
9.1.2.	Amenaza de tsunamis	94
9.1.3.	Amenaza de remociones en masa.....	97
9.1.4.	Amenaza volcánica	99
9.1.5.	Amenaza del Invierno Altiplánico.....	101
9.1.6.	Amenaza del cambio climático.....	101
9.1.7.	Amenaza de accidentes.....	104
9.1.8.	Amenaza de contaminación de fuentes.....	104
9.1.9.	Amenaza geopolítica	105
9.1.10.	Amenaza de cortes eléctricos	105
9.1.11.	Amenaza de envejecimiento de la infraestructura	106
9.1.12.	Amenaza por materialidad	110
9.1.13.	Amenaza de golpe de ariete.....	112
9.1.14.	Falla y rotura de tuberías	113
9.1.15.	Falla en equipos.....	114
9.2.	Estimación de la vulnerabilidad física	114
9.2.1.	Por fuentes de abastecimiento	115
9.2.2.	Por componentes del sistema	116
9.2.3.	Por sectores de distribución.....	117
9.2.4.	Evolución de la vulnerabilidad física	119
9.3.	Manejo de emergencias y medidas de mitigación.....	119
9.3.1.	Riesgo y Vulnerabilidad Local.....	120
9.3.2.	Vulnerabilidad administrativa y capacidad de respuesta	121
9.3.3.	Medidas de mitigación	124
9.3.3.1.	Vulnerabilidad operativa	125
9.3.3.2.	Vulnerabilidad física	126
9.3.3.3.	Vulnerabilidad administrativa	129
9.3.3.4.	Propuestas para la mitigación.....	130
IV.	Discusiones y conclusiones	136
10.	Discusiones.....	136
10.1.	Vulnerabilidad del abastecimiento hídrico de Antofagasta.....	136
10.2.	Evolución y proyecciones	140
10.3.	Limitantes metodológicas, recomendaciones y aportes.....	143
11.	Conclusiones.....	146
V.	Bibliografía	149
VI.	Anexos	157

Índice de Anexos

Anexo 1: Zonas climáticas de la Región de Antofagasta según Köppen-Geiger	157
Anexo 2: Mapa hidrográfico de cuencas y subcuencas de la Región de Antofagasta	158
Anexo 3: Unidades geológicas de la Región de Antofagasta	159
Anexo 4: Macroformas de la Región de Antofagasta.....	160
Anexo 5: Grupos Socioeconómicos e infraestructura urbana prioritaria	161
Anexo 6: Matriz de asignación de responsabilidades (Matriz RACI).....	162
Anexo 7: Proceso de respuesta a emergencias sanitarias	163
Anexo 8: Captaciones de agua de cordillera de Aguas Antofagasta	163
Anexo 9: Caudal medio anual captado en fuentes de cordillera en el periodo 2003-2015.....	164
Anexo 10: Caudal medio mensual captado en fuentes de cordillera en el periodo 2003-2015.....	165
Anexo 11: Aducciones por tramo del sistema de producción de agua potable	166
Anexo 12: Mecanismos reguladores y reductoras de presión del sistema de producción	167
Anexo 13: Proceso de potabilización de las plantas de tratamiento	167
Anexo 14: Estanques del sistema de abastecimiento hídrico de la ciudad de Antofagasta	168
Anexo 15: Plantas elevadoras de agua del sistema de abastecimiento hídrico	168
Anexo 16: Conducciones de agua potable del sistema de distribución.....	169
Anexo 17: Sectores de distribución de agua potable de la ciudad de Antofagasta	169
Anexo 18: Matriz vulnerabilidad operativa del sistema de abastecimiento hídrico	170
Anexo 19: Matriz vulnerabilidad física del sistema de abastecimiento hídrico.....	171

Índice de Cartografías

Cartografía 1: Área de Estudio	4
Cartografía 2: Sistema de producción de agua potable	47
Cartografía 3: Infraestructura de distribución de agua potable	55
Cartografía 4: Evolución de la infraestructura de abastecimiento hídrico	65
Cartografía 5: Distribución de las clases de suelo y área de inundación de tsunami	71
Cartografía 6: Zona de restricción por sismos de falla	72
Cartografía 7: Distribución de la amenaza de remociones en masa.....	75
Cartografía 8: Distribución de la amenaza volcánica	77
Cartografía 9: Isoyetas de Pp máxima diaria.....	80
Cartografía 10: Impacto de la amenaza sísmica.....	92
Cartografía 11: Impacto de sísmica de fallas	95
Cartografía 12: Impacto de la amenaza de tsunami	96
Cartografía 13: Impacto de la amenaza de remociones en masa	98
Cartografía 14: Impacto de la amenaza volcánica	100
Cartografía 15: Impacto del invierno altiplánico.....	102
Cartografía 16: Impacto de la amenaza de envejecimiento	108
Cartografía 17: Impacto de materialidad de tuberías.....	111
Cartografía 18: Sistemas de disipación de energía aluvional.....	128

Índice de Tablas

Tabla 1: Infraestructura urbana prioritaria de la ciudad de Antofagasta	7
Tabla 2: Pasos del análisis de vulnerabilidad en sistemas de agua potable y alcantarillado	34
Tabla 3: Clasificación de suelos	37
Tabla 4: Clasificación de unidades geológicas regionales según disposiciones NEHRP	38
Tabla 5: Factores de amplificación e intensidades esperadas por clase de suelo	38
Tabla 6: Clasificación de unidades geológicas regionales según suscep. a remoc. en masa	39
Tabla 7: Clasificación de Pendientes según suscep. remociones en masa	40
Tabla 8: Proyecciones de cambios de T° y Pp para los periodos 2011-2030 y 2031-2050	40
Tabla 9: Balance hídrico por subcuenca del Río Loa	41
Tabla 10: Vida útil de instalaciones de agua potable	42
Tabla 11: Metodología y fuentes por amenaza	43
Tabla 12: Resumen de la capacidad actual de producción de agua potable	46
Tabla 13: Captaciones de agua para la ciudad de Antofagasta por fuentes de abastecimiento	48
Tabla 14: Aducciones de los sistemas de captación de agua	49
Tabla 15: Aducciones del sistema de producción	50
Tabla 16: PTAP para la ciudad de Antofagasta	51
Tabla 17: Estanques del sistema de producción	53
Tabla 18: PEAC del sistema de producción	53
Tabla 19: Resumen de la distribución de agua potable en Antofagasta	54
Tabla 20: Conducciones de agua potable	54
Tabla 21: Estanques de distribución de agua potable	56
Tabla 22: PEAP del sistema de distribución	57
Tabla 23: Resumen del abastecimiento de agua potable por sector	57
Tabla 24: Resumen de la vulnerabilidad operativa del sistema de abastecimiento hídrico	58
Tabla 25: Capacidad de producción de agua potable por fuentes de abastecimiento	59
Tabla 26: Continuidad del servicio y calidad del agua potable por sector	61
Tabla 27: Vulnerabilidad operativa en la distribución de agua potable	62
Tabla 28: Evolución de la infraestructura de abastecimiento de agua potable	64
Tabla 29: Evolución de la capacidad de abastecimiento de agua potable	66
Tabla 30: Unidades geológicas según clases de suelos NEHRP	70
Tabla 31: Unidades geológicas según susceptibilidad a remociones en masa	74
Tabla 32: Variación del balance hídrico por subcuenca y escenario de cambio climático	78
Tabla 33: Cortes por acción de terceros entre 2011 y 2014	82
Tabla 34: Resistencia mecánica y a la corrosión por material	86
Tabla 35: Cortes por fallas en tuberías entre 2011 y 2014	87
Tabla 36: Resumen de amenazas al sistema de abastecimiento hídrico de Antofagasta	90
Tabla 37: Vulnerabilidad de infraestructura de abastecimiento hídrico a amenaza sísmica	91
Tabla 38: Vulnerabilidad de la distribución de agua potable a amenaza sísmica	93
Tabla 39: Vulnerabilidad de infraestructura de abastecimiento hídrico a sismos por fallas	94
Tabla 40: Vulnerabilidad de infraestructura de abastecimiento hídrico a amenaza de tsunami	94
Tabla 41: Vulnerabilidad de la distribución de agua potable a amenaza de tsunamis	97
Tabla 42: Vulnerabilidad de infraestructura de abastecimiento hídrico a remociones en masa	97
Tabla 43: Vulnerabilidad de la distribución de agua potable a amenaza de remociones en masa ..	99

Tabla 44: Vulnerabilidad de abastecimiento hídrico a amenaza del cambio climático	101
Tabla 45: Vulnerabilidad de la distribución de agua potable a amenaza de cambio climático	103
Tabla 46: Vulnerabilidad de la distribución de agua potable a amenaza de accidentes	104
Tabla 47: Vulnerabilidad de infraestructura de abastecimiento hídrico a cortes eléctricos	106
Tabla 48: Vulnerabilidad de infraestructura de abastecimiento hídrico al envejecimiento.....	107
Tabla 49: Vulnerabilidad de la distribución de agua potable a amenaza de envejecimiento	109
Tabla 50: Vulnerabilidad de la distribución de agua potable a amenaza por materialidad	110
Tabla 51: Vulnerabilidad de infraestructura de abastecimiento hídrico a golpes de ariete.....	112
Tabla 52: Vulnerabilidad de distribución de agua potable a amenaza de fallas de tuberías.....	113
Tabla 53: Vulnerabilidad operativa y población impactada por amenazas al abastecimiento.....	114
Tabla 54: Impacto de amenazas en la producción y distribución de agua potable	115
Tabla 55: Impacto de las amenazas al sistema de abastecimiento hídrico por componente	117
Tabla 56: Impacto de las amenazas en la población de los sectores de distribución	118
Tabla 57: Priorización de riesgo y vulnerabilidad local	120
Tabla 58: Comité de emergencias de la empresa sanitaria	121
Tabla 59: Evaluación de la vulnerabilidad administrativa en el abastecimiento hídrico	123
Tabla 60: Medidas de mitigación identificadas para el sistema de abastecimiento hídrico	125
Tabla 61: Actividades de mitigación realizadas por Aguas Antofagasta	129
Tabla 62: Medidas de mitigación propuestas para el sistema de abastecimiento hídrico	131

Índice de Gráficos

Gráfico 1: Evolución de la capacidad de abastecimiento hídrico respecto al crecimiento demográfico de la ciudad de Antofagasta, desde 1868 hasta la actualidad	14
Gráfico 2: Evolución de los indicadores de Continuidad y Calidad en la ciudad de Antofagasta para el periodo 2002-2015	68
Gráfico 3: Evolución de materiales usados en la red de distribución de agua potable	112

I. Presentación de la investigación

1. Introducción

El agua constituye un elemento fundamental para la vida, y su disponibilidad y la seguridad en el abastecimiento son primordiales para asegurar el desarrollo social, un crecimiento sostenible e inclusivo, y la conservación de ecosistemas (Global Water Partnership¹, 2013). La Organización de las Naciones Unidas² (2010) la establece como un derecho humano, y su potabilización y saneamiento son indispensables para la vida, la salud, y la dignidad de toda persona. El derecho al agua se define como “el derecho de todos a disponer de agua suficiente, salubre, aceptable, accesible y asequible para el uso personal y doméstico” (Comité de Derechos Económicos, Sociales y Culturales³, 2002). Además, todos los pueblos, independiente de su etapa de desarrollo o de sus condiciones económicas y sociales, tienen derecho al agua potable en cantidad y calidad según sus necesidades debido a que el acceso a agua potable es una condición previa fundamental para acceder a otros derechos humanos, como lo son los derechos a la educación, la vivienda, la salud, la vida, el trabajo y la protección contra tratos o penas crueles, inhumanas o degradantes (ONU, 2010). Los sistemas urbanos históricamente se han desarrollado según la disponibilidad de agua existente, y no pueden subsistir sin una gestión adecuada que otorgue seguridad hídrica a sus habitantes, especialmente considerando que a nivel mundial la mitad de la población vive en zonas urbanas, y en el caso de Chile el 89% de las personas habita en ciudades (Banco Mundial, 2015).

Sin embargo, el derecho al agua no es reconocido como un derecho humano fundamental, por lo que la idea que tienen las empresas privadas e instituciones financieras sobre el recurso hídrico como un bien económico han convertido a las personas en consumidores/clientes de un bien/servicio accesible a través de los mecanismos de mercado (Bloch, 2004). Esto se enmarca en un contexto de liberalización de la economía y, por lo tanto, liberalización del recurso hídrico, haciendo del agua una mercancía comerciable sobre la cual no debe existir control estatal de importación y exportación de ésta (Organización Mundial de Comercio⁴, 1994). No obstante, esta perspectiva economicista es solo una de las diferentes dimensiones del recurso hídrico, relacionada con su importancia económica para las actividades productivas y su capacidad para generar valor monetario (Aguilera, 2006) por lo que tiende a ignorar que el agua, además de ser un factor de producción, es sobre todo un factor de cohesión social, económico y ambiental (Aguilera, 1996), existiendo una relación dialéctica de interdependencia entre su definición como mercancía y su importancia para la supervivencia, ambas necesarias para el desarrollo y sostenimiento de la economía y de la estructura social (Utton, 1985). En base a lo anterior, la conceptualización del agua puede abordarse desde la importancia que tiene, tanto como factor de producción, como activo financiero y como activo ecosocial (Aguilera, 2001).

Por otra parte, los procesos de urbanización tienen un impacto negativo en el recurso hídrico asociado al cambio en los usos de suelo, generando una pérdida en la capacidad de almacenamiento subsuperficial y de evapotranspiración, ambos fenómenos fundamentales en el balance hídrico natural de una unidad de suelo (Gironás, 2013). Además, las nuevas fuentes contaminantes propias

¹ En adelante: GWP.

² En adelante: ONU.

³ En adelante: CESCR.

⁴ En adelante: OMC.

del desarrollo urbano, como las descargas combinadas de aguas servidas y los contaminantes urbanos “lavados y transportados” por la escorrentía superficial, impactan considerablemente en la calidad de las aguas urbanas (Gironás, 2013). Así, mientras los sistemas urbanos requieren del recurso hídrico para su funcionamiento, sus características generan un impacto negativo sobre el mismo, por lo que se hace necesario un manejo adecuado de las aguas urbanas, cuyo objetivo sea asegurar la cantidad y calidad necesarias del recurso hídrico para sostener los sistemas urbanos, respondiendo a los problemas asociados a la vulnerabilidad hídrica urbana.

De manera general, la vulnerabilidad es la probabilidad de que un sujeto o elemento expuesto a una amenaza natural, tecnológica, antrópica o social, sufra daños o pérdidas al recibir el impacto del fenómeno (Chardon, 2008), siendo el producto del funcionamiento de un sistema complejo generado por procesos que intervienen sobre factores de vulnerabilidad físico/naturales, socioeconómicos, técnicos, político/institucionales y funcionales (Chardon, 2008). Los factores de vulnerabilidad son propios de la comunidad o ligados a su entorno, vale decir, son factores internos y externos respectivamente, por lo que no existen vulnerabilidades pertenecientes a campos específicos, sino que es una sola y, a su vez, está obligatoriamente asociada a una amenaza específica (Chardon, 2008). La vulnerabilidad implica además un elemento temporal, ya que considera la capacidad y dificultad de recuperarse del impacto de la amenaza, por lo que se consideran también las condiciones previas, la respuesta en el momento y la situación posterior al impacto (Chardon, 2008). De esta manera, para el abastecimiento hídrico, la vulnerabilidad implica la susceptibilidad o factor de riesgo interno del sistema o de sus componentes a ser total o parcialmente dañado tras el impacto de una amenaza específica, cuyos daños asociados comprometen la seguridad del suministro de aguas (Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente⁵, 2000).

La presente investigación analiza el caso de la ciudad de Antofagasta, ubicada en el norte de Chile, y la vulnerabilidad de su abastecimiento hídrico. Debido a la escasa disponibilidad de aguas asociadas al contexto de aridez en que se emplaza la ciudad, el suministro hídrico siempre se ha presentado como un desafío para los organismos encargados, buscando e incorporando nuevas fuentes y alternativas para el abastecimiento de forma progresiva a fin de asegurar un suministro óptimo. Hasta el año 2003, la ciudad recibía aguas provenientes únicamente de fuentes de cordillera por medio de su conducción a través del Desierto de Atacama, situación que cambió tras la construcción de la Planta Desaladora de Antofagasta y la incorporación del agua de mar al abastecimiento hídrico de la ciudad, contando actualmente con aguas provenientes ambas fuentes. Se espera que la ciudad de Antofagasta sea abastecida únicamente con agua desalada en un futuro próximo, convirtiéndose en la primera gran ciudad latinoamericana en hacerlo. De esta manera, se analiza el impacto que ha tenido la incorporación del agua desalada en la vulnerabilidad del abastecimiento hídrico de la ciudad mediante la comparación de sus indicadores en los 3 escenarios configurados por la desalación como fuente del recurso hídrico, considerando los cambios derivados de la construcción de la actual Planta Desaladora respecto al abastecimiento únicamente con fuentes de cordillera, y la proyección de una ciudad abastecida completamente con agua desalada.

⁵ En adelante: CEPIS.

2. Caso de estudio

La presente investigación se centra en la vulnerabilidad del sistema de abastecimiento hídrico de la ciudad de Antofagasta, considerando para ello todo el proceso que involucra producir y suministrar este recurso vital hacia la ciudad, desde su captación y tratamiento hasta su distribución en la red de agua potable urbana, en adición a los factores que pueden intervenir en la continuidad del suministro hídrico al impactar en alguno de los componentes de dicho sistema. Dada su extensión desde la costa de la ciudad de Antofagasta hasta la zona cordillerana de la región, el estudio abarca no solo la ciudad, sino también gran parte de la superficie regional, a fin de analizar todos los factores que determinan la seguridad en el abastecimiento hídrico de Antofagasta. Para efectos de la investigación, se describen a continuación las principales características geográficas y la historia del abastecimiento hídrico en la ciudad de Antofagasta, a fin de evidenciar la estrecha relación entre ambas en el marco de la vulnerabilidad hídrica de la ciudad, dando lugar a la problemática que guía esta investigación. Debido a que los alcances del abastecimiento hídrico de la ciudad de Antofagasta es que la escala va más allá de sus límites comunales, ampliándose a gran parte de la región del mismo nombre, pero enfocado únicamente en el abastecimiento de la ciudad en cuestión.

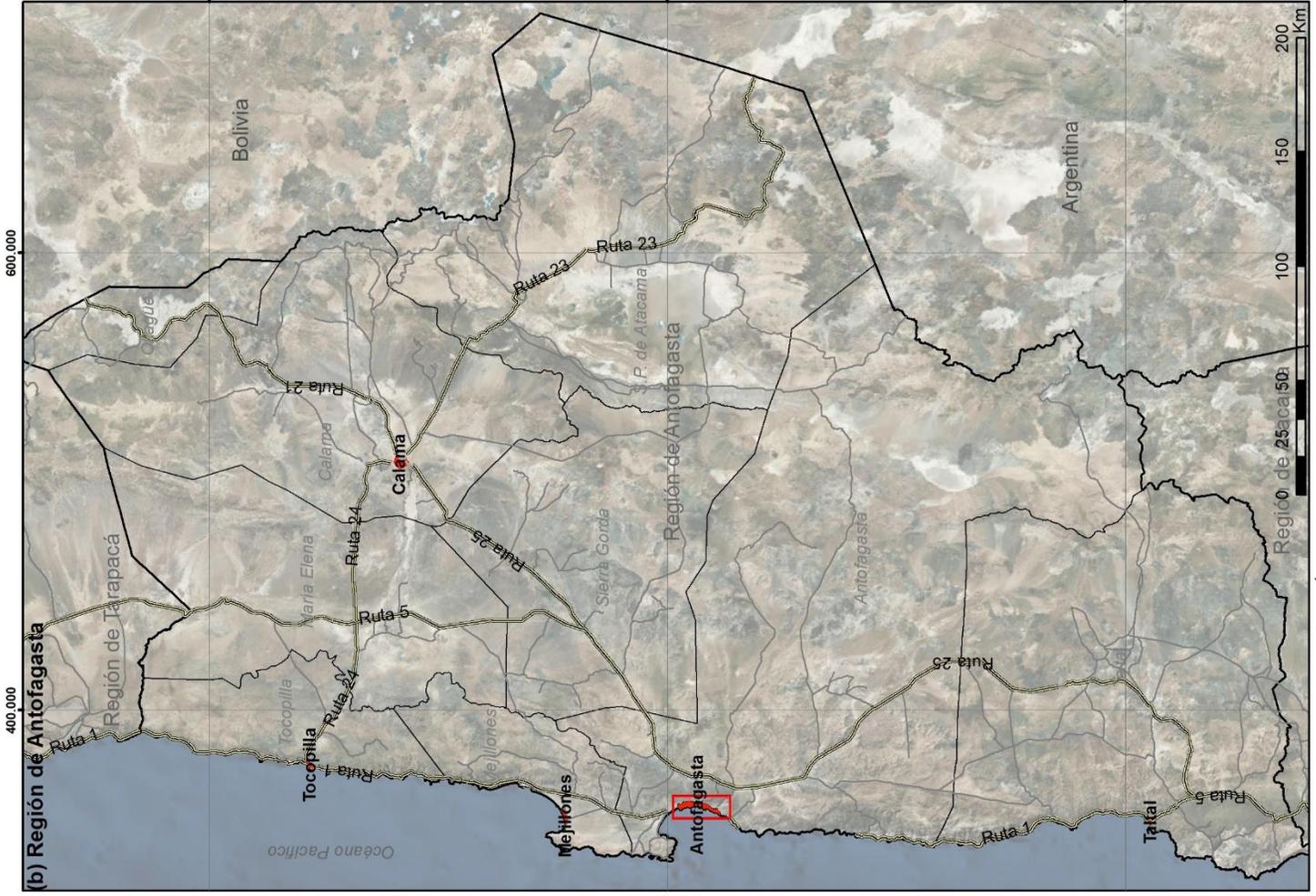
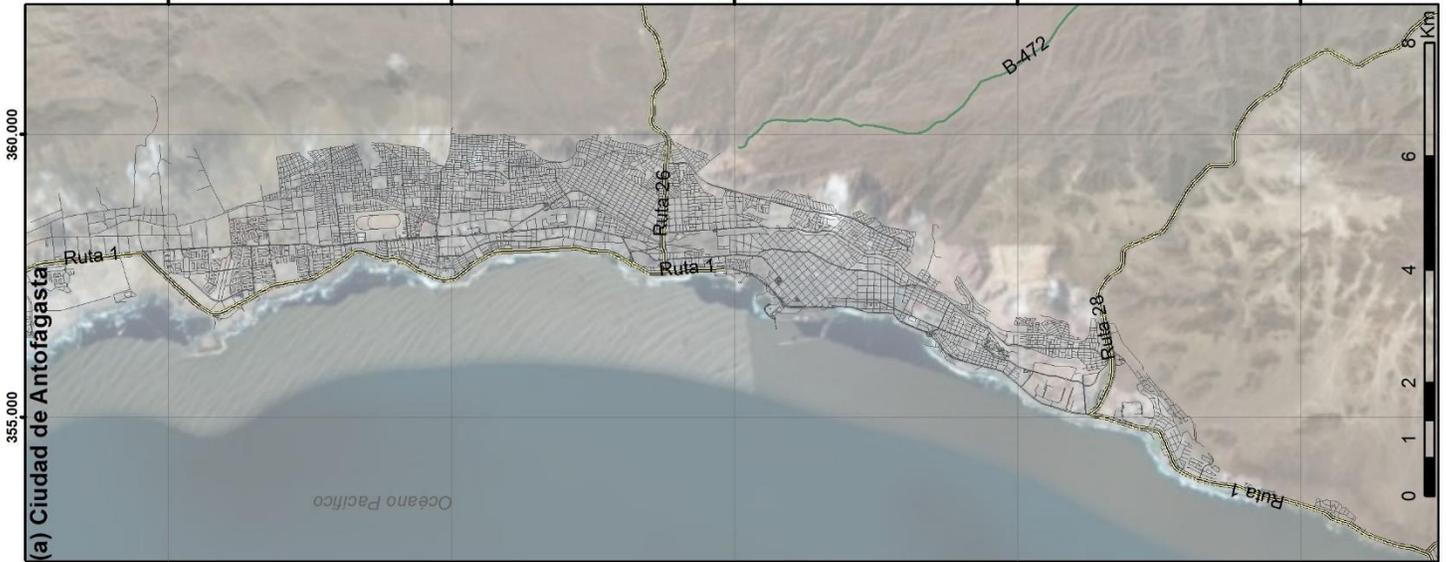
La Región de Antofagasta se ubica entre los 20° 56' y 26° 05' de latitud sur y de los 67° 00' de longitud oeste hasta el Océano Pacífico, limitando al norte y al sur con las regiones de Tarapacá y Atacama respectivamente, y con Argentina y Bolivia en su límite oriental. Decretada como región en 1978⁶, su superficie de 126.049Km² la convierte en la segunda región más extensa del país, representando el 16,7% del territorio nacional. Se divide administrativamente en las provincias de El Loa con capital en Calama, Tocopilla con su capital del mismo nombre, y Antofagasta como capital de la provincia y región del mismo nombre, cuyo centro urbano se localiza en los 23° 38' 29" latitud sur y los 70° 24' 39" de longitud oeste. Tanto la Región de Antofagasta como la ciudad del mismo nombre se muestran en la Cartografía 1. Según la información recabada en el Censo 2017 (Instituto Nacional de Estadísticas⁷, 2017), la Región de Antofagasta posee 607.634 habitantes, lo que representa un 3,5% de la población nacional y con una distribución similar por sexo, mientras que en la comuna de Antofagasta fueron registrados 361.873 habitantes, equivalentes a cerca del 60% de la población regional y posicionándola como la quinta comuna más poblada del país, con predominancia de población masculina por un 52%. La población regional es casi totalmente urbana y se concentra principalmente en el litoral por ser un área de mayor estabilidad, y registra una variación intercensal de un 18,6% para la población regional y un 17,6% para la comuna respecto al Censo 2002.

2.1. Características hidroclimáticas

El clima de la Región de Antofagasta se caracteriza por una marcada aridez, con un desierto manifestado plenamente en la zona intermedia, en donde la baja influencia marítima y la escasa vegetación definen este paisaje. Se identifican 4 subtipos climáticos desérticos localizados en franjas longitudinales, tal como se muestran en el Anexo 1, comenzando desde el clima desértico costero nuboso con abundante humedad, nieblas matinales y ausencia de precipitaciones, característico de la ciudad de Antofagasta, y con un clima desértico interior en la zona intermedia, de aridez extrema, ausencia de humedad y grandes tasas de sequedad y amplitud térmica (Ministerio de Obras

⁶ Decreto de Ley N°2.339 de 1978. Otorga denominación a la Región Metropolitana y a las regiones del país, en la forma que indica.

⁷ En adelante: INE.



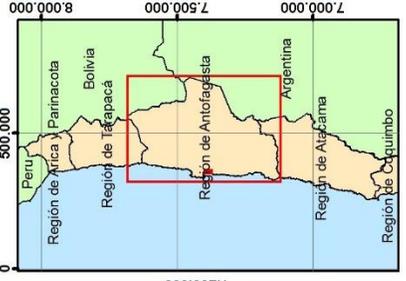
Leyenda

- Áreas Urbanas
- DPA
- Red Vial**
 - Principales
 - Secundarias
 - Calles

Proyección UTM
Datum WGS84
Huso 19S
Escala
1:120.000 (a)
1:2.700.000 (b)



fau
UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS GEOGRÁFICAS Y URBANISMO
Escuela de Pregrado
Departamento de Geografía



Cartografía 1: Área de Estudio
Fuente: Catálogo Nacional de Información Geoespacial (IDE, 2017)

Públicas⁸, 2012). El efecto moderador del Océano Pacífico, intensificado por la presencia de la Corriente de Humboldt y del Anticiclón del Pacífico, generan una estabilidad atmosférica que inhibe las precipitaciones, y los escasos eventos se deben a perturbaciones frontales del cinturón de los vientos del oeste en latitudes medias y altas (Vargas et al., 2000). Por su parte, entre los 2.000 y 3.500 metros sobre el nivel del mar⁹, se identifica un clima desértico marginal de altura, con mayores precipitaciones en los meses de verano, mientras que por sobre los 3.500msnm predomina el clima de estepa de altura, con las mismas características de precipitaciones que el anterior, pero con bajas temperaturas y gran amplitud térmica (MOP, 2012).

Dentro de la hidrología regional, el Río Loa corresponde al principal curso de agua de la región y el más largo de país, con 440Km de longitud y una cuenca de drenaje de 34.000Km². Nace a los pies del Volcán Miño en dirección al sur, pasando por la ciudad de Calama para luego retomar el rumbo al norte hasta Quillagua y seguir al oeste hasta su desembocadura en el Océano Pacífico, a la altura del límite con la Región de Tarapacá (MOP, 2012). Es de régimen pluvial y sus mayores caudales son entre enero y marzo, asociados al invierno altiplánico, permitiendo mantener un caudal durante todo el año para abastecer las actividades agrícola y minera, además del consumo de las principales ciudades de la región. Mientras en periodos secos presenta caudales uniformes a lo largo del año, en periodos húmedos los caudales aumentan en febrero y se reducen entre noviembre y diciembre (MOP, 2012). A su vez los ríos San Pedro de Inacaliri, Salado y San Salvador, afluentes del Río Loa, y los ríos Zapaleri, Vilama y San Pedro, constituyen los principales cauces de la región. Las principales cuencas y sus respectivos cursos de agua se muestran en el Anexo 2. Cabe señalar que, a excepción del Río Loa, la hidrología regional presenta características de completo endorreísmo. Adicionalmente, dadas las características climáticas de la zona, la vegetación es muy escasa, especialmente en la depresión intermedia con el Desierto de Atacama, impidiendo el desarrollo de todo tipo de vegetación a excepción de algunas zonas con napas subterráneas (MOP, 2012).

2.2. Características geológicas

En términos geológicos, la zona de la Región de Antofagasta corresponde a un segmento del flanco occidental de los Andes Centrales, posicionada geoméricamente en un margen continental activo al menos desde el Paleozoico Superior, generando que los procesos ígneos asociados a la subducción de corteza oceánica bajo el continente hayan sido los dominantes en su evolución geológica, en contraste con procesos relativamente restringidos, como la sedimentación y el metamorfismo (MOP, 2012). Los procesos hidrotermales asociados a la actividad ígnea han propiciado múltiples yacimientos metalíferos, principalmente depósitos de cobre, oro y plata distribuidos en 3 franjas asociadas a las macroformas regionales, concentrando los primeros en la Cordillera de la Costa y los otros dos en la Cordillera de Domeyko, mientras que la Cordillera de Los Andes concentra depósitos de hierro, azufre, manganeso y minerales cupríferos. La formación de estos depósitos ocurrió en 3 épocas metalogénicas, siendo el Eoceno Superior-Oligoceno y el Paleoceno las más relevantes al formarse en ellas los depósitos de cobre y los de plata y oro respectivamente. Las unidades geológicas regionales se observan en el Anexo 3. Estas características han sido determinadas por las condiciones de generación magmática en la zona de subducción y por los procesos de las etapas finales del magmatismo félsico (MOP, 2012).

⁸ En adelante: MOP.

⁹ En adelante: msnm.

Respecto a la geología de la zona de la ciudad de Antofagasta, se identificaron depósitos del cuaternario con edades menores a 2,5 millones de años¹⁰ y de origen aluvial, coluvial, eólico y litoral, además de depósitos marinos, litorales, aluviales y eólicos del neógeno, con edades entre los 2,5Ma y 23 Ma. También existen rocas sedimentarias continentales del cretácico inferior, de entre 145Ma y 100Ma de antigüedad, y rocas jurásicas de origen ígneo volcánico e intrusivo, con edades entre 200Ma y 143Ma, siendo las más antiguas identificadas en la ciudad. Se caracteriza por una historia geológica fuertemente influenciada por la tectónica de placas, que ha producido múltiples alzamientos y hundimientos de terreno por regresiones y transgresiones marinas, evidenciadas en los distintos depósitos identificados (Servicio Nacional de Geología y Minería¹¹, 2014).

2.3. Características geomorfológicas

Dado que Chile se ubica en el margen de convergencia de la Placa Continental Sudamericana sobre la Placa Oceánica de Nazca, con una subducción de 8cm/año de tasa de convergencia y activa al menos desde el Jurásico (De Mets et al., 1994; Mpodozis & Ramos, 1989), por lo que las características geomorfológicas del país y de la región se encuentran condicionadas por las macroformas que componen el relieve nacional, tal como se observa en el Anexo 4. La primera es la Cordillera de Los Andes, que se presenta como una estructura alta y maciza, que asciende entre los 1.500msnm y 3.000msnm, caracterizada por un gran plano inclinado de relleno volcánico (MOP, 20012) derivado de la gran actividad volcánica en la zona, siendo la provincia volcánica con mayor densidad de volcanes y centros eruptivos del planeta y una de las más grandes del mundo (González-Ferran, 1995). A su vez, las depresiones intercordilleranas longitudinales dividen la cordillera en una franja oriental con predominio del Altiplano de Atacama, con alturas por sobre los 4.000m concentradas en las cumbres de los complejos volcánicos regionales. También presenta un relieve precordillerano antepuesto que genera depresiones como la del Salar de Atacama, limitando al oeste con la Precordillera de Domeyko y la Cordillera de la Sal. En la zona de la Depresión Andina, al este de Domeyko, se desarrollan depresiones orientadas de norte a sur asociadas al cauce superior del Río Loa por el norte y a la cuenca del Salar de Atacama por el sur (MOP, 2012). La depresión intermedia por su parte está representada principalmente por el Desierto de Atacama, extendido por 300Km de largo entre el Río Loa hacia el norte hasta las sierras Vicuña Mackenna, del Muerto y Pañafiel por el sur, y con un ancho medio de 60Km y alturas entre los 1.500msnm y 600msnm de este a oeste, reuniendo características de extrema aridez, ausencia de agua, vegetación y vida animal que lo convierten en el desierto más árido del mundo. La transición hacia la Cordillera de la Costa es gradual, presentada como un macizo con anchos entre 4Km y 11Km y altitudes medias de 2.000msnm, registrando las mayores alturas del país (MOP, 2012).

El contacto directo de la Cordillera de la Costa con el mar en casi toda la región no permite la formación de planicies litorales, a excepción de las desarrolladas cerca de la península de Mejillones, en donde se emplaza la ciudad de Antofagasta, y que se extiende hasta ser interrumpida al sur de esta, para luego reaparecer de forma continua desde el Sector Caleta El Cobre hasta la Región de Atacama (MOP, 2012). De esta manera, en la zona de la ciudad de Antofagasta existen 3 dominios geomorfológicos principales incluyendo la Cordillera de la Costa, comenzando en la zona occidental con la planicie o franja costera extendida de norte a sur y en donde se emplaza el centro urbano, desarrollada desde el nivel del mar hasta los 250msnm, con pendientes medias de 5° y anchuras

¹⁰ En adelante: Ma.

¹¹ En adelante: SERNAGEOMIN.

que van desde algunos metros en el sector sur a aproximadamente 2Km en el sector del centro de la ciudad, alcanzando su máximo en la zona norte con cerca de 4Km. Consta de una serie de superficies escalonadas de terrazas de abrasión marina con disposición de abanicos aluviales sedimentados sobre ellas. Le sigue en su límite oriental el escarpe costero, con pendientes entre los 15° y 45° y alturas máximas de 700msnm, extendida hasta la Cordillera de la Costa y restringiendo naturalmente la expansión urbana de la ciudad, y aunque se observa a lo largo del área de estudio, presenta atenuación de su pendiente asociada a depósitos aluviales (SERNAGEOMIN, 2014).

2.4. Características socioeconómicas y urbanas

En cuanto a la economía regional, el sector más importante es la minería con cerca del 66% del PIB regional según datos del 2012, seguido en menor medida por la construcción, con cerca de un 10%, y por los sectores de transporte y telecomunicaciones e industria manufacturera, ambos con cerca del 5% cada uno. La minería además representa el 94% de las exportaciones regionales y el 35% del total de exportaciones del país para el mismo año (Banco Central, 2012). De esta manera, la Región de Antofagasta se configura en el segundo lugar de aporte al PIB nacional, con cerca del 10% de representación en este (MOP, 2012). Por otra parte, respecto a la distribución socioeconómica de la población, la Asociación de Investigadores de Mercado¹² (2013), señala que, al igual que a nivel nacional y de la zona norte del país, en la ciudad de Antofagasta predominan el grupo socioeconómico Medio Bajo-D, aunque se destaca que los segmentos socioeconómicos más altos son superiores y los segmentos más bajos son menores en relación con la zona norte y con el país, variando respecto a este último en cerca de un 9% para los grupos C2 y C3, y en un 17% para el segmento E. En general se aprecia una concentración de los estratos más altos hacia el sector sur, mientras que en el resto de la ciudad se distribuye según la tendencia detallada previamente.

Sector	Poli cía	Bom beros	Ctro. Salud	Estab. Educ. ¹³
La Chimba	-	-	1	7 (1)
Bonilla	1	1	6	32 (10)
Balmaceda	-	-	-	3 (2)
Prat	-	-	1	10 (9)
El Salto	-	-	2	-
Ancla	1	2	4	19 (9)
Centro	-	1	2	13 (5)
A. Gran Vía	-	-	-	-
Amarillos	3	4	4	41 (13)
Indepen.	-	-	-	4 (2)
Sur	-	-	-	1
Total	5	8	20	130 (51)

Tabla 1: Infraestructura urbana prioritaria de la ciudad de Antofagasta
Fuente: Catálogo Nacional de Información Geoespacial (IDE, 2017)

La Región de Antofagasta se encuentra conectada con el resto de país por medio de la Ruta 5 Norte, y cuenta con 2 aeropuertos en las ciudades de Calama y Antofagasta respectivamente, además de 6 puertos habilitados a lo largo de la costa regional, siendo los de Mejillones y Antofagasta los con mayor importancia de la región (MOP, 2012). Por su parte, la ciudad de Antofagasta posee conectividad a la Ruta 5 Norte por medio de la Ruta 26 en la parte central, y de la ruta 28 en la zona sur cercana a la Quebrada La Negra, sumadas a la Ruta 1, ubicada en el borde costero de la ciudad y conectando con Mejillones. Respecto al abastecimiento energético, la Región está conectada al Sistema Interconectado Norte Grande¹⁴, que provee de electricidad a la I y II región del país, abarcando también sus centrales generadoras y líneas de transmisión (MOP, 2012). Adicionalmente, como lo muestra la Tabla 1, de la

¹² En adelante: AIM.

¹³ Entre paréntesis se describe la cantidad de establecimientos con dependencia municipal.

¹⁴ En adelante: SING.

infraestructura esencial urbana prioritaria se identifican en la ciudad 5 unidades policiales, 130 establecimientos educacionales, 51 de los cuales son dependientes de la Municipalidad, además de 8 compañías de bomberos, el Hospital Regional, 14 centros de atención primaria y 4 de atención secundaria de salud (Infraestructura de Datos Geoespaciales¹⁵, 2017).

Actualmente, la empresa a cargo de los servicios sanitarios en la región corresponde a Aguas Antofagasta S.A., la cual entrega una cobertura total de distribución de agua potable y tratamiento de aguas servidas para sus áreas urbanas concesionadas, y un 99,8% de cobertura de alcantarillado a nivel regional (Superintendencia de Servicios Sanitarios¹⁶, 2016), abasteciendo una superficie de 31Km² en la ciudad de Antofagasta y dividida en 11 sectores de distribución de agua potable. La empresa posee fuentes subterráneas, superficiales y marinas para el suministro hídrico de la región, siendo estas dos últimas las que abastecen a la ciudad de Antofagasta (González, 2010). Tanto los sectores de distribución de la ciudad como la distribución de los grupos socioeconómicos y la infraestructura urbana prioritaria detalladas previamente se muestran en el Anexo 5. A continuación, se presentan los principales hitos asociados al abastecimiento hídrico de la ciudad de Antofagasta desde su poblamiento hasta la actualidad y sus proyecciones, a través de un análisis histórico de la evolución de la infraestructura, fuentes de abastecimiento, la institucionalidad y los desafíos que plantea el abastecimiento hídrico, considerando las características de disponibilidad deficiente y mala calidad de las aguas, y enfrentando la problemática de abastecer un importante centro urbano en el contexto geográfico del desierto más árido del mundo.

¹⁵ En adelante: IDE.

¹⁶ En adelante: SISS.

3. Historia y antecedentes del abastecimiento hídrico

A continuación, se presentan los principales hitos asociados al abastecimiento hídrico de la ciudad de Antofagasta, desde sus orígenes y crecimiento asociado al desarrollo de la actividad minera hasta los esfuerzos para asegurar un suministro continuo y de calidad desarrollados a lo largo de la historia de la ciudad, todo esto desarrollado en un contexto de escasa disponibilidad hídrica y alta complejidad a la hora de realizar esta difícil tarea en el medio del desierto más árido del mundo.

3.1. Primeros antecedentes de abastecimiento hídrico

El poblamiento de la naciente ciudad de Antofagasta y los primeros esfuerzos para el abastecimiento de agua se encuentran asociados al descubrimiento de yacimientos salitreros en la zona del Salar del Carmen en 1866, y a los inicios de su explotación en 1867, por la Sociedad Explotadora del Desierto de Atacama¹⁷, la que luego formaría parte la Sociedad Melbourne Clark y Cía.¹⁸, principal encargada de la extracción del mineral. En 1868, el explosivo crecimiento demográfico asociado al auge del salitre motivó a la empresa para la construcción de una máquina condensadora de agua de mar de gran capacidad para la época, dotada de 4 calderos y con capacidad de producir 270m³ diarios destinados a abastecer las faenas de la empresa (Maino & Recabarren, 2011). Sin embargo, la producción de la máquina pronto se hizo insuficiente, obligando a apoyar el abastecimiento hídrico con barcos aljibe que transportaban agua desde Coquimbo y Caldera, solucionando momentáneamente el problema (Bermúdez, 1966). La falta del recurso también surgió como una oportunidad para varios empresarios y comerciantes, motivando la construcción de nuevas máquinas condensadoras de agua de mar, llegando a sumar 10 hacia el año 1872, con capacidad de producir 400m³ diarios de agua en conjunto (Maino & Recabarren, 2011), y aunque aumentaron la disponibilidad de agua, seguía siendo insuficiente, por lo que el suministro siguió complementándose con barcos aljibe (Bermúdez, 1966).

Un hito importante para el abastecimiento hídrico de la ciudad de Antofagasta fue la llegada de agua traída directamente desde la cordillera. Tras la adquisición de la Compañía de Salitres y Ferrocarriles por parte de la Compañía Huanchaca (Arce, 1930), y debido al daño de las locomotoras derivado de la mala calidad del agua utilizada, es que se impulsa la construcción de infraestructura para abastecer la ciudad con aguas captadas en un embalse de 30.000ton de capacidad en el Río San Pedro de Inacaliri, en las cercanías de la antigua Estación San Pedro, y conducidas a través del desierto por un acueducto de 340Km de largo y 200mm de diámetro, diseñada para abastecer con hasta 2.500m³ de agua diariamente a la ciudad de Antofagasta (Maino & Recabarren, 2011). En 1892 llega por primera vez agua dulce desde la cordillera hasta la ciudad de Antofagasta, y aunque aumentó significativamente el suministro hídrico y redujo el costo de producción, no existía una red de distribución que abasteciera a toda la población, dando paso a la aparición de revendedores de agua y aumentando el costo a sus consumidores finales, por lo que las máquinas condensadoras continuaron complementando la oferta hídrica (Maino & Recabarren, 2011).

¹⁷ Formada en 1866 por José Santos Ossa, industrial minero y comerciante chileno originario del Valle del Huasco, y Francisco Puelma Castillo, ingeniero y abogado chileno asociado al salitre, esta sociedad fue pionera en la explotación del mineral en la zona de Antofagasta. (Maino & Recabarren, 2011).

¹⁸ Melbourne Clark y Cía. fue la principal empresa encargada de la explotación del salitre en sus inicios, y tras la adquisición de la concesión para la construcción de un ferrocarril hasta Bolivia, se transformó en la Compañía de Salitres y Ferrocarril de Antofagasta (Bermúdez, 1960).

3.2. Escasez y problemas con el arsénico

La llegada de aguas desde el Río San Pedro de Inacaliri trajo consigo la aparición de problemas de salud asociados a su mala calidad y a las altas concentraciones de minerales tóxicos que la hacían no potable ni apta para su consumo doméstico, ya que se asociaba a malestares y enfermedades como el tifus y la viruela, lo que llevó a la población a exigir que se adoptaran medidas para mejorar la calidad y cobertura del suministro, asegurando que éste no significara un riesgo a la salud pública (Maino & Recabarren, 2011). Una de las medidas adoptadas fue la incorporación de nuevas fuentes de agua, mezclando las aguas del Río San Pedro con las del Río Polapi en 1901, los ríos Palpana, Puquios y Silala¹⁹ en 1904 (Arce, 1930), y del Río Colana en 1905, aumentando la capacidad de abastecimiento hídrico hasta los 7.000m³ diarios (Maino & Recabarren, 2011). Adicionalmente, en enero de 1904 se decretó la prohibición del comercio de agua a granel, permitiéndose su comercialización sólo en envases sellados, y en 1905 comienza la construcción del sistema de alcantarillado para captar las aguas residuales de la ciudad. El consecuente aumento en la demanda hídrica para uso doméstico generado por la implementación de esta nueva infraestructura, sumado al alto costo del agua dulce, obligaron al municipio a buscar alternativas más económicas de abastecimiento, por lo que en 1908 se comenzó a extender una red con suministro de agua de mar junto a las cañerías de agua dulce, distribuida desde dos estanques de 4.500m³ en total y utilizada para el lavado de cañerías de alcantarillado, lavado de calles, incendios y servicios higiénicos (Maino & Recabarren, 2011). Para presidir y administrar esta nueva infraestructura, la Municipalidad creó los Servicios de Alcantarillado y Agua de Mar (Arce, 1930).

En 1914 entró en operaciones la primera captación desde el Río Silala, y se inauguró una nueva aducción de agua dulce desde los Estanques del Río San Pedro hasta la ciudad de Antofagasta, aumentando su capacidad a 7.500m³ diarios de producción de agua dulce (Aguas Antofagasta, 2011a). Además, el descubrimiento y explotación de cobre en Chuquicamata motivó a la empresa a construir su primera captación desde el Río Linzor en 1918 (Maino & Recabarren, 2011). Ya en 1938, la Compañía de Ferrocarriles Antofagasta-Bolivia construyó una segunda cañería desde el Río Silala a los Estanques del Río San Pedro, aumentando su capacidad de producción y mejorando especialmente la situación de Calama y de los poblados intermedios abastecidos por las aducciones de la compañía, además de dejar mayores excedentes para abastecer la demanda de la ciudad de Antofagasta (Maino & Recabarren, 2011). Hasta ese momento, las captaciones poseían una capacidad en conjunto de 28.000m³ diarios, equivalentes a un caudal cercano a los 324L/s.

Aunque la incorporación de nuevas captaciones y la construcción de nuevas conducciones de agua dulce aumentó considerablemente la disponibilidad de agua dulce, su incremento no era proporcional al crecimiento demográfico asociado al auge de las actividades extractivas desarrolladas en la zona durante la primera mitad del siglo XX (Maino & Recabarren, 2011). En 1945, debido a la escasez hídrica para abastecer la ciudad de Antofagasta, se construyó una nueva aducción desde el Río Linzor para abastecer completamente a Tocopilla y María Helena, y parcialmente a Calama, dejando así mayor caudal para aportar a Antofagasta. La insuficiencia en el abastecimiento y la escasez de agua en la ciudad se tornó crítica en 1947, momento en el que se

¹⁹ Existen discrepancias en cuanto al nombre de este curso de agua, ya que antiguamente en Chile se le nombraba como “Río Siloli”, mientras que en Bolivia siempre le han llamado “Río Silala”. Sin embargo, tras la demanda presentada por el Gobierno Boliviano por la soberanía sobre este río, ambos gobiernos han coincidido en llamarle “Río Silala”, siendo entonces el utilizado para referirse a dicho río en el presente trabajo.

estimaba un déficit diario de 2.000m³ de agua para cubrir la demanda urbana, por lo que el racionamiento de agua se acrecentó (Maino & Recabarren, 2011). El crecimiento en la producción de agua estaba limitado por el congelamiento de su precio y la entrega gratuita del suministro al municipio (Bermúdez, 1966), y aunque la compañía ofrecía aumentar a 20.000m³ la disponibilidad diaria de agua, suficiente para asegurar el abastecimiento por 30 años, a cambio de modificar el precio de venta, la respuesta del gobierno siempre fue negativa, principalmente debido al costo político y al descontento social que implicaría un aumento en la tarifa (Maino & Recabarren, 2011).

Los problemas de abastecimiento hídrico derivaron en un descontento generalizado de la población local, y tras la presión ejercida al gobierno central, este ordenó en 1948 el comienzo de los estudios para la construcción de una nueva captación y aducción, esta vez desde el Río Toconce. Debido a problemas en el trazado y la materialidad de la aducción, en 1952 se realizó una fallida demostración de la nueva cañería, en donde gran parte terminó destruida. Este fracaso significó un importante retraso en las obras para aumentar el suministro hídrico de la ciudad, y tras el cambio de gobierno, en 1954 se retomó la construcción de la aducción, inaugurada finalmente en 1958, y con capacidad de captar y conducir hasta 610L/s, aportando a la ciudad un máximo de 52.000m³ diarios, y complementado posteriormente con un trasvase de aguas desde el Río Hojalar en 1962 (Maino & Recabarren, 2011). No obstante, aunque el Río Toconce aumentaba y aseguraba el suministro de agua dulce, también posee la concentración de arsénico inorgánico más alta entre las fuentes de abastecimiento hídrico de Antofagasta, por lo que su incorporación al abastecimiento hídrico trajo consigo un considerable incremento en las concentraciones de arsénico en el agua, aumentando cerca de 8 veces respecto a las fuentes de abastecimiento anteriores a la Captación Toconce²⁰. Hacia finales de 1960 se incrementaron la preocupación y las campañas por los peligros de la presencia de arsénico en el agua para la salud pública, especialmente como causante de cáncer en la población y de las altas tasas de mortalidad infantil (Maino & Recabarren, 2011).

Como parte de las medidas adoptadas para mitigar este problema, el gobierno central implementó una planta de abatimiento de arsénico en el Salar del Carmen en 1970, reduciendo inmediatamente los niveles de arsénico hasta 0,12mg/L (Maino & Recabarren, 2011) y cumpliendo las exigencias de la normativa de calidad del agua dictaminada ese mismo año²¹. La planta fue diseñada con una capacidad de producción de 500L/s, pudiendo suministrar a la ciudad hasta 43.000m³ diarios de agua potable (SISS, 2017), mejorando notablemente la calidad del suministro y reduciendo los riesgos a la salud derivados del consumo de arsénico. Adicionalmente, en 1972 entró en funcionamiento una nueva captación desde el Río Lequena, ayudando a abastecer principalmente la demanda hídrica de Calama y Tocopilla (Aguas Antofagasta, 2011a), y se implementó una nueva planta de abatimiento de arsénico, conocida como Planta de Filtros Cerro Topáter, en la ciudad de Calama, iniciando sus operaciones en 1978 y destinada a mejorar la calidad del suministro en la ciudad y en el eje hasta Tocopilla²² (Maino & Recabarren, 2011). En 1981 comenzó la llegada de

²⁰ Previo a las operaciones de la Aducción Toconce, la compañía FCAB era la encargada de abastecer con agua la ciudad, cuya presencia de arsénico rondaba entre los 0,09 y 0,12mg/L. Por su parte, el Río Toconce concentra naturalmente 0,85mg/L de arsénico, por lo que su incorporación como fuente de abastecimiento hídrico aumentó los niveles de arsénico hasta las 860ppb (Maino & Recabarren, 2011).

²¹ NCh 409/Of. 70 de calidad del agua potable, 1970.

²² Tras la reducción en los niveles de arsénico permitidos por la modificación de la NCh 409 en 1984, las plantas debieron ajustar sus procesos para cumplir con los 0,05mg/L permitidos por la nueva legislación, logrando reducir sus concentraciones y cumplir la normativa sin mayores complicaciones (Maino & Recabarren, 2011).

agua desde la Captación Lequena hasta la ciudad de Antofagasta, y en 1989 entra en operaciones una nueva captación, esta vez desde las aguas del Río Quinchamale, aportando un caudal de 350L/s a la red de suministro de agua potable. Las dos nuevas aducciones se integraron al sistema de abastecimiento por medio de la mezcla con las aguas provenientes del Río Toconce al interior del recinto de la Planta de Filtros Cerro Topáter, y debido a la menor concentración de arsénico en las nuevas fuentes, su incorporación ayudó a reducir naturalmente los niveles de arsénico en el agua (Maino & Recabarren, 2011). Ese mismo año fue la puesta en marcha de la una nueva planta de filtros en el Salar del Carmen, concebida para añadir 500L/s al suministro de agua de la ciudad, lo que permitió reducir los niveles de arsénico a menos de 0,05mg/L (Maino & Recabarren, 2011), inferior a lo establecido por la normativa de la época. La nueva planta de abatimiento de arsénico, en conjunto con las dos plantas existentes, permitían procesar hasta 1.500L/s del suministro de agua de cordillera en la Región de Antofagasta.

3.3. Avances en el abastecimiento y el agua desalada

Para 1990 se estimaba un retraso de al menos 20 años en inversión para el desarrollo de los servicios sanitarios en la región²³, por lo que la prioridad era asegurar un abastecimiento las 24 horas del día a las ciudades costeras, y tras una serie de mejoras de las instalaciones sanitarias, en 1992 Antofagasta pudo gozar del suministro todo el día (Maino & Recabarren, 2011). Posteriormente, en 1996, fue implementada una nueva captación desde el Río Loa en su paso por el interior de Calama, a cerca de 1Km al oeste de la Planta de Filtros Cerro Topáter, con capacidad de aportar hasta 150L/s a la mezcla de aguas captadas en la cordillera (SISS, 2006). Hasta este punto, la demanda hídrica de la ciudad de Antofagasta era abastecida sin problemas con agua de cordillera (Empresa de Servicios Sanitarios de Antofagasta²⁴, 1998) con altos estándares de calidad, cumpliendo desde principios del 2003 con la recomendación de la Organización Mundial de la Salud²⁵ de un máximo de 0,01mg/L de concentración de arsénico en el agua (Sistemas de Empresas²⁶, 2003). Además, tras la incorporación de la última captación en el Río Loa, la capacidad de captación aumentó a un caudal máximo de 1.836L/s desde sus diferentes fuentes de cordillera, pero la cantidad de agua aportada al sistema de abastecimiento regional dependía de su disponibilidad, por lo que su aporte es menor.

Como una medida ambiciosa para aumentar la disponibilidad de agua potable y para asegurar el suministro hídrico a la ciudad de Antofagasta, se iniciaron los estudios para la construcción de una planta desaladora en el sector de La Chimba, al norte de la ciudad, ingresando al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental²⁷ a finales de 1999 un primer proyecto que fue desistido y vuelto a presentar al año siguiente, siendo nuevamente abandonado²⁸. El proyecto definitivo fue presentado en junio y aprobado en septiembre de 2001, iniciando su implementación ese mismo año por luego de que la empresa de capitales españoles INIMA (GS INIMA, s/f), se adjudicara la licitación de su construcción y estableciera un contrato de operaciones por 7 años. La Planta Desaladora de Agua de Mar de Antofagasta, también denominada “La Chimba”, comenzó sus operaciones en abril de 2003, y si bien su implementación estaba proyectada para tener una

²³ Extraído de la entrevista realizada a Aurora Williams (2009), transcrita en Maino & Recabarren (2011).

²⁴ En adelante: ESSAN.

²⁵ En adelante: OMS.

²⁶ En adelante: SEP.

²⁷ En adelante: SEIA.

²⁸ Según información disponible en el sitio del Servicio de Evaluación Ambiental.

capacidad de producir 602L/s para abastecer al eje Antofagasta-Mejillones, su planificación y puesta en marcha se realizó en etapas, comenzando a operar al 25% de su capacidad (González, 2010), y aumentando su capacidad con la ejecución de 3 ampliaciones en 2005 (SEP, 2003), 2007 y 2011 respectivamente (Aguas Antofagasta, 2007; 2011b), aportando cada una 150L/s más al caudal de producción de la planta hasta alcanzar la capacidad completa de diseño (ESSAN, 2001a).

Además de la infraestructura correspondiente a la planta desaladora, el proyecto contemplaba la construcción de una impulsión de agua potable de 13Km de extensión hasta el recinto de los Estanques Ancla, y la construcción del Estanque La Chimba y su correspondiente impulsión a poco más de 2Km de la planta (ESSAN, 2001a). El aumento en la producción tras la implementación de las diferentes fases de la desaladora implicaba seguir incrementando su capacidad de abastecimiento, por lo que en 2006 fue construida una nueva impulsión desde la existente de la desaladora hasta los Estanques Bonilla (Aguas Antofagasta, 2006), y en 2008 una nueva cañería vino a sumarse al sistema de abastecimiento hídrico, ésta vez para conectar los Estanques Ancla con los Estanques Amarillos (Aguas Antofagasta, 2008), pasando ahora a abastecerse, al igual que los Estanques Ancla y Bonilla, con la mezcla de agua de cordillera con agua desalada. Con este nuevo suministro cambiaron también las fuentes de abastecimiento hídrico de la ciudad, pasando de fuentes únicamente cordilleranas a la existencia de 3 tipos de agua. De esta forma, mientras una parte de la ciudad seguía abasteciéndose con la tradicional fuente cordillerana, el resto lo hacía con aguas desaladas o a partir de la mezcla de ambas fuentes.

Adicionalmente, la empresa sanitaria llevó a cabo el proyecto presentado el 2013 y aprobado en 2014, de implementar una nueva ampliación que sumaría 250L/s de caudal a la capacidad de tratamiento de la Planta Desaladora, elevando su producción hasta los 850L/s (Aguas Antofagasta, 2013a) a partir de noviembre de 2016, por lo que actualmente el 85% de la demanda hídrica de la ciudad de Antofagasta es abastecida con agua desalada. Actualmente Aguas Antofagasta tiene como objetivo que el 100% del suministro hídrico hacia la ciudad de Antofagasta sea a partir de agua desalada al año 2020 (Revista Técnicos Mineros²⁹, 17-10-2016), por lo que los planes y proyectos apuntan hacia completar el caudal producido actualmente al reemplazar el 15% aportado por las fuentes de cordillera. En septiembre del 2011 fue presentado el proyecto para la construcción de una nueva planta desaladora en el sur de la ciudad, diseñada para producir 1.000L/s de agua (Aguas Antofagasta, 2011c), y su construcción fue aprobada en septiembre de 2012. Sin embargo, el proyecto fue finalmente retirado, aunque los planes para la construcción de una nueva planta para completar la capacidad de abastecimiento hídrico de Antofagasta persisten, buscando convertirla en la primera gran ciudad latinoamericana abastecida únicamente con agua desalada, conservando además la infraestructura de aguas de cordillera como respaldo del sistema (RTM, 17-10-2016).

El Gráfico 1 resume los principales hitos en el abastecimiento hídrico de la ciudad de Antofagasta, relacionados con la incorporación de nuevas fuentes de suministro hídrico mediante la construcción de captaciones, y con la implementación de infraestructura de producción para la potabilización del agua, en contraste con el crecimiento demográfico registrado en la ciudad desde sus orígenes hasta la actualidad. Se observa que el crecimiento de la capacidad de captación de agua durante la primera mitad del siglo XX no se condice al incremento de la población de la ciudad en dicho periodo, situación que se comenzó a solucionar a partir de la incorporación de la Captación Toconce en 1958

²⁹ En adelante: RTM.

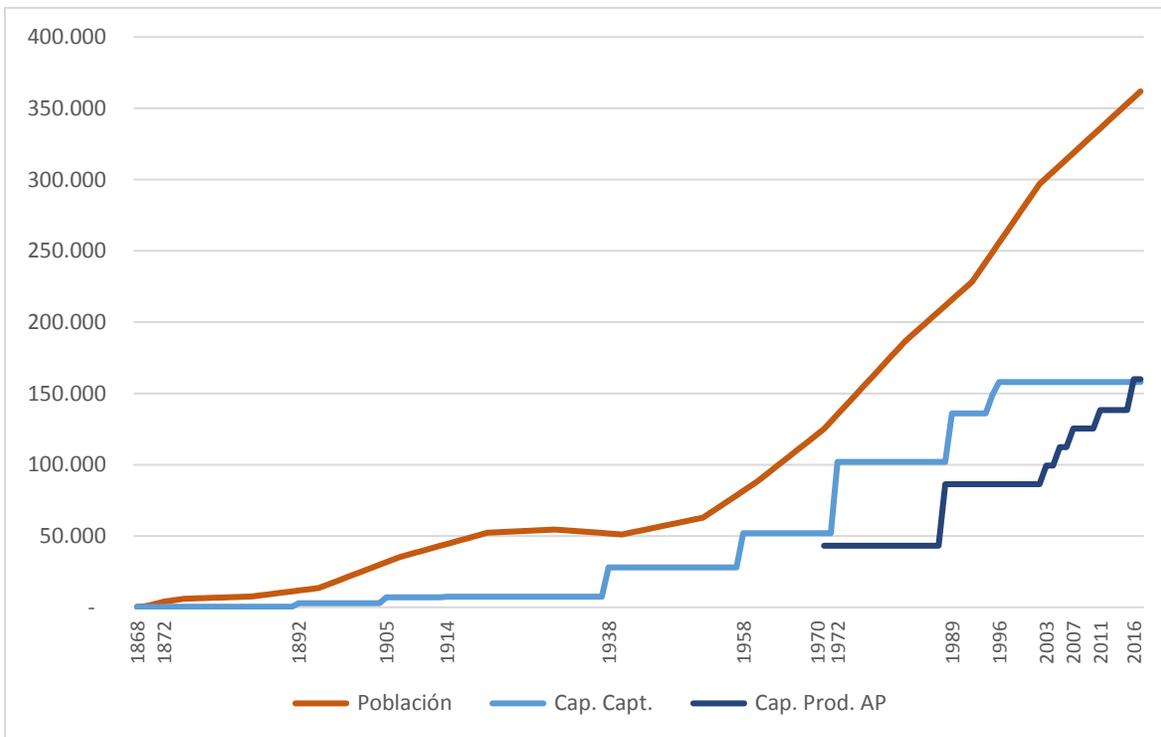


Gráfico 1: Evolución de la capacidad de abastecimiento hídrico ($m^3/día$) respecto al crecimiento demográfico de la ciudad de Antofagasta, desde 1868 hasta la actualidad.

Fuente: Elaboración propia en base a Arce (1930), Bermúdez (1966), ESSAN (2001a), Maino & Recabarren (2011), Aguas Antofagasta (2013a), INE (s/f; 2013; 2017) y SISS (2006; 2017)

y las captaciones construidas con posterioridad, aunque este aumento de disponibilidad hídrica tampoco fue acorde al crecimiento demográfico sostenido experimentado por la ciudad a partir de dicho año. Por otra parte, solo se puede hablar de suministro con agua potable propiamente tal a partir de la década de 1970 con la construcción de la primera planta de filtros del sistema de abastecimiento y sus homólogas posteriores, destacándose un giro respecto a la creación de infraestructura para el suministro de agua de cordillera, estancada desde la década de 1990, para enfocarse en la desalación como fuente primaria. Esto explica que la capacidad de captación permanezca estática hace más 20 años, mientras se observa el sostenido aumento de la capacidad de producción de agua potable a partir de 2003 con la construcción de la Planta Desaladora de Antofagasta y sus ampliaciones posteriores en una curva similar a la del crecimiento poblacional. De esta manera, el histórico problema del suministro hídrico en la ciudad de Antofagasta ha sido enfrentado a partir de la incorporación y diversificación de sus fuentes de abastecimiento, aunque la efectividad de estas medidas pueda ser cuestionable desde su planteamiento hasta sus consecuencias generadas, poniendo en juicio lo expuesto por la empresa sobre su capacidad continua de abastecimiento con aguas de calidad y dando paso al desarrollo e interpretación de la problemática de la presente investigación.

4. Planteamiento del problema

A nivel nacional ha existido un cambio de paradigma de la relación entre las ciudades y el recurso hídrico, pasando de una visión “sanitaria” dominante en el siglo pasado y enfocada en la evacuación de aguas de desecho, a la percepción del agua como un recurso siempre necesario para las urbes (Gironás, 2013). El abastecimiento hídrico de la ciudad de Antofagasta se ha presentado históricamente como un problema y un desafío para los distintos organismos agrupados en torno al suministro hídrico en sus diferentes etapas, debido principalmente a las condiciones geográficas que en general han determinado la cantidad y calidad del agua disponible, y la respuesta a esto ha sido siempre abordada desde la gestión del recurso hídrico, con el mayor reto y urgencia que le entregan las zonas áridas debido a la escasez y fragilidad ambiental del recurso hídrico y a la urgencia que demandan las poblaciones involucradas (Pizarro, 1999). El objetivo central de la gestión de las aguas urbanas es generar las condiciones para garantizar la seguridad hídrica y satisfacer las necesidades básicas de agua de una ciudad, además de la conservación y el uso sustentable de los ecosistemas acuáticos y terrestres (Ávila, 2008). La seguridad es inversamente proporcional a la vulnerabilidad hídrica, asociada a la exposición a factores de riesgo y amenazas que podrían impactar en el abastecimiento hídrico, por lo que el suministro de agua se puede asegurar en la medida que la vulnerabilidad del sistema lo permita. Sin embargo, el modelo tradicional de gestión de aguas en las ciudades no distingue entre las distintas calidades y usos del recurso hídrico, por lo que el agua de buena calidad es destinada a satisfacer las necesidades indiscriminadas que tienen las zonas urbanas, lo que ha aportado a agudizar la escasez del recurso hídrico (Van der Steen, 2006) debido a que los planes de gestión, si bien pueden integrar la planificación urbana y su suministro y saneamiento de aguas, no consideran adecuadamente la interdependencia entre el agua dulce, el agua residual, el control de inundaciones y el agua pluvial (Tucci, 2010).

De esta manera, la creciente escasez de agua y la sobreexplotación de reservas hídricas convencionales han llevado a la búsqueda de nuevas fuentes de suministro, por lo que la gestión de los recursos hídricos ha tendido más a aumentar la cantidad de agua disponible que a realizar un manejo coherente respecto a las características y necesidades específicas en el abastecimiento hídrico. La creciente integración de nuevas fuentes de aguas de cordillera a lo largo del siglo pasado, en conjunto con la implementación de la Planta Desaladora de Antofagasta, han contribuido a perpetuar este enfoque, ya que esta última, además de su gran capacidad de producción y su posicionamiento actual como la principal fuente de agua potable, permite liberar una gran cantidad de caudal de agua de cordillera para su uso en la industria minera (Banco Interamericano de Desarrollo³⁰, 2003). En suma, si bien el aumento en la disponibilidad de aguas ha respondido al aumento de la población urbana y su consecuente demanda hídrica, su motivación pasa también por la creciente demanda para su uso industrial, considerando para ello las limitaciones hidroclimáticas y el potencial del agua de mar para ser una fuente ilimitada de suministro hídrico y una alternativa a la escasez (Cooley et al., 2006).

En contraste con esta visión, se espera que los modelos de gestión de aguas urbanas aborden el recurso hídrico desde un enfoque integrado, optando por un manejo de los sistemas de aguas como parte de una estructura coherente que mejore su disponibilidad, el acceso y una reducción de los conflictos socioambientales asociados al agua (Srinivas, 2009), y mediante la aplicación de un

³⁰ En adelante: BID.

enfoque ecológico, realizar esfuerzos para su conservación a través de una planificación sensible al tema hídrico, y al control y manejo de aguas pluviales y residuales (GWP, 2011). Un modelo integral de gestión de aguas urbanas también requiere del establecimiento de un contexto favorable, integrando apropiadamente actores públicos y privados en un marco político y legislativo coherente que apoye la gestión (GWP, 2011), además de un esfuerzo en la educación pública y cooperación para generar un cambio cultural y de comportamiento necesarios para una adecuada gestión de las aguas urbanas (Najjar & Collier, 2011). En cuanto a las alternativas para una adecuada gestión hídrica en zonas áridas, éstas apuntan a la inclusión del tema en las agendas públicas y en las propuestas de desarrollo, tanto nacional como local, y a la autonomía de los organismos operadores, encargados del manejo del recurso hídrico, en términos del control de tarifas, inversiones, etc. (Centro Mario Molina, 2013).

Complementariamente, el desarrollo y la implementación de nuevas tecnologías es un factor fundamental en la gestión hídrica para aumentar la productividad de las compañías y optimizar las condiciones operativas de la red (Bhave, 1991), y en el contexto de la ciudad de Antofagasta se manifiesta fuertemente al tener la Planta Desaladora como fuente principal del suministro de agua potable. Esta relación de dependencia y el papel desempeñado por la tecnología puede interpretarse bajo dos percepciones, ya que, si bien esta ha contribuido como un elemento clave en el desarrollo de los niveles de bienestar de las sociedades humanas, también se constituye como un factor que puede suponer graves riesgos para las personas y el resto de los seres vivos debido a su capacidad destructiva (Saurí, 1995). Además, la dependencia tecnológica implica la necesidad de que la tecnología funcione adecuadamente para satisfacer la necesidad para la que fue implementada (Boon, 1977), lo que para Antofagasta se traduce en la necesidad de que la planta desalinizadora no presente fallas para asegurar el suministro de agua para la mayor parte de la ciudad. La dependencia tecnológica que implica la producción de agua potable hace que sus fallas impacten considerablemente a la población, siendo evidente en casos como la crisis del agua que afectó a la ciudad en 2011, dejando sin suministro a más de la mitad de los hogares de la ciudad debido a la contaminación del agua en la planta desalinizadora (El Mercurio de Antofagasta, 04-03-2011), o la reciente catástrofe por aluviones en marzo de 2015 que afectó a la región en general, y que pudo significar un impacto mucho mayor para la ciudad en particular (Pereira, 26-03-2015).

La gestión del recurso hídrico para el abastecimiento de la ciudad de Antofagasta, a cargo de la empresa sanitaria, debe velar por asegurar la continuidad y calidad del suministro de aguas destinado a la ciudad. Pese a que la desalación de agua como fuente de abastecimiento hídrico se presenta como una solución y una alternativa sustentable para asegurar la disponibilidad hídrica de la ciudad y con un impacto positivo al medio ambiente (Martín & Sánchez, 2002), los problemas asociados a su incorporación derivados del elevado costo energético del proceso, sumado al uso de combustibles fósiles para la generación de la electricidad utilizada con sus respectivos impactos sobre el ecosistema, que incluyen contaminación atmosférica, del agua y del suelo, además de la emisión de gases asociados al cambio climático, afectan en la calidad de vida de las personas y ponen en cuestión la sustentabilidad de la desalación. La completa dependencia de grandes cantidades de energía implica además una alta susceptibilidad e inestabilidad de los costos asociados, lo que se ha traducido en que la ciudad posea el suministro de agua potable más caro del país (La Nación, 04-07-2010). Así, al aumentar la disponibilidad hídrica en la ciudad de Antofagasta, aumentan también los factores de vulnerabilidad a los que se expone el sistema de abastecimiento de aguas de la ciudad.

Según lo expuesto anteriormente, la problemática identificada para el área de estudio corresponde a la vulnerabilidad del sistema de abastecimiento de aguas en función de la capacidad de la empresa sanitaria para asegurar el suministro hídrico de la ciudad de Antofagasta, considerando la evolución que han tenido las fuentes del recurso y sus respectivas implicancias para la seguridad hídrica. En este sentido, dada la naturaleza de cada fuente de agua, sus características particulares determinan los diferentes factores que podrían comprometer la continuidad del suministro hídrico, por lo que la incorporación de nuevas fuentes del abastecimiento implica una variación en la vulnerabilidad del sistema en sí mismo y, por lo tanto, de la seguridad hídrica de la ciudad. Debido a esto, la evolución de la vulnerabilidad se analiza desde tres escenarios caracterizados por la dependencia de diferentes fuentes de abastecimiento, pasando desde fuentes únicamente cordilleranas hasta el escenario actual de fuentes mixtas de abastecimiento, y apuntando a un escenario futuro con fuentes exclusivamente marinas.

4.1. Pregunta de investigación

De esta manera, y basado en los antecedentes señalados, se propone responder a la siguiente pregunta de investigación:

¿Cómo han impactado los cambios de las fuentes de aguas en la vulnerabilidad del sistema de abastecimiento hídrico de la ciudad de Antofagasta?

4.2. Objetivos

4.2.1. Objetivo General

Analizar la vulnerabilidad del sistema de abastecimiento de agua potable de la ciudad de Antofagasta y su evolución con respecto a las diferentes fuentes de suministro hídrico.

4.2.2. Objetivos Específicos

1. Caracterizar el sistema de abastecimiento hídrico, su evolución y vulnerabilidad operativa.
2. Analizar las amenazas que determinan la vulnerabilidad del sistema de abastecimiento hídrico
3. Evaluar la vulnerabilidad física y administrativa del sistema, así como sus impactos en el servicio de agua potable de la ciudad.

II. Marco de referencia

5. Marco Teórico

A continuación, se presentarán los elementos teóricos considerados que sustentan la presente investigación, y que permiten analizar el impacto de la desalación sobre el abastecimiento hídrico de la ciudad de Antofagasta y sus parámetros de vulnerabilidad. En primera instancia, se analizan las características de la gestión de aguas urbanas a partir de la importancia del recurso hídrico para las ciudades y las dificultades que se presentan en las zonas áridas, además de una revisión del marco normativo e institucional que rigen el abastecimiento hídrico a nivel nacional. Posteriormente, se revisan los conceptos de riesgo, amenaza y vulnerabilidad, su aplicación en el abastecimiento hídrico y su evaluación mediante indicadores de vulnerabilidad, profundizando además en la mitigación de los efectos asociados a los conceptos tratados. Por último, se realiza una revisión del manejo de emergencias y las responsabilidades atribuidas a los actores involucrados en ellas, y en la misma línea que la mitigación de la vulnerabilidad, se analizan los procedimientos para el manejo de emergencias y las recomendaciones para reducir los efectos de la ocurrencia de eventos que impacten al abastecimiento hídrico. De esta manera, el marco teórico propuesto conecta la gestión de las aguas urbanas y la conceptualización de factores de riesgo asociados, con el análisis institucional y normativo propuesto por las Guías para la elaboración del análisis de vulnerabilidad del CEPIS (1990), sentando las bases para abordar la problemática propuesta en la presente investigación.

5.1. Gestión de aguas urbanas

Tal como fue señalado en el planteamiento del problema, la gestión de aguas urbanas debe asegurar la continuidad del suministro hídrico de las ciudades, haciendo frente a la vulnerabilidad del sistema y a los factores que puedan comprometer su capacidad de abastecimiento. A continuación, se analizan las características de la gestión del agua, desde su papel en el desarrollo de las ciudades y en el contexto de Antofagasta, considerando además una revisión del marco normativo e institucional asociados al recurso hídrico.

5.1.1. Ciudades, ecosistemas y aguas urbanas

Los ecosistemas son sistemas complejos en los que ocurren interacciones de los seres vivos entre sí y con el conjunto de elementos no vivos que conforman el ambiente, requiriendo para su funcionamiento de fuentes de energía y del movimiento continuo de los materiales que lo constituyen (Echarri, 2007). Según lo anterior, Antequera (2005) define que, desde una perspectiva sistémica, la ciudad puede concebirse como una especie de ecosistema social donde existe una acumulación de seres humanos e interacciones entre individuos, que determinan un orden emergente y un intercambio de información entre ellos. Amaya (2005) agrega que, aunque no es posible hablar de una simbiosis entre lo natural y lo artificial, si existe una relación entre ambos en un espacio determinado definido como espacio urbanizado o ecosistema urbano, que agrupa la relación entre lo existente previamente y lo construido por el hombre en espacios definidos como parcialmente naturales, parcialmente construidos, de relaciones mutuas y, a veces, de dependencia, especialmente entre la ciudad y su entorno por ser este último el espacio vital que suministra los insumos naturales necesarios para la vida urbana.

Las ciudades se caracterizan por ser sistemas complejos dado que existe una organización de la variedad de sus componentes, son autorreguladas, tienen características de multiestasis y equifinalidad³¹, y poseen aptitud para el desarrollo o la evolución de sí mismos (Morin, 1995). Debido a la naturaleza de la ciudad, esta puede entenderse como un triángulo de interrelación entre la población o habitantes, las actividades u ocupaciones, y el territorio o emplazamiento físico de la ciudad, que puede determinar la vulnerabilidad de uno de sus componentes si los otros dos lados desequilibran la relación, evidenciado especialmente en el impacto en el territorio por el desequilibrio que podrían generar la población y sus actividades (Amaya, 2005). A su vez, la escala y complejidad de los ecosistemas urbanos varía con el tamaño de la ciudad, evidenciando diferencias entre los macro y micro ecosistemas urbanos debido a la concentración de población y sus consecuentes implicancias para su entorno natural, además de la dependencia de elementos indispensables para el desarrollo humano (Amaya, 2005).

Tal como en los sistemas naturales, los ecosistemas urbanos requieren para su funcionamiento del flujo e intercambio de materia y energía, además de información (Higueras, 2009) para crecer, desarrollarse y sostenerse, funcionando como un metabolismo con flujos y procesos que, a nivel de las ciudades, se puede homologar y definir como metabolismo urbano (Díaz, 2014). Este metabolismo urbano consiste en la suma de los procesos técnicos y socioeconómicos que ocurren en las ciudades, resultando en crecimiento, producción de energía y eliminación de desechos (Kennedy et al., 2007), que tiene como elementos fundamentales los procesos, los flujos de materia y energía, y la sociedad, permitiendo la coexistencia de elementos naturales en un ecosistema urbano, con los valores sociales y económicos que sus habitantes hacen de este y de los ecosistemas que lo rodean, soportan y reciben los impactos de su actividad (Díaz, 2014). Mientras la materia es el elemento que sostiene el sistema, la energía permite el flujo e intercambio de materia y de sí misma dentro de estos (Díaz, 2014). A diferencia de los sistemas naturales, con metabolismos de ciclo cerrado, los ecosistemas urbanos tienen un metabolismo lineal, con la entrada de materia y energía como insumos que, tras ser consumidos por la ciudad, generan residuos o desechos que representan una salida de materia desde el sistema (Higueras, 2009).

Dentro de los recursos necesarios para el funcionamiento de las ciudades, el agua constituye un componente fundamental del metabolismo urbano dado que es un elemento imprescindible para el desarrollo de la vida y las sociedades, y al igual que otros flujos de materia en un metabolismo lineal, el recurso hídrico ingresa al sistema urbano, se distribuye y consume, y los residuos de dicho consumo son flujos de salida del sistema (Higueras, 2009). El agua puede ingresar a las ciudades naturalmente en forma de precipitación, y de manera antrópica a través de la extracción desde pozos y cursos de agua, su potabilización y posterior distribución por la red de suministro hasta sus consumidores. La salida del agua de los ecosistemas urbanos ocurre de diversas maneras, ya que debido a la impermeabilización del suelo producto de su urbanización, se implementan sistemas de alcantarillado para evacuar adecuadamente las aguas residuales, mientras que el agua infiltrada en el suelo o utilizada para el mantenimiento de la vegetación reingresa al ciclo hidrológico a partir de la evaporación y evapotranspiración de ésta. El principal uso del agua en las ciudades ocurre a nivel doméstico e industrial, y si bien estos no representan el mayor volumen de uso de agua, son los con mayor impacto en las ciudades debido al gran porcentaje de la sociedad involucrada en estos

³¹ La multiestasis corresponde a la existencia de varios estados de satisfacción para el sistema, mientras que la equifinalidad describe la capacidad de alcanzar un propósito mediante diversos medios (Morin, 1995).

procesos (Fundación Nueva Cultura del Agua, s/f). Mientras la ONU cifra en 60 litros diarios la cantidad mínima de agua requerida por una persona para satisfacer sus necesidades básicas, la media del consumo doméstico diario en Chile asciende hasta los 170L por habitante (SISS, 2011a) y se estima que la demanda hídrica urbana por habitante en términos generales es de aproximadamente 200L diarios, ascendiendo al incluir el riego de jardines hasta los 600L diarios por habitante (Astaburuaga, 2004).

5.1.2. Abastecimiento hídrico en zonas áridas

Las zonas áridas se caracterizan por la escasez de precipitaciones y la falta de agua resultantes de fenómenos meteorológicos planetarios, como el descenso de masas de aire seco y frío con altas presiones que ocurre en los trópicos del planeta. Para el caso de Chile se combinan con factores físicos, como la interrupción continental de las corrientes oceánicas y la presencia de altas cordilleras que dificultan el intercambio térmico y atmosférico respectivamente, lo que sumado a la corriente fría de Humboldt produce un centro de alta presión permanente denominado Anticiclón del Pacífico (Astaburuaga, 2004), ubicado precisamente frente a Antofagasta y determinando sus condiciones hidroclimáticas. Desde una perspectiva de la vegetación, las zonas áridas se refieren a aquellas con precipitaciones menores a la evapotranspiración de la vegetación presente, que en el país abarcan desde el extremo norte hasta pasado el Río Bio Bio, ubicado en la región del mismo nombre (Astaburuaga, 2004).

La escasez hídrica limita el desarrollo económico y urbano, por lo que cualquier mejora en estos ámbitos requiere del incremento en la eficiencia del uso del recurso, como la acumulación de aguas para el riego artificial de los cultivos para compensar el déficit producto de la evapotranspiración. Por el contrario, un manejo inadecuado de las precipitaciones y su distribución puede contribuir a acentuar las condiciones de aridez, como las nuevas exigencias sanitarias concebidas tras la expansión de las redes de agua potable y alcantarillado que aumentaron notablemente la demanda hídrica de los centros urbanos (Astaburuaga, 2004), o el uso extensivo del recurso por la actividad minera, principal sector económico regional y el segundo a nivel nacional (MOP, 2012). De esta manera, la poca disponibilidad de aguas se presenta como un desafío para el abastecimiento de áreas urbanas situadas en este tipo de zonas alrededor del mundo, presentando a su vez diversas soluciones en sus diferentes contextos. Mientras algunas apuntan a mejorar la gestión del recurso con el fin de asegurar el suministro necesario para sus habitantes, las principales buscan aumentar la disponibilidad hídrica para sus diversos usos.

Un ejemplo claro de lo anterior lo constituye la desalación de agua de mar, con cerca de 18.000 plantas en 130 países del mundo, y aunque su principal limitante se centra en el elevado consumo energético para producir agua potable, en países ricos en recursos energéticos se ha posicionado como la principal fuente de abastecimiento hídrico, como en el caso de Arabia Saudita y los Emiratos Árabes Unidos, que en conjunto representan más del 40% de la desalación mundial (Martins, 22-03-2017). Chile por su parte se destaca como el mayor productor de agua desalada de Latinoamérica, asociado principalmente a la expansión de la actividad minera y su consecuente demanda hídrica, desarrollándose como única alternativa para el suministro hídrico en la zona norte del país, purificando cerca de 300.000m³ de agua diariamente y con proyecciones de superar el millón de metros cúbicos en los próximos 5 años (Martins, 22-03-2017).

5.1.3. Institucionalidad del agua y los servicios sanitarios

En el desarrollo de la institucionalidad chilena atingente al agua y al sector sanitario se pueden identificar cuatro grandes etapas. La primera duró hasta principios del siglo XX, y abarca los inicios de la legislación con la creación de un Senadoconsulto en 1819, encargado de regular el agua de riego y fijar la porción de agua extraíble desde un cauce (Vergara, 1991). Esta etapa se destaca por una escasa presencia estatal, limitada a eventos de emergencias y a otorgar autorizaciones, sin mayor regulación respecto al recurso hídrico (Miranda, 2015). En la segunda etapa esta situación cambió al aumentar el rol del Estado mediante la creación de códigos de agua en 1948 y 1951, y la construcción de grandes obras de riego asociadas a la reforma agraria de 1967, que implicó una nueva actualización a dicho código. Los inicios de la institucionalidad sanitaria en Chile se remontan a esta etapa, con la creación de la Dirección General de Agua Potable y Alcantarillado del Ministerio del Interior en 1931 y su posterior fusión con el Departamento de Hidráulica del MOP para la creación de la Dirección de Obras Sanitarias en 1953, unificando las funciones de suministro de agua potable y servicio de alcantarillado en un solo organismo (SISS, s/f a) y representando un enfoque del agua como bien público que debe ser entregado por el Estado, con financiamiento fiscal en la inversión y en la mayor parte de la operación (Morandé y Doña, 1997).

La tercera etapa se caracteriza por la vigencia del código de aguas de 1967, con un Estado planificador encargado de asignar el recurso, y con la creación de la Dirección General de Aguas³² como organismo regulador independiente de los sectores usuarios del recurso (Miranda, 2015). Esta visión cambió radicalmente tras el Golpe de Estado en 1973 y la posterior dictadura cívico-militar que presidió al país hasta 1990, por lo que en la cuarta etapa fueron agrupados todos los organismos encargados del sector con la creación del Servicio Nacional de Obras Sanitarias³³ en 1976, una institución autónoma dependiente del MOP que pasó a tomar las responsabilidades, funciones, derechos y obligaciones concernientes al manejo de aguas en el país a través de Direcciones Regionales de Servicios Sanitarios (Aguas Antofagasta, 2011a). Si bien la Dirección de Obras Sanitarias, encargada hasta ese momento de los servicios de saneamiento y suministro hídrico, pasó a formar parte del SENDOS, seguía dependiendo del mismo ministerio. Adicionalmente, tras la promulgación del Decreto 2.603 de 1979 que norma el aprovechamiento de aguas, y de la Constitución de 1980, surge el marco regulatorio que actualmente rige la gestión hídrica en el país mediante la promulgación del Código de Aguas de 1981, que traspasa las decisiones de asignación del recurso al mercado y reduce la función planificadora del Estado al mínimo, generando y consagrando el sistema concesional de derechos de aprovechamiento sólidos sobre el de las aguas, y suprimiendo toda norma y potestad de la autoridad que pudiera debilitar la propiedad sobre ellos (Peña et al., 2004). De esta manera, los derechos de agua fueron gestados mediante varias etapas previas al actual código de aguas y caracterizando la normativa según el predominio ideológico imperante, pero su perfeccionamiento fue realizado tras la reducción de la resolución a la escritura pública e inscripción de los derechos en un registro de propiedad de aguas (Rivera, 2011).

La condición de bienes nacionales de uso público de los derechos de agua, al no estar declarada constitucionalmente, deriva en que la regulación del Estado sea limitada y los derechos se transen entre privados, impidiendo una adecuada administración del recurso hídrico que resguarde su calidad y disponibilidad para toda la población (Delgado et al., 2015), siendo constituidos en su

³² En adelante: DGA.

³³ En adelante: SENDOS.

origen de forma gratuita, y jurídicamente como derechos reales sobre el uso y goce de las aguas, muebles por naturaleza, pero inmuebles según su aprovechamiento, con una vida jurídica independiente al no poder ser caducados por la autoridad, pudiendo hipotecarse o embargarse en caso de ser requerido (Peña et al., 2004). Además, se establecen los derechos de tipo consuntivos, que impiden la reutilización superficial del recurso, como los solicitados para riego y actividades mineras e industriales, y de tipo no consuntivos, que utilizan el agua sin consumirla, como los proyectos hidroeléctricos (Larraín, 2006). De los primeros, el 90% lo concentran empresas mineras y agroexportadoras, mientras que el segundo tipo es propiedad principalmente de transnacionales como ENDESA (Mundaca, 17-02-2012), evidenciando que la mercantilización del recurso hídrico ha favorecido su concentración en los sectores energéticos, minero y exportador como motores del desarrollo nacional, en perjuicio del acceso al agua para la mayoría de la población (Larraín, 2006).

Previo a este cambio de enfoque, debido a la conjunción de los roles ejecutor y operativo del sector sanitario en una misma entidad, la normativa y fiscalización no eran ejercidas adecuadamente (SISS, s/f a), por lo que entre enero y abril de 1990, y como parte de las acciones de privatización de empresas públicas de los últimos días de la dictadura militar de Chile³⁴, la institucionalidad del agua fue completamente transformada a nivel nacional³⁵, modificando el rol del estado como responsable de los servicios sanitarios al despojarlo de su provisión, y relegándolo a subsidiar, normar y fiscalizar sus operaciones. En este contexto, fue creada la Superintendencia de Servicios Sanitarios como organismo regulador del nascente mercado de servicios sanitarios (SISS, s/f a). Además, la totalidad de las direcciones regionales del SENDOS fueron transformadas en sociedades anónimas, traspasando la propiedad de las nuevas empresas a la Corporación de Fomento (SISS, s/f a), y aunque éstas seguían siendo públicas, la idea era prepararlas para la licitación de sus concesiones sanitarias a empresas privadas, lo que ocurrió finalmente entre 1998 y 2004 (ESSAN, 2004), comenzando en este periodo la promoción de la participación privada en el sector sanitario del país. (Miranda, 2015). De esta manera, el conjunto de leyes dictadas entre 1988 y 1990 establecieron las condiciones para solicitar, otorgar y explotar las concesiones sanitarias, determinar las tarifas, definir las facultades del organismo regulador, subsidiar la demanda para usuarios de bajos ingresos y transformar las direcciones regionales de SENDOS en sociedades anónimas (Morandé & Doña, 1997), lo que para la ciudad de Antofagasta se tradujo en la creación de la Empresa de Servicios Sanitarios de Antofagasta S.A., la cual pasaría a hacerse cargo del suministro de agua potable y del manejo de aguas servidas de la región (SISS, 2006).

Tras el traspaso, el modelo centralista de la toma de decisiones de inversión de SENDOS pasó a ser manejado por la gerencia de la nueva empresa, que culpaba a la administración anterior por un retraso de al menos 20 años en inversión y desarrollo de los servicios sanitarios en la región³⁶. Esta nueva institucionalidad incrementó notablemente las inversiones en nuevas obras de agua potable

³⁴ Durante la dictadura cívico-militar, especialmente en sus últimos 5 años, gran parte de las empresas públicas más significativas para el desarrollo nacional fueron traspasadas a privados, proceso que ocurre bajo la lógica neoliberal de restar participación al Estado en el mercado y la economía, traspasando varias de sus actividades al sector privado, y que ha derivado en la concentración de poder económico actual (Miranda, 20-05-2016).

³⁵ Anteriormente, en diciembre de 1988, se aprobó la Ley General de Servicios Sanitarios N° 18.681, que establece disposiciones sobre la explotación, concesión y regulación de los servicios sanitarios y el Decreto 453 que aprueba el DFL 70 que establece reglamento de fijación de tarifas de servicios sanitarios, y estableciendo un 7% de ganancias mínimas de las empresas sanitarias sobre sus activos.

³⁶ Extraído de la entrevista realizada a Aurora Williams, transcrita en Maino & Recabarren (2009).

y saneamiento durante toda la década a fin de asegurar un abastecimiento hídrico continuo las 24 horas del día (Maino & Recabarren, 2011), propiciado por el aumento generalizado de las tarifas, ahora reguladas bajo la lógica del mercado, traducido en un incremento en términos reales por sobre el 85% en el lapso de una década (Donoso & Hantke, 2007).

En 1997 se aprobó una iniciativa para ampliar la participación del capital privado hasta un máximo de 65% (Donoso & Hartke, 2007), y al año siguiente se modificó el marco legal del sector sanitario al reducir la centralización del ente regulador y fortalecerlo frente al aumento de la inversión privada proyectada para el sector (Sánchez & Sanhueza, 2000). Para ello, en su primera etapa se contempló la venta de un paquete estratégico de la sociedad a consorcios con experiencia en el sector, resultando en la privatización de la mayor parte de las empresas sanitarias y en un incremento total del 118% para el periodo 1989-2000 de las tarifas de los servicios sanitarios. La segunda etapa culminó con la entrega de las concesiones sanitarias restantes a operadores privados (Donoso & Hantke, 2007), evidenciando que el proceso de privatización de los servicios sanitarios que inició en dictadura, fue consumado durante los gobiernos de la concertación entre 1994 y 2005 y concluido en el primer periodo presidencial de Sebastián Piñera, provocando que la totalidad de las empresas sanitarias del país, a excepción del Servicio Municipal de Agua Potable y Alcantarillado de Maipú, sean actualmente privadas (Manns et al., 2013). Adicionalmente, el proceso fue complementado de un sistema de fijación de precios que aseguraba a los inversionistas la recuperación total de los costos y un margen de ganancia mínimo de un 7% sobre los activos de la empresa sanitaria (Donoso & Hantke, 2007), el cual superaba el 10% para el año 2014 en promedio, destacándose Aguas Antofagasta con más de un 20% de rentabilidad sobre el patrimonio (Miranda, 2015).

En el 2005, y tras 13 años de tramitación en el congreso, fueron introducidas reformas al código de aguas que buscaban corregir las falencias del mercado del agua, aumentar las facultades de la DGA, asumir la necesidad de protección pública del recurso hídrico y reconocer y fortalecer la organización social del agua, pero sin modificar los principios básicos del libre ejercicio del derecho de aprovechamiento de aguas y la no afectación de los derechos existentes que han caracterizado la actual legislación hídrica (Gentes, 2006). En la práctica, las modificaciones introducidas se tradujeron en la obligación de anotar los fines para el uso del agua, la justificación del volumen de agua solicitada, el pago de una patente por el no uso de los derechos, la facultad de la DGA para declarar áreas de restricción y escasez, el registro de derechos de aprovechamiento, la paralización de obras o labores sin autorización en cauces naturales, la posibilidad del Estado de limitar un caudal y de rematar derechos sin utilizar o con patentes impagas (Gentes, 2006).

Posteriormente, tras la puesta en marcha de la planta desaladora, comenzó la licitación para el traspaso de los derechos de explotación de los activos sanitarios a través de un contrato que concesiona el servicio por 30 años³⁷. El proceso finalizó en diciembre de 2003 con la adjudicación de la licitación por parte de la Empresa Antofagasta PLC, propiedad mayoritaria del Grupo Luksic³⁸, la cual constituyó a Aguas Antofagasta como empresa en noviembre del mismo año a través de su matriz de inversiones Punta de Rieles Ltda. (SEP, 2003). De este modo, tras la transferencia de los

³⁷ Según lo establecido en la nueva legislación de concesiones del 2001 (modifica 453 de 1988).

³⁸ El Grupo Luksic es el consorcio empresarial de capitales chilenos con la mayor fortuna del país, controlando gran parte de las empresas que lideran los sectores minero, financiero, alimentario, telecomunicaciones e industrial en general.

derechos de explotación en abril de 2004, Aguas Antofagasta pasó a hacerse cargo del abastecimiento de agua potable, mientras que ESSAN continuó con propiedad de las concesiones de disposición de las aguas servidas de la región³⁹ (ESSAN, 2004). Adicionalmente, 8 de las empresas sanitarias que habían transferido el derecho de explotación de sus concesiones entre 2001 y 2004, incluyendo a ESSAN⁴⁰, se fusionaron bajo ésta última, quedando a cargo del control y administración de las empresas integradas, y manejando los 9 contratos con sus respectivos operadores privados a cargo de las concesiones sanitarias (ESSAN, 2004). Actualmente, la empresa sanitaria Aguas Antofagasta pertenece al Grupo de Empresas Públicas de Medellín, compañía colombiana perteneciente a dicho municipio, tras concretarse su transacción en abril de 2015 por US\$965 millones, la más cuantiosa en la historia del sector sanitario y la mayor inversión de una empresa colombiana en Chile (Gutiérrez, 24-04-2015).

Actualmente se encuentra aprobada, aunque en revisión, una nueva reforma al código de aguas que refuerza el rol fiscalizador de la DGA al otorgarle la calidad de ministro de fe y aumentar el peso evidenciable a sus actas, además de poder acceder a predios y solicitar directamente apoyo de la fuerza pública para paralizar obras ejecutadas sin autorización sobre cauces naturales (Ariztía & Fontaine, 27-03-2018). Adicionalmente se tipificaron nuevas faltas y se aumentaron notablemente las sanciones, determinadas ahora por la DGA y cobradas por la Tesorería General de la República. De esta manera, previo a la reforma, el código de aguas establecía multas máximas de 20UTM, incrementándose ahora según el grado de la sanción, pudiendo alcanzar hasta 50UTM para el grado más leve y hasta 2.000UTM para el quinto grado, correspondiente al más grave, pudiendo aumentar debido a factores agravantes entre un 50% y 100% más. Cabe destacar que el delito de usurpación de aguas es uno de los que mayor aumento en las sanciones registra, tanto penales como de multas, pudiendo llegar hasta 5.000UTM (Gobierno de Chile, 10-10-2017).

Respecto a la institucionalidad del recurso hídrico, se aprecia una dispersión normativa derivada en una dispersión institucional, que genera la existencia de diversos organismos públicos con competencias concurrentes o antagónicas y que contrasta con una política hídrica sostenible, parcelando la gestión pública y volviéndola ineficiente al distribuir la gestión hídrica en 29 organismos de gobierno repartidos en 10 ministerios, con más de 10 organismos autónomos del Estado y que en total concentran 102 funciones en 43 actores (Soto, 2014). Lo anterior obstaculiza una gestión integrada de los recursos hídricos y una adecuada fiscalización del manejo, resolución de conflictos, contaminación sobreexplotación y concentración de la propiedad en torno al agua (Larraín, 2006), lo que, sumado a la ausencia de espacios de participación real de la ciudadanía en las políticas ciudadanas, deja a la población sin herramientas para participar de la gestión del agua y de defender sus intereses (Miranda, 2015). Por su parte, el marco normativo que rige al sector sanitario actualmente se puede resumir en la Ley General de Servicios Sanitarios de 1989 y su reglamento de 2005, que regulan principalmente los regímenes de explotación de servicios sanitarios y de sus concesiones, y la Ley de Tarifas de Servicios Sanitarios de 1988 (Vergara, 2014). Adicionalmente, se considera la norma del 2005 que regula la calidad del agua potable suministrada según parámetros organolépticos y de concentración de sustancias nocivas para la salud humana.

³⁹ Los servicios sanitarios de ESSAN eran operados por Quetena S.A. en Calama y Bayesa S.A. en Antofagasta.

⁴⁰ ESSAT S.A. (Tarapacá), ESSAN S.A. (Antofagasta), EMSSAT S.A. (Atacama), ESSCO S.A. (Coquimbo), ESSAM S.A. (Maule), ESSAR S.A. (Araucanía), EMSSA S.A. (Aysén) y ESMAG S.A. (Magallanes).

5.2. Vulnerabilidad y seguridad hídrica urbana

Dado que la seguridad del abastecimiento hídrico depende del grado de vulnerabilidad del sistema y sus componentes, a continuación se realiza una revisión conceptual de los factores de riesgo, poniendo énfasis en las amenazas y la vulnerabilidad asociada a ellas, y su aplicación para el análisis de los sistemas de abastecimiento de aguas, además de su disminución mediante la mitigación de estos factores. De esta manera, se busca asociar los conceptos asociados a la gestión del riesgo con la gestión hídrica urbana, de manera que ésta pueda asegurar el suministro hídrico y reducir el impacto de eventos con efectos sobre el sistema hídrico de Antofagasta mediante su inclusión en todas las etapas de su ocurrencia.

5.2.1. Amenaza, vulnerabilidad y riesgo

Durante mucho tiempo existió la percepción de los conceptos de riesgo, amenaza y vulnerabilidad como lo mismo y atribuidos a la divinidad, pero esto cambió con la afirmación de Rousseau en 1755, quien tras el terremoto de Lisboa señaló que la severidad de los efectos del sismo fue responsabilidad de los habitantes, afirmando que el hombre es responsable del peligro, y dando inicio a las denominadas *cindynique* o ciencias del peligro (Kevern y Rubise, 1991; y Soutadé, 1998; en Cardona, 2001). El desarrollo de estos conceptos y su aplicación a diferentes eventos de desastre han permitido dar claridad a los mismos. Una amenaza corresponde a un peligro latente o factor de riesgo externo de un sistema, sujeto o comunidad expuestos a fenómenos que potencialmente amenazan el ser humano y su entorno (Cardona, 2001; GRAVITY, 2001). Se encuentran definidas por la naturaleza o tipo de evento, su ubicación, la magnitud, severidad e intensidad de éste, y la frecuencia o la probabilidad de ocurrencia del fenómeno (Cardona, 2001; BID, 2002). Matemáticamente puede ser expresada como la probabilidad de exceder un nivel de ocurrencia de un suceso con cierta intensidad, en un sitio específico y durante un tiempo de exposición determinado al evento (Cardona, 2001). Cabe destacar que la amenaza no existe en términos absolutos, lo que existe es el fenómeno como tal, ya que la amenaza considera la existencia de elementos o una comunidad amenazada actualmente o que podría estarlo en el futuro, siendo entonces un concepto construido y dinámico en el sentido de que un fenómeno puede representar una amenaza para una comunidad en un momento determinado, pero dejar de serlo en el futuro o no representar lo mismo para otra comunidad (BID, 2002).

Las amenazas se distinguen clásicamente según su origen natural, socio-natural, tecnológico o antrópico en general (BID, 2002). Sin embargo, considerando la metodología base para el desarrollo de la presente investigación, la clasificación utilizada corresponde a la propuesta en CEPIS (2000) que las divide según su origen en 3 tipos, unificando las naturales y socio-naturales en la misma categoría. De esta manera, las amenazas naturales corresponden a manifestaciones propias de las dinámicas terrestres, en las que el ser humano no incide en su ocurrencia ni puede intervenir para que no sucedan (Lavell, 1996), abarcando todos los fenómenos del ambiente biofísico que son peligrosos para los seres humanos al poder afectarlos de forma adversa (BID, 2002). Lavell (1996) propone una clasificación de 4 tipos de amenazas naturales definidas según su origen geotectónico, como los sismos y tsunamis, actividad volcánica y desplazamientos verticales y horizontales de porciones de la tierra; de origen geomórfico o geodinámico, tales como los deslizamientos y avalanchas, hundimientos y erosión terrestre y costera; de origen meteorológicas o climáticas, como tormentas, sequías, y marejadas; y de origen hidrológicas, como inundaciones, desbordamientos, anegamientos y agotamiento de acuíferos. Este conjunto de amenazas está

interrelacionado, ya que una de ellas puede tener o tiene relación con otras, tales como los sismos tsunamigénicos o las remociones en masa asociadas a grandes precipitaciones (Lavell, 1996).

Las amenazas antrópicas por su parte son aquellos eventos generados completamente por la acción humana, provocando desastres asociados a la vulnerabilidad de los receptores del impacto. Entre las principales se encuentran la contaminación ambiental asociada a las sustancias producidas por la actividad humana con efectos nocivos sobre el medio ambiente, los conflictos bélicos y las disputas territoriales, y las producidas por negligencias en el accionar humano al mando de diferentes medios tecnológicos (Lavell, 1996). Finalmente, dentro de las amenazas antrópicas se pueden distinguir de forma más específica las amenazas tecnológicas, correspondientes a posibles fallas en dotaciones de infraestructura urbana o en procesos de producción y distribución industrial potencialmente de gran peligro, ya sea producidas por negligencias, falta de controles adecuados o su imprevisión para afrontarlas. Su importancia en términos de un potencial desastre se asocia a su ubicación, principalmente concentradas en centros urbanos o próximos a ellos, y a la ocupación humana en torno a fuentes de amenaza, pudiendo generarse un impacto en un gran número de pobladores dada la densidad de los emplazamientos circundantes (Lavell, 1996).

La vulnerabilidad corresponde a probabilidad de que un sujeto, comunidad o sistema expuestos a una amenaza de cualquier tipo, según el grado de fragilidad de sus elementos, sufra daños y pérdidas humanas como materiales de magnitud asociada con su predisposición intrínseca a ser afectado o de ser susceptible a sufrir daño, tanto en el momento del impacto del fenómeno, como en la dificultad en recuperarse de ello a corto, mediano o largo plazo (Cardona, 2001; BID, 2002). La vulnerabilidad se considera antes, durante y después del evento, resultando ser una expresión de la ineptitud en anticiparse a este, de la inflexibilidad del elemento expuesto y su incapacidad de resistir o absorber el impacto del fenómeno, y de la incapacidad de adaptarse a los cambios de toda índole que éste genera para recuperarse y restablecer sus medios de vida, o en otras palabras, la capacidad de mitigación y preparación, de resistencia y de resiliencia frente a la ocurrencia de un determinado fenómeno (Chardon, 2008). Por lo tanto, la vulnerabilidad es un factor de riesgo interno asociado a la predisposición o susceptibilidad física, económica, política o social que tiene una comunidad de ser afectada o de sufrir daños tras la manifestación de un fenómeno desestabilizador de cualquier tipo (Cardona, 2001).

Según Chardon (2008), la vulnerabilidad es el resultado del funcionamiento de un sistema complejo dinámico generado por procesos que inciden sobre factores de vulnerabilidades, clasificados en estructurales y no estructurales, y pertenecientes a los diferentes campos físico-naturales, ecológicos, sociales, económicos, físico-espaciales, territoriales, tecnológicos, culturales, educativos, funcionales, político-institucionales y administrativos o coyunturales principalmente. Estos factores pueden ser internos o propios de la comunidad, o externos y ligados a su entorno, por lo que se deduce que no existen vulnerabilidades pertenecientes a campos específicos, ya que la vulnerabilidad depende de una sinergia entre factores distintos, por lo que no existe en lo absoluto, sino que se encuentra obligatoriamente asociada a una amenaza y es específica de ella (Chardon, 2008). De esta manera, la presente evaluación de vulnerabilidad se asocia a las amenazas consideradas para el sistema de abastecimiento hídrico e identificadas para el área de estudio, siendo dichos factores los sometidos a análisis. Además, el carácter dinámico de la vulnerabilidad se expresa espacial y temporalmente o con respecto al tipo de amenaza, por lo que es cambiante y evoluciona tanto cuantitativa como cualitativamente, siendo entonces propia de un tipo de

amenaza y de un hábitat expuesto en particular que caracterizan el proceso de creación y desarrollo de una situación de vulnerabilidad, ya que como fue señalado anteriormente, la vulnerabilidad se revela tras el impacto de un fenómeno, pero no nace en ese momento (Chardon, 2008).

Por último, en cuanto al riesgo, corresponde al valor relativo probable de pérdidas resultante de la convolución de la amenaza y la vulnerabilidad en un determinado tiempo y lugar, tanto en el momento del impacto de fenómeno como durante el periodo de recuperación y reconstrucción consiguiente, cuya magnitud dependerá del grado de amenaza y vulnerabilidad (Cardona, 2001; Chardon, 2008). Este cruce de amenaza y vulnerabilidad convierte al riesgo en una situación dinámica, en constante evolución y cambio, pudiendo aumentar o disminuir al variar alguno de sus componentes. Por otra parte, dada la dificultad y frecuente imposibilidad de anular el riesgo, el objetivo es reducirlo a un grado aceptable, el cual depende del grado de desestabilización esperado y de la relación costo/beneficio entre las medidas de mitigación y el valor previsto del riesgo, siendo entonces un atributo propio de una sociedad y de su disposición e interés en asumirlo, relativizando aún más el concepto (Chardon, 2008). Asimismo, la complejidad para la evaluación del riesgo y la poca disponibilidad de información para su realización hicieron que la presente investigación se centrara en las amenazas al sistema de abastecimiento hídrico y su vulnerabilidad. De esta manera, la población y los elementos expuestos se mantienen estáticos, y lo que varía es la amenaza.

Desde una perspectiva geográfica, según lo propuesto por Coy (2010) a modo general, existen al menos tres visiones diferentes identificadas en los estudios de amenazas, riesgo y vulnerabilidad. La primera corresponde a una visión objetivista, desde las ciencias naturales e ingenieriles, basada en instrumentos metodológicos que permitan la cuantificación, cálculos de probabilidad y modelaciones complejas de los eventuales peligros, incorporando en segundo plano la dimensión social como componente fundamental para que una amenaza se considere riesgo. La segunda visión, también objetivista, aborda el riesgo desde las ciencias económicas, buscando calcular, cuantificar y monetarizar los efectos económicos del evento, basado en la relación entre la probabilidad de ocurrencia y magnitud del evento con su daño potencial asociado. La última visión corresponde a las ciencias sociales que, a diferencia de las anteriores, tiene un abordaje cualitativo y se basa en la inclusión social de los peligros y en el manejo del riesgo como expresión de la relación dinámica entre la sociedad y la naturaleza, por lo que su valoración, predisposición y exposición está influenciada por los diferentes discursos y formas de acción social, así como por los distintos intereses y relaciones de poder y dependencia, incorporando aportes desde la sociología, politología y psicología, entre otros. Así, dado el carácter transversal de la geografía y su interés en la intersección de planteamientos y métodos de las ciencias naturales y sociales, las tres visiones son relevantes a la hora de potenciar la integración y la complementación, buscando comprender el riesgo y la vulnerabilidad lo más ampliamente posible (Coy, 2010).

5.2.2. Vulnerabilidad de sistemas de agua potable

Aunque la vulnerabilidad como macro tema ha sido ampliamente abordada por la geografía y sus disciplinas afines, los temas hídricos no han tenido la misma cobertura, especialmente los referidos al abastecimiento hídrico de las ciudades. Los sistemas de abastecimiento de agua potable se encuentran formados por una serie de componentes, comprendidos por un conjunto de elementos que cumple una función específica dentro del sistema, pudiendo operar de forma independiente o como parte integral del mismo, y que son necesarios para captar, conducir, tratar, almacenar y distribuir el agua, en complemento con acciones de operación, mantenimiento y administración que

garanticen la cantidad, calidad, continuidad y costo adecuados (Morales, 2000). Tras la aplicación del concepto de vulnerabilidad en su sentido más amplio a los sistemas de abastecimiento hídrico, se entiende como la susceptibilidad o factor de riesgo interno de un componente o del sistema completo a ser dañado total o parcialmente tras el impacto de una amenaza, cuya magnitud del daño cuantificada será entendida como su vulnerabilidad (CEPIS, 2000). De esta manera, la vulnerabilidad se configura como el grado de incapacidad del componente de un sistema para cumplir sus objetivos bajo determinada condición operacional, constituyendo la inversa de la confiabilidad. La vulnerabilidad y sus estudios deben considerarse con anterioridad a la implementación de infraestructura de abastecimiento hídrico, previendo los posibles impactos en esta tras el impacto de la amenaza (Morales, 2000).

Dada la exposición de la región a diferentes tipos de amenazas que se presentan con cierta frecuencia, las secuelas del impacto asociado han demostrado un incremento en la vulnerabilidad producido por la acción del hombre, aumentando la frecuencia y el impacto de éstas sobre los ecosistemas urbanos y, por lo tanto, también de los servicios de agua y saneamiento asociados a las ciudades, influyendo negativamente en la salud y el bienestar de la población (Organización Panamericana de la Salud⁴¹, 1998). La interacción entre las amenazas y los sistemas de agua han evidenciado su nivel de exposición a ser dañados, y sumado a un abordaje inadecuado del efecto de los desastres sobre el sistema hídrico en los procesos de desarrollo, se han traducido en alteraciones de la calidad del servicio y la consecuente exposición a riesgos para la salud por la proliferación de enfermedades de origen hídrico, y en pérdidas económicas para las empresas sanitarias producto de los daños, tanto directos sobre los componentes físicos, como daños indirectos, referidos al costo asociado al manejo de la emergencia, resultando muchas veces en que el costo de la emergencia y rehabilitación del sistema es muy superior al que hubiesen tenido medidas adoptadas para su prevención y mitigación (OPS, 1998). Cabe señalar que, debido al uso continuo de los sistemas de agua potable, una interrupción o falla del suministro puede maximizar el impacto del evento, por lo que su operación es indispensable durante la emergencia y posterior recuperación.

Entre los factores que influyen en la vulnerabilidad de un componente del sistema de agua potable enumerados por Morales (2000) se encuentran las características del sitio de su emplazamiento, que puede presentar condiciones adversas o contribuir en el grado del impacto de algún evento, así como también las características de las fuentes de abastecimiento, principalmente respecto a su tipo, cantidad y capacidad. A su vez, algunas características propias del sistema de agua potable, como la extensión de sus componentes o la dificultad en su acceso, contribuyen a acentuar la condición de vulnerabilidad. Respecto al tipo, número de procesos y características de los componentes, estos requieren un análisis completo de las características y confiabilidad individuales de los elementos que lo constituyen para determinar el grado de vulnerabilidad del conjunto. Asimismo, influyen también las características tecnológicas de los proyectos desarrollados y las normas de diseño y construcción bajo las cuales fue construida la infraestructura, considerando además que son sistemas en constante crecimiento. Finalmente, la existencia de servicios complementarios o auxiliares, así como de programas regulares de operación y mantenimiento, en conjunto con los recursos disponibles para enfrentar escenarios de emergencia, influyen ampliamente en la vulnerabilidad de los sistemas de abastecimiento hídrico.

⁴¹ En adelante: OPS.

5.2.3. Evaluación de la vulnerabilidad y medidas de mitigación

La evaluación de la vulnerabilidad para los sistemas de abastecimiento hídrico requiere de la identificación y análisis de la vulnerabilidad operativa, vulnerabilidad física y vulnerabilidad administrativa del sistema (CEPIS, 2000). La primera está asociada a deficiencias en la prestación de servicios, mientras que las otras se asocian a las debilidades de los componentes físicos del sistema y de la organización para responder al impacto de amenazas respectivamente. La vulnerabilidad de los componentes del sistema de abastecimiento hídrico es favorecida por la existencia de una amenaza y la condición de debilidad del componente. Estas condiciones deben analizarse por separado y luego en conjunto, ya que la primera depende únicamente de la zona de emplazamiento del componente, mientras que la segunda depende del componente mismo. De esta manera, el análisis de la vulnerabilidad corresponde al proceso de identificación y cuantificación de estas debilidades con el fin de determinar la capacidad del sistema y sus componentes para resistir el impacto de una amenaza, partiendo desde el conocimiento del sistema de abastecimiento hídrico, sus componentes y funcionamiento, y de las características del evento que lo impactará. El análisis de vulnerabilidad se aplica a cada uno de los componentes del sistema como resultado del análisis individual de sus componentes. Así, la superposición del evento y del sistema de abastecimiento determina los componentes más vulnerables, y como resultado final, la identificación de las medidas de mitigación y emergencia requeridas (CEPIS, 2000).

La medición cuantitativa de la vulnerabilidad se realiza por medio del uso de indicadores, que según el Banco de Programas y Proyectos de Inversión Nacional de Colombia⁴² (2002), corresponden a la identificación de una magnitud numérica referida a un evento que evidencia su intensidad, situación o evolución, permitiendo establecer la explicación, evolución y predicción de un fenómeno estudiado. El uso de este instrumento permite evaluar objetivamente un proceso a través de mediciones cualitativas o cuantitativas, pudiendo además ser usado en diferentes etapas temporales del proceso para evidenciar la efectividad de éste a partir de la evolución de sus indicadores. Por lo tanto, los indicadores se conforman a partir de las relaciones entre variables que permiten conocer una situación determinada en forma continua, permitiendo conocer el cambio o comportamiento de una variable. Los indicadores tienen una dimensión cualitativa referida a la descripción de la variable, y una dimensión cuantitativa o numérica de la variable. Adicionalmente, deben poseer características de validez, pertinencia, relevancia, representatividad, confiabilidad, eficiencia y suficiencia, además de ser demostrables y verificables (BPIN, 2002). Estas características respaldan el uso de indicadores para la evaluación de los distintos fenómenos y sus posibles impactos al sistema de abastecimiento hídrico, ya que constituyen una herramienta efectiva y representativa desde el punto de vista conceptual, siendo atingente a la hora de cuantificar las variables consideradas para la evaluación de vulnerabilidad en el abastecimiento hídrico. Es importante que el sistema de indicadores propuestos para la presente investigación refleje de forma integral la vulnerabilidad en el sistema de abastecimiento hídrico de la ciudad de Antofagasta en términos relativos y comparativos (Carreño et al., 2005).

El análisis de vulnerabilidad no solo se aplica al impacto de fenómenos naturales, sino también al riesgo implícito de accidentes que impacten en el servicio de abastecimiento hídrico. Adicionalmente, se considera en la planificación para la atenuación de desastres naturales y eventos que impacten en el servicio a modo de herramienta de diagnóstico para la elaboración de planes de

⁴² En adelante: BPIN.

mitigación y emergencia (CEPIS, 2000). De esta manera, la vulnerabilidad de los componentes puede aumentar o disminuir según la variación en las condiciones de su ambiente y su constitución, por lo que la implementación de medidas de mitigación y emergencias resultan clave a la hora de asegurar la continuidad en el servicio de agua potable frente a la ocurrencia de algún evento que pueda comprometer su capacidad. Las medidas de mitigación buscan reducir la vulnerabilidad mediante la corrección de debilidades ante una eventual amenaza y la reducción del riesgo a fallas en condiciones normales, siendo el resultado de un trabajo multidisciplinario que determina la vulnerabilidad de los componentes de los sistemas de agua potable y forma parte de las decisiones de planificación y desarrollo de estos (OPS, 1998). Esto se traduce en planes que comprendan medidas de mejoramiento y obras de reforzamiento estructural, incrementando la confiabilidad del sistema y sus componentes mediante la definición de las acciones a realizar, además de priorizarlas, asignarlas, programarlas y presupuestarlas.

Al igual que en la evaluación de vulnerabilidad, los planes de mitigación generan medidas enfocadas a sus diferentes aspectos administrativo, operativo y físico. Para este último se proponen en general medidas que apunten al reforzamiento, sustitución y rehabilitación de la infraestructura, además de la implementación de equipos redundantes que puedan reemplazar las funciones de sus similares. Según el estado de conservación de los componentes es recomendable su reemplazo si están malos o son inadecuados, repararlos si su funcionamiento defectuoso y monitorearlos periódicamente si su estado es regular, complementándolo con la implementación de componentes faltantes, como generadores auxiliares, y con un mejoramiento en el acceso a la infraestructura de abastecimiento hídrico (OPS, 1998). Adicionalmente, las medidas para reducir la vulnerabilidad administrativa y la vulnerabilidad operativa de los sistemas de agua potable, en términos generales, corresponden a acciones preventivas extraídas también desde sus análisis de vulnerabilidad respectivos, apuntando tanto a la reducción de las debilidades frente a las amenazas como a optimizar la operación del sistema y minimizar el riesgo de fallas en condiciones normales. Estas medidas van desde mejoras en los sistemas de comunicación, una adecuada previsión de vehículos y generadores de emergencia, la detección de deslizamientos lentos y la corrección de fugas en suelos inestables, siendo complementadas con una planificación para la atención de emergencias (OPS, 1998).

De esta forma, en localidades con una o más fuentes de alto riesgo, las medidas de mitigación generadas deben considerar, como mínimo, una mejora en la infraestructura de suministro hídrico con acciones que refuercen el sistema de abastecimiento y plazos detallados de ejecución de las obras, además de la implementación de equipamiento de respaldo. De igual manera, se debe capacitar al personal de la empresa sanitaria, además de las autoridades, usuarios y clientes, y desarrollar simulacros y ejercicios, tanto aleatorios como programados, para evaluar el desempeño de los planes de emergencia. Adicionalmente, se propone la implementación de mecanismos de vigilancia que monitoreen la ocurrencia y evolución de eventos que puedan impactar al sistema de abastecimiento hídrico (SISS, 2011b). Si bien esto es lo básico que se considera al generar medidas de mitigación para la vulnerabilidad de los sistemas de abastecimiento hídrico, también se pueden adoptar medidas asociadas a las características específicas de las diferentes amenazas identificadas para el sistema que apoyen el tratamiento de riesgos, pero que dependerán de la naturaleza de la amenaza para su implementación, respondiendo a las necesidades de cada territorio.

5.3. Eventos catastróficos y emergencias

Como fue consignado previamente, la evaluación de vulnerabilidad del sistema de abastecimiento hídrico tiene como resultado final la identificación de medidas de mitigación y de emergencia que deben implementarse o ponerse en marcha, ya sea para minimizar los efectos de los eventos que pueden impactar al sistema como para enfrentar una situación de emergencia (CEPIS, 2000). Según lo anterior, a continuación se realiza una revisión de lineamientos generales para el manejo de emergencias, derivado de la condición de vulnerabilidad atribuida a los sistemas de abastecimiento hídrico, además de las acciones atribuidas a cada actor involucrado tras la ocurrencia de una catástrofe. Así, la superposición del evento y del sistema de abastecimiento determina los componentes más vulnerables, y como resultado final, la identificación de las medidas de mitigación y emergencia requeridas.

5.3.1. Manejo de emergencias

La gestión de las emergencias en Chile se rige por el Plan Nacional de Protección Civil (ONEMI, 2002)⁴³, instrumento indicativo que busca potenciar las capacidades preventivas y perfeccionar continuamente la preparación y atención de emergencias, apuntando a una gestión integral que responda a la naturaleza dinámica del riesgo abordando acciones de prevención, mitigación, preparación, respuesta y rehabilitación. Así, el plan identifica diversos actores y entidades públicas, privadas, voluntarias, civiles y militares para integrar el Sistema Nacional de Protección Civil, aplicado a los diferentes niveles y escalas de la organización administrativa nacional, y que conforman los Comités de Prevención Civil y de Emergencia para mitigar los riesgos y responder a eventos catastróficos. De esta manera, la Oficina Nacional de Emergencia del Ministerio del Interior⁴⁴ se perfila como el principal organismo de coordinación a nivel nacional, mientras que los comités mencionados previamente responden a diferentes niveles de coordinación según su escala y nivel de autoridad regional, provincial o comunal (SISS, 2011b).

Según lo anterior, el proceso de manejo de riesgos en emergencias considera de 2 grandes etapas para su gestión. En la primera, previa a la ocurrencia de eventos catastróficos, se busca establecer el contexto de aplicación, identificar las fuentes de riesgo, estimar su impacto, priorizarlas y definir acciones para su mitigación. La segunda etapa ocurre posterior al evento, y se refiere al conjunto de acciones para responder a los posibles eventos de este y restituir los servicios afectados. Para ello se debe identificar el evento ocurrido y su impacto en el funcionamiento de los sistemas, informar a las autoridades competentes para determinar el nivel de emergencia y coordinar las acciones a seguir, monitoreando e informando la evolución de estas. A su vez, la ocurrencia del evento sirve para realizar una evaluación de los procedimientos planteados en la etapa previa y, sumada a la revisión de las acciones de respuesta, sirven para generar una retroalimentación que permita identificar las lecciones aprendidas y aplicarlas a los planes de manejo de emergencias. Las etapas de las emergencias evolucionan desde sus causas, efectos, impacto y nivel de la emergencia. Esta última etapa se clasifica según la caracterización de la ONEMI en 4 niveles respecto a la disponibilidad de recursos y la capacidad para responder a ellas en diferentes escalas para cada nivel, que van de la atención local, comunal, regional y nacional de la emergencia (SISS, 2011b).

⁴³ Decreto 156 del Ministerio del Interior, 12 de marzo de 2002.

⁴⁴ En adelante: ONEMI.

5.3.2. Actores y responsabilidades

La SISS (2011b) define y caracteriza 5 grupos de actores que inciden en el manejo de emergencias asociadas al sector sanitario, con sus respectivas responsabilidades al respecto. El primero corresponde a los clientes y usuarios del agua potable, sobre quienes se enfoca la atención en eventos de emergencia, resguardando la integridad de aquellos expuestos a estas situaciones y evaluando su necesidad de contar con el servicio según el servicio que prestan, como el caso de servicios de utilidad pública. Según la Matriz RACI propuesta por la SISS (2011b) y detallada en el Anexo 6, el rol de este grupo en las etapas previas al evento se limita a informar o ser consultado y a ser informado, efectuándose una comunicación bidireccional, mientras que posterior a este se encarga de asistir en la identificación del evento y sus impactos y es informado de la emergencia, sus características y acciones frente a ella. El segundo grupo son los prestadores de servicios sanitarios, encargados de provisionar el agua potable y alcantarillado, compuestos principalmente por las empresas sanitarias y sus proveedores, siendo estos últimos los encargados de responder adecuadamente para una pronta restitución del servicio frente a eventos de emergencias. El mismo organismo le asigna la responsabilidad total en la ejecución de las etapas previas y posteriores al evento a las empresas sanitarias, mientras que sus proveedores poseen el rol de asistir en las etapas previas, y tras la ocurrencia del evento son informados de éste, sus impactos y de la emergencia que significa, para ser consultadas y asistir en la caracterización de la emergencia, la coordinación de acciones y el monitoreo de su evolución.

Un tercer grupo lo constituyen los organismos de gobierno con funciones atinentes a emergencias, encargados de la asistencia, fiscalización y coordinación frente a estos eventos, clasificados según sus atribuciones y escalas, que van desde lo local y comunal a lo nacional. Previo a la ocurrencia del evento, la Matriz RACI otorga a los organismos centrales, como la SISS, ONEMI y Ministerios, el rol de informar y ser informado en todas las etapas, mientras que los organismos regionales y comunales además tienen el rol de asistir a los actores responsables, en este caso, la empresa sanitaria. Por su parte, las funciones de los organismos de gobierno en las etapas posteriores a la ocurrencia del evento son variadas, destacándose la ONEMI y la SISS como responsables de comunicar la emergencia y monitorear e informar su evolución respectivamente, y por asistir y ser informados en la coordinación de acciones en conjunto con el resto de los organismos de este grupo, aunque en el resto de las etapas se limitan a informar y ser informados de la emergencia. El resto de los organismos, como Ministerios, Intendencias y Municipios, cumplen roles de asistir y ser informados en todas las etapas de la emergencia, sumándose además un rol comunicador en la caracterización de ésta.

Por su parte, los medios de comunicación social como cuarto grupo de actores cumplen el rol fundamental de transferir la información de la evolución de la emergencia a la población, variando según el medio utilizado en su cobertura, oportunidad y profundidad, por lo que la radiodifusión sonora se posiciona como la más relevante al transmitir la información rápida y ampliamente. La televisión y la prensa escrita, si bien no son tan inmediatas, son relevantes debido a su impacto en la población y la profundidad del análisis de la emergencia respectivamente. De esta manera, su participación en las etapas previas al evento se limita únicamente a ser informados del tratamiento previsto para la emergencia, ampliando su rol en las etapas posteriores a la ocurrencia del evento al ser informado de las características de la emergencia y siendo cruciales al asistir en su comunicación, en la coordinación de acciones y el monitoreo de su evolución. Finalmente, el quinto

grupo de actores son las organizaciones sociales que representan a la ciudadanía frente a las autoridades y prestadores de servicios, con relevancias y niveles de organización dispares en el territorio, aunque reconociendo las juntas de vecinos como las principales organizaciones consideradas, destacándose además un incremento de las organizaciones de consumidores y su incidencia en el contexto de la economía de mercado. Este grupo de actores presenta el mismo rol en las diferentes etapas previas y posteriores al evento que el primer grupo de clientes y usuarios de los servicios sanitarios frente al manejo de emergencias.

5.3.3. Procedimientos y recomendaciones

La SISS (2011b) propone una secuencia de actividades en respuesta a la ocurrencia de un evento catastrófico. El proceso de respuesta comienza con la vigilancia a nivel de localidad y la alerta de ocurrencia del evento, y las dos primeras actividades son responsabilidad de las empresas sanitarias, identificando y caracterizando el impacto, y comunicándolo a la autoridad competente de la empresa para evaluar el nivel de emergencia según su capacidad de respuesta. La situación y sus antecedentes deben ser comunicados al comité de emergencias pertinente y a la SISS para evaluar la clasificación de la emergencia según los 4 niveles propuestos por la ONEMI. Si la empresa sanitaria cuenta con los medios para superar la emergencia, categorizado en los primeros dos niveles, se sigue el tratamiento regular especificado en el reglamento de concesiones, pero si sus recursos no logran atenderla, se clasifican en los dos últimos niveles, por lo que debe activarse el Plan de Emergencias de la empresa y los procesos de planificación, monitoreo, coordinación y comunicaciones de la SISS en respuesta al evento y hasta el restablecimiento de la normalidad en el funcionamiento de los servicios, decretado por este mismo organismo. De esta manera, la respuesta de la SISS frente a eventos de emergencia se orienta al apoyo para la superación de estos eventos, asistiendo a los diferentes actores involucrados hasta que se asegure la continuidad del servicio sanitario a la población impactada. Este proceso de respuesta a emergencias de muestra de forma esquemática en el Anexo 7.

Debido a la falta de información, ya sea por la dificultad de su obtención o porque simplemente no existe, no ha sido posible identificar los recursos con los que cuenta la empresa sanitaria, así como tampoco procedimientos complementarios a los impuestos por la SISS. De manera complementaria, el presente estudio recoge además una serie de recomendaciones obtenidas a partir de la bibliografía que pueden aplicarse para la mitigación de riesgos específicos, entre los que se encuentran zonificaciones de áreas de riesgo definidas por sus características físicas, y en los que se sugiere evitar la construcción de infraestructura crítica para el correcto funcionamiento de los sistemas urbanos. Cabe destacar que frente a emergencias que afecten sus diferentes fuentes de agua, especialmente respecto al agua desalada, los esfuerzos de la empresa sanitaria se enfocan en completar el abastecimiento con la fuente disponible, pudiendo invertir la orientación de los flujos de las conducciones de agua potable para transportarla hasta los diferentes estanques de la ciudad, exceptuando los del sector La Chimba (Ramírez, 27-12-2016).

6. Marco Metodológico

La presente investigación tiene por objetivo el análisis de la vulnerabilidad del sistema de abastecimiento hídrico de la ciudad de Antofagasta en cuanto a la evolución de sus fuentes de aguas, por lo que las fuentes de información y las técnicas de investigación utilizadas se enmarcan en una metodología de carácter mixto, ya que los datos recolectados y analizados son de tipo cuantitativo y cualitativo, respondiendo al objetivo planteado a partir del análisis de información de indicadores disponible y mediante observaciones de las organizaciones o personas involucradas.

La metodología desarrollada para la presente investigación se basa en el documento “Guías para el análisis de vulnerabilidad de sistemas de abastecimiento de agua potable y alcantarillado” desarrollado por el CEPIS (2000), considerada una de las propuestas metodológicas más completas en cuanto a la evaluación de la seguridad y vulnerabilidad que puede presentar un sistema en cuanto a su disponibilidad hídrica (Morales, 2000). Esta metodología propone una evaluación en 6 pasos con sus respectivos aspectos a evaluar, detallados en la Tabla 2. Si bien esta metodología involucra también a los sistemas de alcantarillado, dados los alcances de la investigación estos se han descartado. Adicionalmente, para efectos del estudio, no todos los pasos propuestos por el CEPIS (2000) han sido presentados como resultados, distribuyéndose a lo largo de todo el documento. Así, el primer paso, que consta de una identificación de la organización y legislación vigentes, fue trabajado como parte del marco teórico, profundizando además en la vulnerabilidad de la organización institucional, mientras que la descripción de la

Identificación de la organización y legislación vigentes	Organización nacional y regional
	Normativa legal vigente
Descripción de la zona, del sistema y su funcionamiento	Descripción de la zona
	Descripción física del sistema
	Descripción funcional del sistema
Estimación de la vulnerabilidad operativa	Sistemas de agua potable
	Sistemas de alcantarillado
Estimación de la vulnerabilidad física e impactos en el servicio	Identificación de amenazas
	Características de la amenaza
	Prioridad relativa
	Sistemas de información y alerta
	Áreas de impacto
	Componentes expuestos
	Características del impacto
	Imp. en servicio de agua potable
Estimación de la vulnerabilidad administrativa de la empresa y capacidad de respuesta	Organización institucional
	Operación y mantenimiento
	Apoyo administrativo
	Capacidad de respuesta
Medidas de mitigación y emergencia	Vulnerabilidad operativa
	Vulnerabilidad física
	Vulnerabilidad administrativa

*Tabla 2: Pasos del análisis de vulnerabilidad en sistemas de agua potable y alcantarillado
Fuente: CEPIS (2000)*

zona de estudio fue realizada en el área de estudio. De esta forma, los resultados contemplan desde los pasos de descripción física y funcional del sistema, su vulnerabilidad operativa, la vulnerabilidad física y los impactos en el servicio de abastecimiento. La medición de la vulnerabilidad propuesta en la metodología del CEPIS (2000) se basa en el modelo propuesto por la American Water Works Association, que establece la vulnerabilidad como la inversa de la confiabilidad de un componente, en términos de su capacidad de producción de agua luego del impacto de un evento catastrófico, con respecto a la cantidad de agua necesaria. Si bien esta metodología no refleja la magnitud del daño ni el tiempo de rehabilitación, su adopción responde a la imposibilidad de recabar información para aplicar metodologías más complejas, aunque igualmente significa un valor que informa el índice de operación de un componente tras un evento que represente una amenaza para este, y el porcentaje que debe rehabilitarse para volver a estar en completo funcionamiento (CEPIS, 2000).

Considerando que la estimación de la vulnerabilidad administrativa y capacidad de respuesta contempla el análisis de elementos descritos previamente, siendo el resultado de las evaluaciones de vulnerabilidad institucional abordada en el marco teórico, de vulnerabilidad operacional trabajada principalmente en los resultados, y de la vulnerabilidad administrativa, es que se abordarán como parte de la discusión. A su vez, dadas las limitantes metodológicas para cumplir a cabalidad los objetivos que debe cumplir un análisis de vulnerabilidad según los lineamientos del CEPIS (2000) sobre la elaboración de planes de mitigación y emergencias, es que, en base a los resultados obtenidos sobre vulnerabilidad, solo que generarán propuestas que puedan servir para mitigar el impacto de amenazas sobre el abastecimiento de Antofagasta.

Según lo anterior, la investigación se desarrolló en 3 etapas consecutivas, constando en primera instancia de una fase exploratoria que contempló revisión bibliográfica y recolección de información mediante solicitudes a los diferentes organismos implicados en el abastecimiento hídrico, con el fin de construir la base teórica y metodológica para desarrollar la investigación, y de analizar la información disponible y aquella que debía ser complementada u obtenida de otras fuentes. La segunda etapa consta de actividades que fueron desarrolladas en terreno, como lo fueron la aplicación de encuestas y entrevistas, que tuvieron como finalidad la recolección de información destinada a responder los objetivos planteados, además de complementar la información recopilada que presentaba datos mutilados. Finalmente, en una fase de gabinete, fue analizada la información recabada mediante la aplicación de los indicadores de vulnerabilidad a los elementos considerados para la investigación. A continuación, se describen los pasos metodológicos utilizados para el desarrollo de cada uno de los objetivos específicos propuestos.

6.1. Descripción del abastecimiento, su evolución y vulnerabilidad operativa

Para el desarrollo del primer objetivo, este fue abordado en 3 partes. La primera consta de la descripción del sistema de abastecimiento, que considera desde las fuentes y captaciones de agua hasta su distribución a los consumidores finales, abarcando la infraestructura física del sistema y sus características funcionales y de capacidad de suministro de agua a la ciudad de Antofagasta. La descripción física del sistema con las características de la infraestructura asociada a cada uno de sus componentes fue obtenida principalmente desde los estudios tarifarios de servicios sanitarios de la Segunda Región de Antofagasta (SISS, 2006; SISS, 2011c) y de información de infraestructura de producción y distribución entregada por la SISS (2017) mediante una solicitud por transparencia, complementado además con las Declaraciones de Impacto Ambiental⁴⁵ de la Planta Desaladora de Antofagasta (ESSAN, 2001a) y su ampliación y actualización (Aguas Antofagasta, 2013a). En cuanto a la espacialización de la infraestructura, si bien la información proporcionada por la SISS (2017) contenía las coordenadas UTM de casi todos los componentes y fue adjuntada también la espacialización de parte de la infraestructura de abastecimiento, estas debieron ser corregidas mediante fotointerpretación, ya que presentaban desplazamientos considerables respecto a la ubicación real de la infraestructura. A su vez, la infraestructura sobre la que no se tenía información espacial fue principalmente identificada también con fotointerpretación de imágenes satelitales, y basado en las referencias que entregaban documentos, como la Actualización del Plan de Desarrollo de Antofagasta y Calama (Aguas Antofagasta, 2011a), y consultas en la web. Para la descripción funcional del sistema de abastecimiento, en cuanto a su capacidad, flujos, niveles, presiones y

⁴⁵ En adelante: DIA.

calidad del servicio, las fuentes citadas previamente fueron complementadas con información entregada por la empresa sanitaria sobre producción y distribución de agua, y la Ficha de Antecedentes Técnicos entregada a la SISS (Aguas Antofagasta, 2014a).

Para analizar la calidad del agua potable y la continuidad del servicio se analizaron indicadores a diferentes escalas y fueron complementados con los resultados obtenidos a partir de investigaciones desarrolladas en el marco del presente proyecto FONDECYT. Por una parte, se analizó la evaluación realizada por la SISS para la empresa sanitaria y a nivel de la comuna de Antofagasta, con información disponible para el periodo 2002-2015 (SISS, s/f b). Este organismo otorga indicadores de calidad y continuidad, entre otros, como parte de la evaluación de la calidad en el servicio de agua potable, con valores que oscilan entre 0 y 1 como mínimo y máximo en cada indicador evaluado. Estos valores fueron contrastados con los resultados obtenidos mediante la aplicación de encuestas en Antofagasta realizadas en el marco de la investigación de Monsalve (2018), que evalúa la percepción, el uso y los hábitos de consumo doméstico de los habitantes de la ciudad. En este sentido, se solicitó a los encuestados la evaluación de la calidad del agua y continuidad del servicio en escala de 1 a 7, considerando para este último además los cortes programados y no programados y su duración señalada por los encuestados. Para mejorar el contraste de ambas evaluaciones y los parámetros de comparación, los resultados de la encuesta fueron ajustados según la escala utilizada para los indicadores. Así, mientras la información de la SISS se utilizó para indicadores a escala de la empresa sanitaria y de la comuna, las encuestas sirvieron para detallar los parámetros evaluados a nivel de los diferentes sectores de la ciudad.

Adicionalmente, la continuidad del servicio a escala de la ciudad y sus sectores fue complementada a partir de la investigación realizada por Villegas (2016), también en el marco del proyecto FONDECYT, que realiza un análisis de eficiencia en la distribución en base a la inversión y los cortes de agua, utilizando para esta última la información de cortes de agua en la ciudad para el periodo 2011-2014 entregada por la SISS (2015). En este sentido, la continuidad del servicio en cada sector fue complementada según el Índice de Continuidad del Servicio de Agua Potable (Ind. AP) propuesto por la SISS (2011d), que considera el número de fallas de suministro por tipo, por clientes afectados y por su duración. Esta metodología fue adaptada para su aplicación a los diferentes sectores de la ciudad respecto al total de cortes en el periodo 2011-2014, y también para analizar la continuidad de la producción de agua potable según los cortes de suministro atribuidos a bajo nivel en los estanques de distribución relacionado con fallas en el sistema de producción, estableciendo entonces los valores para cada elemento analizado.

La segunda parte del resultado corresponde al análisis de la evolución del sistema de abastecimiento hídrico, en donde se recurrió a los antecedentes históricos recopilados en la descripción del área de estudio y a la descripción del sistema realizada previamente, considerando entonces la evolución de la infraestructura y de la capacidad del sistema, además de los cambios en la calidad del agua potable y en la continuidad del servicio, estableciéndose para ello 3 periodos de análisis determinados por las fuentes de abastecimiento de la ciudad de Antofagasta. El primero corresponde al periodo previo a la construcción de la Planta Desaladora de Antofagasta en 2003, cuando la ciudad era abastecida únicamente con fuentes de agua de cordillera. El segundo es el periodo actual, que contempla la existencia de fuentes mixtas para el abastecimiento de la ciudad. Finalmente, el escenario futuro se establece a partir de la premisa de que la ciudad de Antofagasta será abastecida únicamente con fuentes de agua desalada, y aunque no se establece un año

específico para aquello, se contempla la construcción de una nueva planta desaladora que venga a reemplazar a las fuentes de cordillera.

Finalmente, a partir de la información recabada, fue elaborada la primera matriz para estimar la vulnerabilidad operativa del sistema de abastecimiento de agua potable, considerando para ello un análisis de los componentes del sistema según su capacidad, la continuidad del servicio y la calidad del agua. La capacidad dependerá de la función del componente analizado, pudiendo ser de caudal o de almacenamiento, mientras que la continuidad y calidad fueron evaluadas según los indicadores expuestos anteriormente, contrastando los resultados según las diferentes fuentes de información y escalas, incluyendo además un análisis por fuentes y sectores.

6.2. Amenazas al sistema de abastecimiento hídrico

Para el desarrollo del segundo objetivo específico, consistente en la identificación y análisis de las amenazas que determinan la vulnerabilidad del sistema de abastecimiento hídrico de la ciudad de Antofagasta, se utilizaron diversas metodologías asociadas a cada una de las amenazas identificadas para el sistema de abastecimiento hídrico en el área de estudio. De esta manera, el análisis de las diferentes amenazas identificadas se realizó de forma diferente según la naturaleza de cada una, evaluándola desde su espacialización o por un medio de un análisis cualitativo o cuantitativo en caso de no poder analizarse desde una dimensión espacial.

Clase	Descripción
A	Roca dura
B	Roca
C	Suelo muy denso o roca blanda
D	Suelo rígido
E	Suelo blando
F	Requiere evaluación específica

Tabla 3: Clasificación de suelos
Fuente: NEHRP (2009)

Para la determinación y análisis de la amenaza sísmica en el área de estudio se divide según el tipo de sismo y considera su fuente, recurrencia, magnitud y aceleraciones esperadas. Para los sismos interplaca se utilizó como base la metodología de amplificación sísmica aplicada en el estudio de Geología para el Ordenamiento Territorial de Antofagasta (SERNAGEOMIN, 2014), que considera las disposiciones propuestas por el National Earthquake Hazards Reduction Program⁴⁶ (2009) y el sismo probable propuesto por el proyecto RADIUS (Tapia et al., 2000) para establecer las clases de suelo y sus características sísmicas. El NEHRP propone un esquema de clasificación estándar de suelos sísmicos, cuyas categorías se muestran en la Tabla 3, y se aplica para las distintas unidades geológicas, especificando factores de amplificación para las aceleraciones máximas de los suelos (PGA) en cada unidad según la velocidad media de las ondas de corte en los 30m superiores de cada suelo. Al igual que en SERNAGEOMIN (2014), debido a la falta de datos de velocidades medias de las ondas de corte para el área de estudio, se realizó una clasificación cualitativa de las unidades según las mismas disposiciones del NEHRP.

Para el análisis de amplificación sísmica a escala regional, se reclasificaron las 82 unidades geológicas presentes en la zona identificadas en el Mapa Geológico de Chile (SERNAGEOMIN, 2003) según los criterios expuestos en la Tabla 4, y las características geológicas, geomorfológicas y granulométricas de las distintas unidades. A partir de la reclasificación de las unidades geológicas presentadas por el SERNAGEOMIN (2003) y según los criterios de clasificación de suelos propuestos por la NEHRP (2009) y la intensidad propuesta por SERNAGEOMIN (2014), fue realizada la zonificación para determinar el nivel de amplificación sísmica e intensidad esperadas en las distintas unidades a nivel

⁴⁶ En adelante: NEHRP.

de la Región de Antofagasta, clasificándolas en 5 categorías caracterizadas por la geología, geomorfología, y granulometría de las distintas unidades. De esta forma, de acuerdo con las disposiciones del NEHRP, las secuencias de rocas metamórficas corresponden a suelos tipo A, mientras que las secuencias intrusivas y volcánicas son suelos de tipo B, siendo ambos tipos de suelo considerados como roca base. Las unidades geológicas de depósitos piroclásticos y volcanosedimentarios, al igual que los depósitos aluviales, coluviales y marinos antiguos, se clasifican como suelos tipo C. Los suelos de tipo rígidos corresponden a depósitos coluviales, marinos, eólicos antiguos y sedimentarios indiferenciados, mientras que los depósitos aluviales se clasifican como suelos tipo D o E según su antigüedad, aplicándose la última clasificación solo a los registrados en el periodo cuaternario. Finalmente, los depósitos eólicos, de playa y antrópicos corresponden a suelos de tipo E, clasificados como blando y siendo los con mayor amplificación sísmica.

Unidad Geológica	Clase
Depósitos antrópicos	E
Depósitos de playa	E
Depósitos eólicos	E
Depósitos aluviales	D-E
Depósitos coluviales	D
Depósitos marinos	D
Depósitos sedimentarios indiferenciados	D
Depósitos eólicos antiguos	D
Depósitos aluviales y coluviales antiguos	C
Depósitos marinos antiguos	C
Depósitos piroclásticos	C
Depósitos volcanosedimentarios	C
Secuencias intrusivas	B
Centros y secuencias volcánicas	B
Secuencias metamórficas	A

Tabla 4: Clasificación de unidades geológicas regionales según disposiciones NEHRP
Fuente: Elaboración propia en base a NEHRP (2009) y SERNAGEOMIN (2003; 2014)

Clase	Factor Ampli.	PGA	Intensidad
A	0,8	188,11	VI
B	1	235,14	VI-VII
C	1,2	282,17	VII
D	1,4	329,2	VII-VIII
E	1,7	399,74	VIII

Tabla 5: Factores de amplificación e intensidades esperadas por clase de suelo
Fuente: SERNAGEOMIN (2014)

El siguiente paso fue aplicar los resultados de intensidades (SERNAGEOMIN, 2014) según el sismo esperado propuesto por el proyecto RADIUS (Tapia et al., 2000), cuya magnitud y distancia hipocentral, de 8,2Ms y 150Km respectivamente, en conjunto con los factores de aceleración espectral definidos para cada clase de suelo, determinan la aceleración máxima de suelos (PGA). En este sentido, mediante la aplicación de la fórmula de atenuación de Frasard y Saragoni (en Tapia et al., 2000), se obtuvo una PGA de 235,14cm/s² para los suelos clase B, y tras la aplicación del factor de amplificación para cada

suelo, se obtuvieron sus respectivas aceleraciones máximas. Finalmente, mediante la aplicación de la ecuación de Murphy (en SERNAGEOMIN, 2014), se calcularon las intensidades esperadas para cada tipo de suelo, que presentarían el mismo comportamiento que para el sismo de 1995. Estas características se detallan en la Tabla 5.

Adicionalmente, y como segundo tipo de sismos, en el área de estudio se reconocieron una serie fallas geológicas capaces de generar terremotos superficiales intraplaca, los que, si bien no presentan movimientos recientes y no se conoce con certeza la edad del último sismo por fallas que pueden ser consideradas estrictamente como potencialmente activas, estas deben ser consideradas como activas bajo un enfoque conservador, concentrando el mayor daño en las cercanías de las fallas (Muñoz & Rauld, 2010) . Para el presente estudio se consideraron las fallas geológicas expuestas en el Mapa Geológico de Chile (2003) para la región de Antofagasta, y según lo propuesto por Muñoz & Rauld (2010), se estableció como zona de restricción por fallas geológicas el perímetro

a 1Km de la falla, en donde debe evitarse la construcción de infraestructura crítica frente a desastres. Por su parte, para las áreas de inundación por tsunamis se utilizó la metodología aplicada en SERNAGEOMIN (2014), que considera la Carta de Inundación por Tsunami para la ciudad de Antofagasta elaborada por el Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile ⁴⁷ en el contexto del Sistema Nacional de Alarma de Maremotos (SNAM), y la zona de inundación según el sismo propuesto por el proyecto RADIUS (Tapia et al., 2000). En base a lo anterior, sumado a la fotointerpretación y análisis de información topográfica, se propone una cota de inundación aproximadamente hasta los 9msnm. Adicionalmente, considerando la ocurrencia de tsunamis extremos, que cuentan con un periodo de recurrencia mayor que los tsunamis normales, el SERNAGEOMIN (2014) también establece la cota de los 30msnm como área de seguridad para la evacuación y ubicación de infraestructura crítica.

Con respecto a las remociones en masa, para definir el grado de susceptibilidad y su distribución en la Región de Antofagasta se utilizó como base la metodología propuesta por SERNAGEOMIN (2014), que considera principalmente las características geológicas y topográficas, y aunque también utiliza parámetros geomorfológicos locales y presencia de vegetación, estos no fueron incluidos debido a la ausencia de información detallada al respecto, y por no ser posible de aplicar en el caso de estudio. La información fue complementada mediante la asesoría del Profesor Rodrigo Rauld. Para ello, se realizó una reclasificación de las diferentes unidades geológicas según sus características físicas que determinan su grado de susceptibilidad. Los criterios utilizados en la reclasificación se detallan en la Tabla 6. En términos generales, los depósitos aluviales, coluviales antiguos, eólicos, marinos, antrópicos y sedimentarios indiferenciados poseen un grado nulo de susceptibilidad de remoción en masa, mientras que los depósitos coluviales y piroclásticos poseen un grado bajo de susceptibilidad y las secuencias volcánicas y volcanosedimentarias poseen un grado moderado. Finalmente, los depósitos de remociones en masa y las secuencias intrusivas poseen indicadores de susceptibilidad de 3, correspondiente a un grado alto, mientras que las plataformas marinas, los centros y complejos volcánicos, las secuencias metamórficas y las rocas intrusivas anteriores al jurásico son las con mayor grado de susceptibilidad.

Unidad geológica	Ind Susc
Depósitos antrópicos	0
Depósitos eólicos	0
Depósitos aluviales	0
Dep. aluviales y coluviales antiguos	0
Dep. eólicos antiguos	0
Depósitos marinos	0
Dep. sedimentarios indiferenciados	0
Depósitos coluviales	1
Depósitos piroclásticos	1
Secuencias volcánicas	2
Secuencias volcanosedimentarios	2
Depósitos remociones en masa	3
Secuencias intrusivas	3
Plataformas marinas	4
Centros y complejos volcánicos	4
Intrusivas jurásico y anteriores	4
Secuencias metamórficas	4

*Tabla 6: Clasificación de unidades geológicas regionales según suscep. a remoc. en masa
Fuente: Elaboración propia en base a SERNAGEOMIN (2003; 2014)*

Adicionalmente, para determinar la susceptibilidad asociada a la pendiente, se obtuvo información topográfica a partir de modelos de elevación digital basados en imágenes satelitales obtenidas mediante la Misión Topográfica Radar Shuttle ⁴⁸ realizada por el Transbordador Espacial Endeavour

⁴⁷ En adelante: SHOA.

⁴⁸ En adelante: SRTM

Pendiente (Grados)	Ind Susc	Grado Susc.
0 - 5	0	Nulo
5 - 10	1	Bajo
10 - 25	2	Moderado
25 - 35	3	Alto
35 - 45	4	Muy Alto

Tabla 7: Clasificación de Pendientes según suscep. remociones en masa
Fuente: SERNAGEOMIN (2014)

en febrero del 2000, que obtuvo imágenes con una resolución de celdas de 1 segundo de arco, que equivale a una dimensión aproximada de 30 metros, por lo que se mide el promedio de elevación de un área de 30x30m, permitiendo una escala de análisis muy detallada. Se utilizaron en total 26 imágenes satelitales para cubrir toda la superficie regional. El cálculo de la pendiente corresponde al promedio de todas las celdas que se encuentran en cada unidad geológica, y el resultado se reclasificó según los valores propuestos para susceptibilidad por pendientes detallados en la Tabla 7. Cabe destacar que, para el caso de las unidades con pendientes promedio mayores a 35°, se consideran con un grado muy alto de susceptibilidad independiente de sus características geológicas. Finalmente, considerando la ausencia de información para el análisis de otros factores asociados a remociones en masa, y que la ponderación propuesta por Lara (2007) establece el mismo valor a la geología y a la topografía, es que el grado de susceptibilidad de cada unidad corresponde al promedio entre estos dos componentes.

Por otra parte, la amenaza volcánica se constituye como tal en el área de estudio debido a la existencia de volcanes activos e infraestructura en zonas aledañas a estos que podría sufrir daños tras un evento de erupción. Para la presente investigación se utilizaron las áreas amenazadas propuestas por la zonificación de riesgo volcánico realizada por la ONEMI (2012), que considera el nivel de amenaza de los volcanes activos y diferentes factores físicos para determinar las áreas de flujo de lavas, lahares y piroclastos, y las zonas de dispersión y caída de material piroclástico. A su vez, para el análisis del Invierno Altiplánico se utilizaron como fuentes las isoyetas de precipitación anual propuestas por la DGA (1991) y de precipitación máxima diaria de Torres (2016) para la región de Antofagasta. La primera se basa en la información entregada por las estaciones meteorológicas disponibles en la época, y aunque se encuentra desactualizada, sirve para contextualizar las zonas ombroclimáticas y su distribución en la región. Por su parte, el análisis de Torres (2016) de datos hidrológicos de distribuciones extremas y de frecuencia de precipitaciones, permite obtener proyecciones de precipitaciones acertadas que se reflejan en las isoyetas obtenidas, correspondientes a la precipitación máxima con duración de 1 día y un periodo de retorno de 10 años, siendo entonces la información más completa y actualizada respecto a los estudios hidroclimáticos realizados en la zona.

Por su parte, para determinar el impacto del cambio climático en la disponibilidad hídrica se utilizaron como base el estudio de modelos para la investigación del calentamiento global elaborado por Rojas (2012), y el análisis integrado del Río Loa realizado por la DGA (2014). El primero de ellos utiliza los 3 escenarios establecidos por el modelo climático regional PRECIS, desarrollado por el Hadley Centre del Reino Unido (Jones et al., 2004), y aplicado a los periodos 2011-2030 y 2013-2050. Según se observa en la Tabla 8, los escenarios representan diferentes variaciones en Temperatura y Precipitaciones para la zona de estudio, y

Períodos	Variables	Escenarios		
		B2	A1B	A2
2011-2030	T° (°C)	1,1	1,2	1,2
	Pp (%)	-1,60	-1,30	-3,00
2031-2050	T° (°C)	1,6	2	1,9
	Pp (%)	-3,4	-3,4	-3,4

Tabla 8: Proyecciones de cambios de T° y Pp para los periodos 2011-2030 y 2031-2050
Fuente: Rojas (2012)

mientras el primer escenario B2 sería el más favorable y con menor emisiones atmosféricas, los escenarios A1B y A2 representarían niveles intermedios y altos de emisiones respectivamente, siendo este último el escenario menos favorable.

Subcuenca	Balance hídrico (L/s)		
	Pp	Escorrentía	ETP
Loa Alto	23.527	3164 (13,5%)	20710 (88%)
Loa Intermedio	32.584	2760 (8,5%)	29985 (92%)

*Tabla 9: Balance hídrico por subcuenca del Río Loa
Fuente: DGA (2014)*

Por su parte, el estudio de la DGA (2014) realiza una estimación del balance hídrico de todas las subcuencas que componen la cuenca del Río Loa, estableciendo los caudales de precipitaciones y su distribución en caudal de escorrentía y de evapotranspiración para las dos subcuencas desde

donde se extraen aguas de cordillera, cuyas características se detallan en la Tabla 9. Según lo anterior, se aplicaron las variaciones de temperatura y precipitaciones para cada subcuenca según los distintos escenarios y periodos. Para determinar el impacto del aumento de temperaturas en el balance hídrico se tomó como base el método de Thornthwaite (1948), que establece una relación empírica entre la evapotranspiración y la temperatura del aire, por medio de la cual se determinó el incremento porcentual en la evapotranspiración y su consecuente disminución del caudal de escorrentía. Por su parte, para la precipitación se aplicó la reducción porcentual propuesta para cada escenario al caudal precipitado en las subcuencas. De esta manera, la variación del caudal de escorrentía, que es la que determina el caudal disponible para ser captado en las fuentes de cordillera, depende tanto de la reducción en las precipitaciones como del aumento del caudal evapotranspirado, aplicándolo para establecer las variaciones porcentuales en el balance hídrico para todos los escenarios y periodos respecto a los valores actuales.

Para el análisis de la concentración de elementos contaminantes en las fuentes de abastecimiento hídrico, principalmente asociada a la alta concentración natural de arsénico y otros metales en las aguas de la cordillera, y a la presencia de marea roja y eventos de Bloom algal para las aguas marinas, se consideraron estudios sobre las causas y características de estas concentraciones, además de la ocurrencia de eventos con impacto registrados en el área de estudio. Adicionalmente se consideraron fuentes antrópicas de contaminación como elementos adicionales para el análisis de esta amenaza, complementando la contaminación de las diferentes fuentes de agua con todas las posibles fuentes contaminantes identificadas. Por su parte, la evaluación de la amenaza geopolítica fue efectuada en base a revisión bibliográfica y de prensa atinente al tema, para determinar los posibles impactos en el abastecimiento hídrico que podrían tener los procesos geopolíticos que se desarrollan actualmente. De esta manera, dada la naturaleza de estas amenazas, su impacto fue analizado desde un enfoque cualitativo según sus implicancias para el suministro hídrico, tanto en términos de calidad como de continuidad, y que comprometan la capacidad de suministro de aguas.

Para el caso de las amenazas asociadas a cortes eléctricos y a golpes de ariete, ambas evaluaciones se realizaron a partir de la misma metodología, considerando para la primera de ellas la existencia de equipos electrógenos de emergencia capaces de asegurar el funcionamiento de la infraestructura dependiente de la energía eléctrica, y para el caso de la segunda, la existencia de equipos amortiguadores de golpes de ariete en las diferentes conducciones de agua que componen el sistema de abastecimiento. Para ello se utilizó la información contenida en los estudios tarifarios de la empresa sanitaria (SISS, 2006; SISS, 2011c) y en las DIA de la infraestructura de abastecimiento disponibles, considerándose la inexistencia de los equipos mencionados previamente o de información al respecto para las respectivas amenazas como factor determinante de la

vulnerabilidad de los componentes analizados. Asimismo, para el caso de las amenazas asociadas a accidentes y a fallas en equipos que puedan comprometer el suministro hídrico, en términos generales, su evaluación también fue realizada con la misma metodología entre sí, a partir de la revisión de los cortes de suministro para el periodo 2011-2014 (SISS, 2015) asociados al accionar de terceros para la primera de ellas, y a las mismas fallas mencionadas para la segunda, y su posterior análisis mediante la aplicación del Índice de Continuidad del Servicio de Agua Potable (SISS, 2011d) a la ciudad de Antofagasta y sus diferentes sectores. De esta manera, se determinaron tanto el impacto absoluto de estas amenazas en términos del número de cortes, duración y población medias, como el indicador de continuidad a modo de escala de comparación.

Con respecto al análisis de las fallas y roturas de tuberías, fue abordada desde sus causas y consecuencias, considerando primero una revisión de la materialidad de las tuberías y sus características específicas a partir de lo especificado en el Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento para el diseño de redes de distribución de agua potable (Comisión Nacional del Agua de México⁴⁹, 2015) y en el estudio realizado por Alonso (2008) sobre renovación de tuberías en un sistema de abastecimiento urbano. Sumado esto, fue abordado el envejecimiento de la infraestructura, tanto de las tuberías y la red de distribución como del sistema en general, y aunque la empresa sanitaria cuenta con su propia evaluación de la vida útil de su infraestructura, detallada en sus estudios tarifarios, estos no abordan aspectos como la materialidad de los componentes en su análisis. Por este motivo, se utilizó como referencia la vida útil de los bienes físicos inmovilizados propuesta por el Servicio de Impuestos Internos⁵⁰ (2002)⁵¹, que realiza una estimación detallada de la vigencia de la infraestructura según su uso normal o acelerado, considerándose la primera clasificación para la evaluación del envejecimiento de la infraestructura en el área de estudio. La Tabla 10 resume la vida útil considerada solo para la infraestructura de abastecimiento hídrico identificada en el área de estudio.

Componentes		Vida Útil (años)
Captaciones		30
Plantas de Tratamiento de Agua		40
Aducciones e Impulsiones	Acero	20
	Hierro Dúctil	30
	Asbesto Cemento	40
	Hormigón armado	50
Plantas Elevadoras	Tipo A	5
	Tipo E	10
Estanques	Acero	30
	Hormigón armado	60
Cañerías	HDPE	15
	Acero	20
	Hierro Dúctil	30
	Asbesto Cemento	30
	P.V.C.	30
	Hormigón armado	40
	Fierro fundido	50

Tabla 10: Vida útil de instalaciones de agua potable
Fuente: SII (2002)

De esta manera, se estima una vida útil de 30 años para las captaciones de agua y de 40 años para las plantas encargadas de su potabilización, mientras que los estanques oscilan entre 30 y 60 años según su construcción en acero u hormigón armado respectivamente, y las plantas elevadoras de agua van de 5 a 10 años de vida útil según su tipo. En cuanto a las aducciones e impulsiones de agua, su vida útil varía entre 20 y 50 años dependiendo de su materialidad, mientras que en las cañerías

⁴⁹ En adelante: CONAGUA.

⁵⁰ En adelante: SII.

⁵¹ Si bien esta tabla no corresponde a la utilizada actualmente, vigente desde el 2003, es mucho más específica en cuanto a las diferencias existentes dentro de un mismo componente, y en términos generales su evaluación no difiere de la utilizada para el presente estudio.

de la red de distribución de agua potable van desde los 15 y los 50 años, y aunque el acero y el hierro dúctil presentan los mismos valores para ambos componentes, el resto de los materiales varía según la etapa de producción en la que se utiliza. La estimación de la vida útil propuesta fue aplicada a la antigüedad de la infraestructura detallada en el catastro de la SISS (2017) para su exposición debido al envejecimiento de sus componentes. Los cambios de infraestructura, como en el caso de las aducciones, se consignan dentro de la información de la infraestructura, pero no fue posible acceder a registros de mantenciones realizadas a ella, por lo que no pudo incluirse en la presente evaluación. Así, la infraestructura de abastecimiento hídrico de la ciudad de Antofagasta fue evaluada en función de la etapa de uso del ciclo de vida de sus componentes. Finalmente, el análisis de las fallas y roturas de tuberías considera las variables de materialidad y envejecimiento, sumado a la aplicación del Índice de Continuidad del Servicio de Agua Potable a través de la misma metodología utilizada para los accidentes y las fallas de equipos. La metodología y fuentes de información utilizados para cada una de las amenazas identificadas como posible factor de riesgo para el sistema de abastecimiento de agua potable de la ciudad de Antofagasta se resumen en la Tabla 11.

	Amenazas	Metodología	Fuentes
Natural	Sísmica	Amplificación Sísmica	NEHRP (2009), SERNAGEOMIN (2003; 2014), Tapia et al. (2000)
	Sísmica de fallas	Zonas de restricción	SERNAGEOMIN (2003), Muñoz & Rauld (2010)
	Tsunami	Áreas de inundación	SERNAGEOMIN (2014), Tapia et al. (2000)
	Remociones en masa	Susceptibilidad según geología y pendiente	SERNAGEOMIN (2003; 2014), SRTM (2000), Lara (2007)
	Volcánica	Flujos de lavas, lahares y piroclastos; Zonas de dispersión y caída de material piroclástico	ONEMI (2012)
	Invierno Altiplánico	Precipitación máxima diaria	DGA (1991), Torres (2016)
	Cambio climático	Variación del balance hídrico	Rojas (2012), DGA (2014), Jones et al. (2004), Thornthwaite (1948)
	Conta. natural	Revisión bibliográfica	Diersing (2009), Prensa
Antrópica	Conta. antrópica	Revisión bibliográfica	SISS (2015), Prensa
	Accidentes externos	Índice de Continuidad	SISS (2011d; 2015)
	Geopolítica	Revisión bibliográfica	Prensa
Tecnológica	Cortes eléctricos	Medidas de prevención	SISS (2006; 2011c)
	Envejecimiento	Evaluación de vida útil	SII (2002), SISS (2017)
	Materialidad	Resistencia mecánica y a la corrosión; Características de materiales	SISS (2017), CONAGUA (2015), Alonso (2008)
	Golpe de ariete	Medidas de prevención	SISS (2006; 2011c)
	Rotura y falla de tuberías	Índice de Continuidad	SISS (2011d; 2015)
	Falla de equipos	Índice de Continuidad	SISS (2011d; 2015)

Tabla 11: Metodología y fuentes por amenaza

Fuente: Elaboración propia

6.3. Evaluación de la vulnerabilidad del sistema de abastecimiento hídrico

Finalmente, tras la identificación y análisis de la infraestructura de abastecimiento hídrico, y de las amenazas capaces de comprometer su capacidad de suministro de aguas, el tercer objetivo consta de la evaluación del impacto de cada una de las amenazas sobre los diferentes componentes del sistema de abastecimiento hídrico de la ciudad de Antofagasta, y sus consecuencias para el

suministro hídrico en los diferentes sectores analizados, utilizando como base para ello la metodología propuesta en CEPIS (2000) para dichos efectos. De esta manera, se identificaron las áreas de impacto directo de las amenazas y la infraestructura expuesta a estas, determinando las características del impacto sobre cada elemento y componente expuesto, y la capacidad remanente de cada uno tras el evento. El impacto en los componentes depende del tipo de infraestructura expuesta, pudiendo amenazar sus caudales asociados, el trazado de sus conducciones o la combinación de ambas, resultando en su grado de vulnerabilidad asociado. En este sentido, se analizó la vulnerabilidad de cada componente en función de la capacidad expuesta para cada amenaza, asignándole un valor entre 0 y 1 para el indicador de vulnerabilidad con relación al porcentaje impactado. Este indicador es una medida cuantitativa de la vulnerabilidad del componente analizado respecto a la amenaza a la que se expone, en donde 0 significa que no existe vulnerabilidad del componente, mientras que el 1 representa una vulnerabilidad total del componente en cuestión. El valor obtenido para cada componente se relaciona directamente con el impacto potencial de la amenaza analizada sobre la infraestructura hídrica y su capacidad de abastecimiento, y es inversamente proporcional a la capacidad remanente de abastecimiento del sistema, por lo que mientras mayor sea su valor, mayor será su vulnerabilidad frente al fenómeno analizado. El uso de indicadores permite estandarizar los resultados obtenidos para un análisis más detallado de ellos, aunque por asuntos prácticos, solo se consideraron los componentes con algún grado de vulnerabilidad frente a las amenazas consignadas, descartando aquellos con el valor mínimo, aunque considerando esta cualidad para el análisis global.

Adicionalmente, tras el análisis del impacto de cada amenaza sobre los distintos componentes, se determinó el impacto en el servicio de agua potable y en el suministro a la ciudad de Antofagasta y sus diferentes sectores. Para ello se aplicaron criterios considerando la información recabada y la bibliografía consultada. Según esto, y considerando la capacidad de suministro hídrico por fuentes, la Planta Desaladora puede suministrar el 100% del caudal medio de la ciudad de Antofagasta, pudiendo abastecer la totalidad de la demanda hídrica en caso de ser requerido, mientras que el sistema de producción de cordillera solo sería capaz de abastecer sus propios sectores y hasta el 61,8% del caudal de los abastecidos con ambas fuentes. Además, el impacto y la capacidad remanente de abastecimiento hídrico de cada sector se analizaron según el caudal de la infraestructura de abastecimiento y la red de distribución de agua potable expuestas. De esta manera, si la infraestructura asociada al abastecimiento hídrico del sector se encuentra expuesta a la amenaza, se contempla un impacto total o parcial en el suministro hídrico en función de la capacidad de caudal expuesta, y de no darse el caso, el impacto en el sector depende del porcentaje de la red de distribución expuesta. Por su parte, si todas las conducciones de agua potable de la ciudad se encuentran expuestas en alguno de sus tramos, el impacto sobre el suministro de la ciudad sería total, por lo que solo se menciona como tal, pero no fue considerado en el análisis para los sectores expuestos a dicha amenaza. Finalmente, considerando el caudal suministrado a cada sector, el impacto en su población puede ser total o parcial dependiendo de la infraestructura y capacidad expuestas, mientras que el impacto en la red de distribución de agua potable impactaría de manera total a una parte de la población según el porcentaje de la red con exposición a la amenaza. De esta manera, la matriz engloba la población impactada de forma indiferenciada, profundizándose en el análisis de sus respectivos sectores, por lo que se estableció el impacto sobre la infraestructura de abastecimiento asociada a cada sector y la capacidad remanente de suministro hídrico, considerando además la población parcial o totalmente impactada por estas amenazas.

III. Resultados

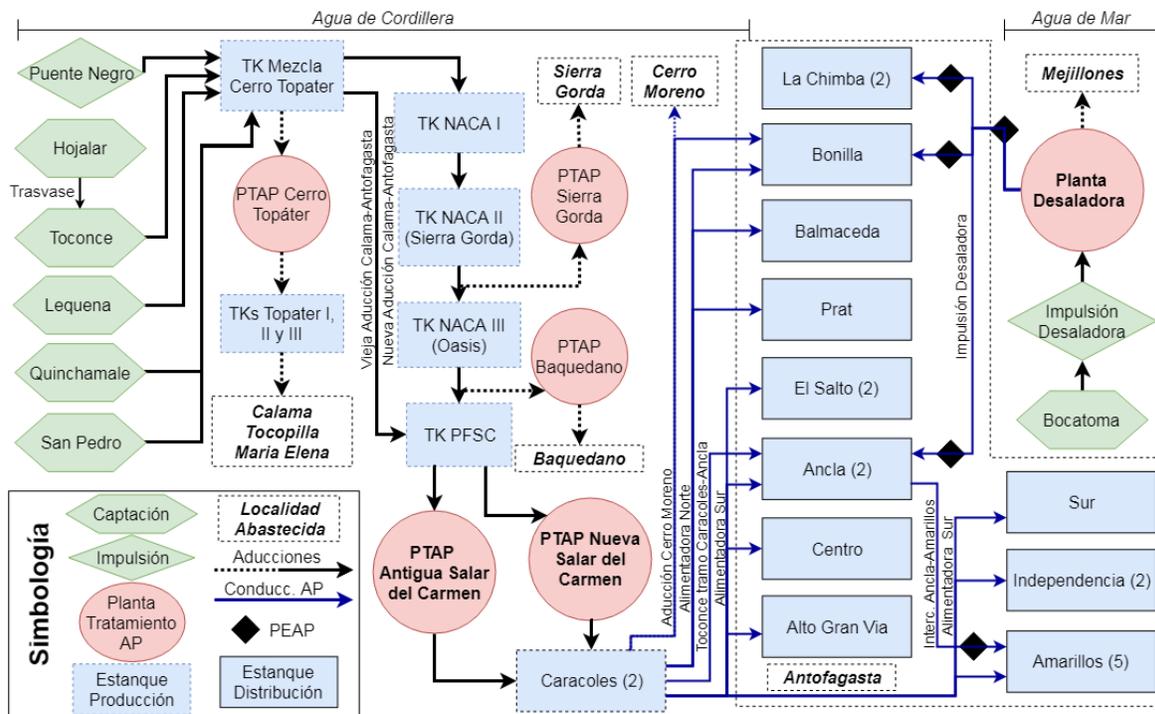
Tras la aplicación de la metodología propuesta para la presente investigación, a continuación se presentan los principales obtenidos que permiten responder al análisis propuesto sobre la vulnerabilidad del sistema de abastecimiento hídrico de la ciudad de Antofagasta, y las implicancias sobre la seguridad hídrica asociadas con la incorporación del agua desalada al caudal suministrado en la ciudad. Los resultados se estructuran de acuerdo con los objetivos específicos propuestos, respondiendo individualmente a cada uno de ellos. De esta manera, se realizó una caracterización del sistema de abastecimiento hídrico, describiendo las diferentes etapas, infraestructura y flujos asociados a este, para luego analizar las amenazas y eventos catastróficos a las que se expone debido a sus características específicas, y finalmente el impacto al sistema producido a partir de la ocurrencia de estos eventos. El análisis se sustenta en la elaboración de matrices de vulnerabilidad operativa, física y administrativa, aplicadas a los diferentes escenarios propuestos y basados en la presencia parcial o total de agua desalada en el suministro hídrico, y que en conjunto definen la seguridad del sistema de abastecimiento frente a las diferentes amenazas consignadas, además de establecer parámetros cuantitativos de análisis y comparación entre escenarios.

7. Caracterización del sistema de abastecimiento hídrico

El sistema de abastecimiento hídrico de la ciudad de Antofagasta comprende la totalidad del proceso destinado a suministrar agua potable hacia sus consumidores finales ubicados en este centro urbano, abarcando desde su captación en las diferentes fuentes que posee la empresa sanitaria hasta sus matrices que componen su red de distribución. Para ello se consideran los parámetros de vulnerabilidad operativa propuestos por el CEPIS (2000) y que consideran la capacidad de abastecimiento, la continuidad del servicio y la calidad del agua potable suministrada como factores para definir la seguridad hídrica en términos operativos. De esta manera, se obtuvieron resultados que permiten describir el sistema de abastecimiento y su evolución en cuanto a sus fuentes y, por consecuencia, también de sus parámetros de vulnerabilidad operativa.

7.1. Descripción del sistema de abastecimiento

A continuación, se describe y analiza el sistema de abastecimiento de agua potable de la ciudad de Antofagasta en términos de su infraestructura y funcionamiento. Tal como lo muestra el Esquema 1, el sistema de abastecimiento se divide a grandes rasgos en dos etapas. La primera corresponde a la producción de agua potable, considerando desde las captaciones de aguas crudas en las diferentes fuentes de abastecimiento, su conducción hasta las plantas de tratamiento y su posterior potabilización y almacenamiento. La segunda etapa es la de distribución de agua potable, considerando toda el agua que ya ha sido potabilizada, abarcando entonces las conducciones de agua desde las plantas de tratamiento hasta los estanques de distribución, ubicados en los sectores altos a lo largo de la ciudad, y la red que reparte el recurso hasta sus consumidores finales.



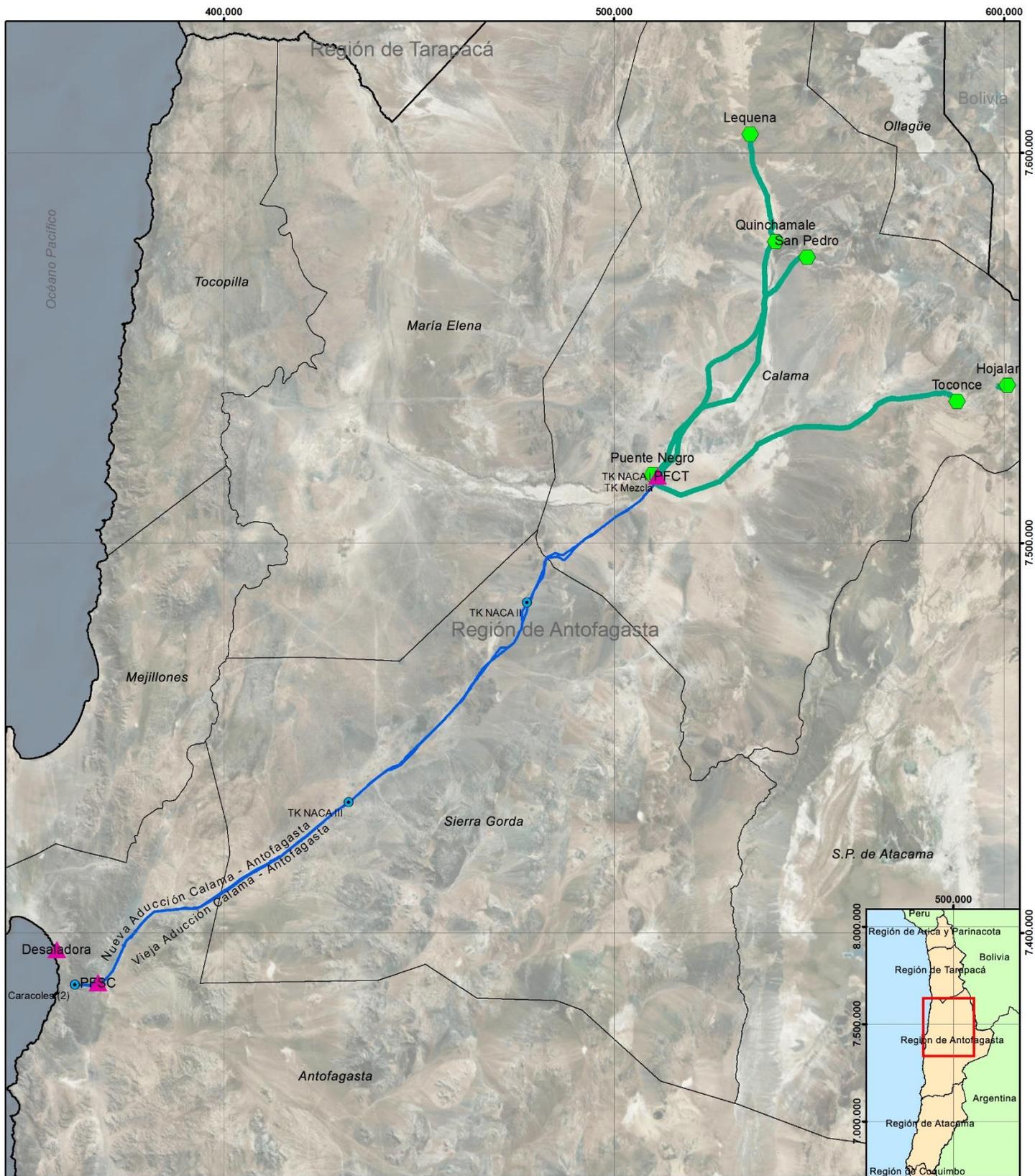
Esquema 1: Sistema de abastecimiento de agua potable de Antofagasta
 Fuente: Elaboración propia en base a SISS (2006; 2011c; 2017)

7.1.1. Producción de agua potable

Fuentes	Volumen dispon. (m ³)	Capac. de prod. (L/s)	Producción Media (L/s)	Producción Ciudad (L/s)
Cordillera	25.000 (93,3%)	1.000 (54,1%)	1.350,59 (61,4%)	532,13 (39,8%)
Mar	1.800 (6,7%)	850 (45,9%)	850 (38,6%)	805,8 (60,2%)
Totales	26.800 (100%)	1.850 (100%)	2.200,59 (100%)	1.337,93 (100%)

Tabla 12: Resumen de la capacidad actual de producc. de agua potable de Antofagasta
 Fuente: Elaboración propia en base a Aguas Antofagasta (2017) y SISS (2017)

La ciudad de Antofagasta abastece su demanda hídrica a partir de fuentes de agua de cordillera y de agua de mar. En este sentido, el sistema de producción de agua potable contempla la infraestructura asociada a las captaciones de agua cruda en cada fuente, su conducción y potabilización, hasta su acopio en los estanques de almacenamiento del agua tratada. La infraestructura de producción de agua potable para el abastecimiento de la ciudad de Antofagasta se extiende también a través de las comunas de Calama y Sierra Gorda, y su distribución se muestra en la Cartografía 2. Tal como se detalla en la Tabla 12, en términos generales, el sistema de producción posee una capacidad de 1.850L/s de suministro de agua potable (SISS, 2017), pero abastece con cerca de 1.338L/s a la ciudad de Antofagasta, y aunque la capacidad de producción y almacenamiento de agua de cordillera es mayor que la de agua de mar, esta última fuente es la que más caudal aporta al abastecimiento hídrico de la ciudad (Aguas Antofagasta, 2017). A continuación, se describen principales las características de los componentes asociados a la producción de agua potable para el abastecimiento de la ciudad de Antofagasta.



Leyenda

- ◆ Captaciones
- Aducciones
- Aducc. Calama-Antofagasta
- ▲ PTAP
- Estanques Producción

0 10 20 40 60 Km

N

Proyección UTM
Datum WGS84
Huso 19S
Escala
1:1.250.000

fau
UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE ARQUITECTURA Y URBANISMO
Escuela de Pregrado
Departamento de Geografía

Cartografía 2: Sistema de producción de agua potable de la ciudad de Antofagasta
Fuente: Elaboración propia en base a SISS (2017)

7.1.1.1. Fuentes y sistemas de captaciones

La captación de agua cruda se realiza desde dos grandes fuentes, como lo son los cursos de agua ubicados en la cordillera de la región, así como el agua de mar a través de infraestructura específica para cada una, cuyas características se detallan en la Tabla

	Fuente	Q Der. de agua (L/s)	Captación	Q Medio captado (L/s)	Capacidad (L/s)
Agua de Cordillera	Río Linzor	50 (3%)			
	Río Hojalar	140 (8,4%)	Toconce	452,25 (14,8%)	610 (12,2%)
	Río Toconce	470 (28,2%)			
	Río Loa	550 (33%)	Lequena	494,57 (16,2%)	576 (11,5%)
	Río Loa	300 (18%)	Quinchamale	296,33 (9,7%)	400 (8%)
	Río Loa	69 (4,1%)	Puente Negro	45,14 (4,1%)	150 (3%)
	Río San Pedro	90 (5,4%)	San Pedro	89,99 (2,9%)	100 (2%)
	Agua de mar - Océano Pacífico	-	Bocatoma Desaladora	>1.700 (55,7%)	3.172 (63,3%)
	Totales	1.669 (100%)		3.050,59 (100%)	5.008 (100%)

Tabla 13: Captaciones de agua para la ciudad de Antofagasta por fuentes de abastecimiento
Fuente: Elaboración propia en base a Aguas Antofagasta (2014a; 2017) y SISS (2017)

13. Los sistemas de captaciones aguas de cordillera están compuestos por las captaciones y sus respectivas aducciones, extrayendo el recurso desde 5 diferentes cursos de agua por medio de 7 captaciones, y conduciéndolo hasta el Estanque de Mezcla⁵² ubicado al interior del recinto de la Planta de Filtros Cerro Topáter⁵³, en la ciudad de Calama (SISS, 2006). Las principales fuentes de agua de cordillera corresponden a los ríos Loa, Toconce y sus afluentes, encontrándose las captaciones en diferentes puntos de sus respectivos cursos, y sobre los cuales la empresa posee un caudal total de 1.669L/s de derechos de agua (Aguas Antofagasta, 2014a). Pese a las características de mala calidad del agua de cordillera dada la concentración de arsénico y otros elementos nocivos para el consumo humano, Aguas Antofagasta asegura que el proceso de potabilización las reduce ajustándose a la normativa vigente de calidad de agua potable (Maino & Recabarren, 2011).

Por su parte, los sistemas Toconce, Lequena y Quinchamale son los con mayor capacidad de captación, derechos de agua y aporte hídrico al sistema de producción de cordillera, ya que en conjunto representan cerca del 90% de los 1.836L/s de capacidad total de captación de esta fuente. Todas las captaciones son de tipo barrera, predominantemente de hormigón, y sólo las 3 principales cuentan con desarenador. Las características de cada una de las captaciones y su infraestructura asociada se especifican en el Anexo 8. La Captación Toconce incorpora además los caudales correspondientes a los derechos que posee Aguas Antofagasta sobre las aguas del Río Linzor, afluente del Río Toconce, y del Río Hojalar, captadas y trasvasadas hacia el Río Toconce (SISS, 2006). Adicionalmente, el Sistema San Pedro capta las aguas entregadas por CODELCO⁵⁴ a través del trasvase continuo de 90L/s realizado aguas arriba de la captación y conducido hasta la Aducción Quinchamale, por lo que, si bien esta fuente no puede considerarse natural ni su caudal disponible para ser captado, es la única que recibe permanentemente caudales cercanos al total de sus derechos de agua y no depende de la disponibilidad hídrica, a diferencia del resto de las captaciones.

⁵² En adelante: EMCT.

⁵³ En adelante: PFCT.

⁵⁴ Estas aguas fueron incorporadas mediante convenios en 1995 y 1996, los cuales traspasan la propiedad de la aducción y del caudal señalado hacia la empresa sanitaria, principalmente motivado por el crecimiento demográfico en localidades de la región asociado a las faenas mineras de CODELCO (SISS, 2006).

Aducciones		Longitud (Km)
Agua de Cordillera	Toconce	90,72 (31,2%)
	Hojalar	3,58 (1,2%)
	Lequena	102,97 (35,3%)
	Quinchamale	74,73 (25,6%)
	Puente Negro	1,73 (0,6%)
Agua de mar	San Pedro	17,32 (5,9%)
	Ducto Desaladora	0,35 (0,1%)
Total		291,4 (100%)

Tabla 14: Aducciones de los sistemas de captación de agua para la ciudad de Antofagasta
Fuente: SISS (2017)

La conducción de las aguas captadas hasta el EMCT se realiza a través de 290Km de aducciones detalladas en la Tabla 14, construidas en un 80% de acero, y en menor medida de acero revestido y hierro dúctil, y con diámetros predominantes entre 400 y 600mm en más del 70% de las conducciones de agua, y principalmente superiores a 600mm en el resto de las aducciones (SISS, 2017). Mientras que la Aducción Lequena y la Impulsión Puente Negro conducen el recurso directamente hasta el EMCT, la Aducción Hojalar funciona como trasvase del caudal extraído desde la captación del mismo nombre hacia el Río Toconce, y la Aducción Quinchamale incorpora además las aguas del Sistema San Pedro.

Adicionalmente, las aducciones Toconce y Quinchamale poseen 5 y 3 válvulas reductoras de presión respectivamente, y las aducciones Lequena y San Pedro poseen una cada una, mientras que el resto de las aducciones no posee este tipo de mecanismos (SISS, 2006).

En términos generales, en el periodo 2003-2015, las captaciones de agua de cordillera produjeron en promedio un total anual cercano a los 42,6 millones de m³ anualmente, equivalente a un caudal medio de 1.350,59L/s, siendo los sistemas Lequena y Toconce y Quinchamale los con mayor aporte de caudal, representando en conjunto cerca del 92% de este. Los años 2007 y 2015, y los meses de agosto y febrero, corresponden a los con mayor y menor producción respectivamente. La producción rondaba entre 41,7 y 42,7 millones de m³ entre el 2003 y 2006, aumentando significativamente su caudal en 2007 para luego mantenerse entre los 42,8 y 43,9 millones de m³ hasta el 2014 (Aguas Antofagasta, 2017). Los detalles del caudal captado por año y mes se detallan en los Anexos 9 y 10 respectivamente. Finalmente, y considerando la información entregada por Aguas Antofagasta (2017) en cuanto a los porcentajes de distribución del agua de cordillera, cabe destacar que actualmente el 39,4% del total producido por estas fuentes está destinado al abastecimiento de la ciudad de Antofagasta, mientras que, del porcentaje restante, el 47% se destina al abastecimiento de Calama, el 12,8% al eje de Tocopilla, y el resto a la comuna de Sierra Gorda (0,7%). Según lo anterior, las captaciones de cordillera produjeron un caudal promedio de 532L/s de agua cruda destinado al abastecimiento de Antofagasta para el periodo 2003-2015.

En cuanto a las fuentes de agua de mar, la extracción se realiza por medio de una toma abierta, desde una torre de captación de hormigón ubicada a 350m de la línea de costa conectada al ducto de captación submarino de polietileno de alta densidad⁵⁵ con 1.600mm de diámetro, que conduce el recurso hacia el edificio de captación y lo trasvasa a una cámara de aspiración o cántara ubicada en su interior, y desde donde se impulsa hacia la planta para su tratamiento (ESSAN, 2001a). Considerando que el proceso de desalación realizado en la Planta Desaladora de Antofagasta genera un 50% de descarte del caudal de agua cruda impulsada, la capacidad de captación ha evolucionado en relación con el crecimiento de la planta, requiriendo al menos el doble del caudal producido para asegurar el suministro en cada etapa (Aguas, Antofagasta, 2013a), y aunque actualmente requeriría

⁵⁵ En adelante: HDPE.

de 1.700L/s para satisfacer la producción actual, posee una capacidad de captar 3.172L/s de caudal para su tratamiento. Adicionalmente, al igual que con las fuentes de cordillera, la empresa sanitaria declara que el agua producida por la planta desaladora cumple la normativa asociada a su calidad, ya que cuenta con la tecnología para potabilizar aguas con grandes concentraciones de elementos nocivos para el consumo humano (Aguas Antofagasta, 2013a; Cerda, 2012). Cabe destacar que la legislación chilena no considera la existencia de derechos de agua sobre las aguas marinas ni parámetros para medir la calidad de agua de mar destinada a consumo humano.

7.1.1.2. Aducciones

El agua captada en las fuentes de cordillera y conducida hasta el EMCT, es posteriormente destinada para su potabilización en las Plantas de Filtros Salar del Carmen⁵⁶ y su almacenamiento en los Estanques Caracoles principalmente por medio de dos aducciones denominadas Vieja y Nueva Aducción Calama-

	Aducción	Longitud (Km)	Capacidad (L/s)
Agua de Cordillera	NACA	217,18 (49,8%)	800 (17,5%)
	VACA	218,51 (50,1%)	610 (13,33%)
Agua de mar	Imp. Desal. (Prod.)	0,13	1.200 (26,2%)
	Segunda Imp. Desal.	0,08	1.972 (43%)
Total		435,9 (100%)	4.582 (100%)

Tabla 15: Aducciones del sistema de producción de Antofagasta
Fuente: Elaboración propia en base a Aguas Antofagasta (2013a) y SISS (2006; 2017)

Antofagasta⁵⁷. La primera fue construida en 1958 y corresponde a la conducción montada desde la Captación Toconce en 1958 y, tras las mejoras realizadas al sistema de abastecimiento hídrico, como la incorporación de las PFSC del sistema de producción de agua de cordillera, fue seccionada en las Aducciones Toconce y VACA, hacia y desde el EMCT respectivamente (SISS, 2006). Las características se detallan en la Tabla 15, y los detalles de cada tramo de la VACA se encuentran en el Anexo 11, pero en términos generales se puede destacar que fue construida principalmente con acero revestido, a excepción de pequeños tramos de hierro dúctil implementados en 2004, y posee diámetros entre 450mm y 800mm en su trazado (SISS, 2017). Esta aducción fue diseñada para conducir hasta 610L/s de caudal y no cuenta con mecanismos reductores de presión (SISS, 2006).

Por su parte, la NACA se encuentra operativa desde 1981 y fue concebida para aumentar el caudal de conducción de agua cruda desde el EMCT hasta las PFSC, con una longitud de 218Km y diseñada para conducir hasta 800L/s. Las características de cada tramo de esta aducción se especifican en el Anexo 11. Fue construida íntegramente con hierro dúctil, con diámetros de 500mm a 700mm aguas abajo, y se encuentra provista de una manga de polietileno que actúa de protección exterior frente al terreno altamente agresivo, y de revestimiento interior de mortero de cemento (SISS, 2006). Debido a las condiciones geográficas y a la pendiente en el trazado de la aducción, y a diferencia de la VACA, ha sido necesaria la inclusión de mecanismos reguladores y reductores de presión, y de cortadores de flujo. Los primeros corresponden a 11 dispositivos controladores de presión, de los cuales 7 son estaciones reductoras de presión, capaces de regular el caudal entre los 300 y 800L/s. El resto de los mecanismos corresponden a válvulas de corte que permiten aislar tramos de hasta 20Km, y 4 estanques de regulación, ubicados uno en cada extremo y los otros dos en las localidades de Baquedano y Sierra Gorda respectivamente (SISS, 2011c), y cuyas características se describen más adelante. Los detalles de la infraestructura asociada a las aducciones se detallan en el Anexo 12. La aducción cuenta también con ventosas aerocinéticas, desagües convencionales, diafragmas

⁵⁶ En adelante: PFSC.

⁵⁷ En adelante: VACA y NACA respectivamente.

escamoteables y 3 medidores de caudal, estos últimos ubicados en la salida del EMCT, a la llegada al Estanque de las PFSC y a la llegada a los Estanques Caracoles respectivamente (SISS, 2006).

Adicionalmente, ambas aducciones poseen sus respectivas extensiones desde las PFSC hasta los Estanques Caracoles, suministrándolos con agua potable y pudiendo abastecerlos directamente desde la PFCT por medio de su conexión directa con la aducción en caso de ser requerido (SISS, 2006). Estos tramos poseen poco más de 6Km de longitud y oscilan entre los 500mm y 800mm de diámetro, y en el caso del asociado a la NACA, es de la misma materialidad, mientras que la de la VACA es de acero negro (SISS, 2017). Sus características principales se muestran en la Tabla 15 y sus tramos se detallan en el Anexo 11. Cabe destacar que tras la implementación de la Planta Desaladora de Antofagasta y la consecuente disminución de la dependencia de fuentes de agua de cordillera, la conducción de agua cruda ha pasado a ser realizada casi únicamente a través de la NACA, por lo que la VACA actualmente aporta muy poco caudal para el abastecimiento hídrico de la ciudad de Antofagasta, siendo utilizada mayormente para el abastecimiento de clientes de la minería y utilizada especialmente en casos de emergencia (Aguas Antofagasta, 2017). En este sentido, si bien se considera como parte de la infraestructura de producción de agua de cordillera, el análisis contemplará principalmente a la NACA, debido además a que su capacidad es muy superior al caudal destinado a abastecer la ciudad de Antofagasta.

En cuanto a las impulsiones asociadas al proceso de desalación, encargadas de conducir el agua de mar captada en el edificio de captación hasta su tratamiento en la Planta Desaladora de Antofagasta, la primera corresponde a la construida en el proyecto original de la planta, de 129m de longitud y 1.000mm de diámetro, construida en polietileno reforzado con fibra de vidrio, y diseñada para conducir un caudal de 1.200L/s (ESSAN, 2001a). Tras la implementación del proyecto de ampliación de la planta, se incorporó una segunda impulsión del mismo material que la preexistente, pero de 1.200mm de diámetro y 83m de longitud, con una capacidad de 1.972L/s de caudal. Esta impulsión se conecta a la preexistente por medio de un bypass, pudiendo cambiar el flujo en caso de ser necesario y cubriendo la demanda total de la planta sin problemas (Aguas Antofagasta, 2013a).

7.1.1.3. Plantas de tratamiento de agua potable⁵⁸

	Nombre de Planta	Capac. (L/s)
Agua de Cordillera	P. F. Antigua Salar del Carmen	500 (27%)
	P. F. Nueva Salar del Carmen	500 (27%)
Agua de mar	Planta Desaladora de Antofagasta	850 (46%)
	Total	1.850 (100%)

Tabla 16: PTAP para la ciudad de Antofagasta
Fuente: Elaboración propia en base a Aguas Antofagasta (2013a) y SISS (2017)

Debido a que Antofagasta es abastecida con agua desde diferentes fuentes, el proceso de potabilización dependerá del origen del recurso hídrico. En este sentido, en el tratamiento de agua cruda intervienen tres PTAP, dos de tipo convencionales localizadas en el Salar del Carmen, y una planta desaladora de osmosis inversa ubicada en el sector de La Chimba, en la ciudad de

Antofagasta. Las principales características de estas plantas se muestran en la Tabla 16. Cabe señalar que la capacidad de producción de cada planta es la que determina la capacidad de producción por cada fuente. A su vez, aunque el sistema de abastecimiento también considera la PFCT en la ciudad de Calama, debido al emplazamiento de infraestructura destinada a abastecer la ciudad de Antofagasta en su interior, y las ubicadas en las localidades de Baquedano y Sierra Gorda por el

⁵⁸ En adelante: PTAP.

caudal destinado a abastecer a sus respectivas localidades, solo se incluyen a modo de referencia, y sus detalles se abordan en sus respectivos componentes. El sistema de potabilización de agua de cordillera destinado a abastecer la ciudad de Antofagasta está compuesto por dos Plantas de Filtros denominadas Antigua y Nueva Salar del Carmen⁵⁹, operativas desde 1969 y 1988 respectivamente, y su infraestructura asociada. Cada una de las plantas fue diseñada para procesar un caudal 500L/s⁶⁰, pudiendo operar a sobrecarga con 550L/s (SISS, 2006). Sin embargo, debido a que el suministro de agua cruda es mucho menor a la capacidad de las plantas de filtros, el proceso se concentra principalmente en la planta nueva, que representa cerca del 60% de la producción de esta instalación (Aguas Antofagasta, 2017). El punto de ingreso al recinto es a través del Estanque PFSC, el cual recibe y almacena las aguas crudas de la NACA y las deriva a las unidades de tratamiento de cada planta. Una vez tratada, el agua es conducida hasta los Estanques Caracoles para su almacenamiento y posterior conducción hacia los estanques de distribución emplazados en la ciudad. Las características del proceso de potabilización de las PFSC se detallan en el Anexo 13.

Por su parte, la Planta Desaladora de Antofagasta, también denominada “La Chimba”, corresponde a la principal fuente de abastecimiento hídrico de la ciudad de Antofagasta. Ubicada al norte de la ciudad, se encuentra operativa desde abril de 2003 y es de tipo osmosis inversa. Su diseño contemplaba una implementación en 4 fases, comenzando con una producción de 150L/s, para luego aumentar a 300L/s en 2005, 450L/s en 2007, llegando a su capacidad completa en 2011, con un caudal de 600L/s (ESSAN, 2001a). Tras una última ampliación realizada en 2016, la planta aumentó su caudal a 850L/s (Aguas Antofagasta, 2013a), destinando el 94,8% (805,8L/s) al sistema de abastecimiento de la ciudad de Antofagasta, y el 5,2% (44,2L/s) restante para abastecer la ciudad de Mejillones (Aguas Antofagasta, 2017). El agua de mar es captada por las bocatomas descritas previamente e impulsada hasta la planta para su tratamiento, tras el cual el agua producida es posteriormente almacenada en un estanque ubicado dentro del recinto y desde donde comienza la impulsión de la Planta Desaladora. El caudal de salmuera resultante del proceso de desalación, equivalente al caudal desalado, es dispuesta en el mar por medio de un emisario submarino de 200m de longitud y 1.200mm de diámetro. Las obras de ampliación realizadas en 2016 incluyeron una segunda línea de impulsión de agua y de tratamiento de osmosis inversa con su respectiva infraestructura, además de la implementación de nuevos componentes y reemplazo de algunos existentes, como bombas y filtros, por otros de mayor capacidad (Aguas Antofagasta, 2013a).

Cabe destacar que el proceso de desalación requiere una gran cantidad de energía eléctrica para producir agua potable, tanto para su impulsión desde el mar, como para su tratamiento y posterior impulsión a los estanques de distribución. El consumo total de la planta ha variado según su capacidad de producción, elevándose junto al caudal producido. Sin embargo, con la implementación de sus diferentes fases, la energía requerida para el proceso de desalación descendió en 0,1kWh por m³, pero tras la última ampliación su costo se elevó en 0,62kWh por m³. Según lo anterior, con el crecimiento experimentado por la planta, su consumo ha pasado de 2,89MWh en su primera fase hasta 11,36MWh con su implementación completa, requiriendo

⁵⁹ En adelante: PFASC y PFNSC respectivamente.

⁶⁰ El proceso de potabilización implica la generación de 0,0923m³ de lodos por cada litro por segundo filtrado en la planta, lo que significa la extracción poco significativa de un 0,096% del contenido del agua cruda y, por lo tanto, del caudal de cordillera destinado a la ciudad de Antofagasta, por lo que no se considerará como factor dentro de la producción de agua potable.

actualmente y tras su última ampliación un total de 18MWh para su funcionamiento, lo que se traduce en un costo energético actual de 5,88kWh para producir 1m³ de agua potable. Cabe señalar que el mayor consumo energético se produce en el proceso de desalación, requiriendo cerca del 71% de la demanda energética, mientras que las impulsiones de agua de mar y hacia los estanques de distribución utilizan el 10% y 19% restantes respectivamente (Aguas Antofagasta, 2013a).

7.1.1.4. Estanques de producción

Los estanques utilizados en la producción de agua potable se pueden diferenciar según el componente al que se encuentran asociados y, por consiguiente, a las fuentes y funciones que cumplen, detallados en la Tabla 17 y en el Anexo 14. Por una parte, entre los estanques abastecidos con agua cruda de cordillera se encuentran los de ingreso a la PFCT y a la PFSC, el primero mezclando las diferentes captaciones y conduciéndolas hasta el segundo, con 2.000m³ y 10.000m³ de volumen respectivamente. Adicionalmente, la NACA cuenta con 3 estanques que sirven como reguladores de presión, el primero de ellos de 5.000m³ de volumen ubicado al interior del recinto de la PFSC, y los dos restantes de 10.000m³ emplazados cerca de las localidades de Sierra Gorda y Baquedano (Oasis) respectivamente (SISS, 2017). Finalmente, tras la potabilización del agua, es conducida y almacenada en los Estanques Caracoles ubicados en la quebrada del mismo nombre, correspondientes a 2 unidades de 12.500m³ de volumen cada uno, y desde donde nacen las alimentadoras que conducen el agua hasta los estanques de distribución de la ciudad (SISS, 2006). Por su parte, el agua de mar potabilizada en la Planta Desaladora de Antofagasta se almacena en un estanque de 1.800m³ de volumen ubicado al interior del recinto, y desde donde comienza la impulsión de la desaladora que alimenta los estanques abastecidos con esta fuente. Cabe destacar que, a diferencia del resto de los estanques de producción, construidos en hormigón armado, los Estanques Caracoles son los únicos de acero revestido (SISS, 2017). Además, estos últimos son los únicos que almacenan agua potabilizada, por lo que son comparables a la función del estanque de la planta desaladora y equivalen a la capacidad de almacenamiento del sistema de producción.

Estanques de producción		Capacidad (m ³)
Agua de Cordillera	Mezcla PFCT	2.000 (3,1%)
	NACA I	5.000 (7,8%)
	S. Gorda (NACA II)	10.000 (15,7%)
	Oasis (NACA III)	10.000 (15,7%)
	Estanque PFSC	10.000 (15,7%)
	Caracoles I	12.500 (19,6%)
	Caracoles II	12.500 (19,6%)
A. de mar	Desaladora	1.800 (2,8%)
Total		63.800 (100%)

Tabla 17: Estanques del sistema de producción de agua para la ciudad de Antofagasta
Fuente: SISS (2017)

7.1.1.5. Plantas elevadoras de agua cruda⁶¹,

	PEAC	Capac. (L/s)
Agua de Cordillera	Lequena 1	650 (14,1%)
	Lequena 2	650 (14,1%)
	Puente Negro	150 (3,2%)
Agua de mar	Imp. Desal. (Prod.)	1.200 (26%)
	2° Imp. Desal.	1.972 (42,7%)
Total		4.622 (100%)

Tabla 18: PEAC del sistema de abastecimiento para la ciudad de Antofagasta

Fuente: Elaboración propia en base a Aguas Antofagasta (2013a) y SISS (2017)

En el sistema de producción de agua potable intervienen 5 PEAC detalladas en la Tabla 18 y en el Anexo 15, 2 de las cuales operan con agua de mar, mientras que el resto lo hacen con fuentes de cordillera. De estas últimas, dos se encuentran en la Aducción Lequena, construidas en 2014 e integradas por dos bombas cada una, ambas diseñadas con un caudal de 650L/s y con una potencia cercana a los 600KW. Adicionalmente, la planta elevadora que compone la Impulsión Puente Negro posee una capacidad de 150L/s

⁶¹ En adelante: PEAC.

de caudal y una potencia de 138KW y se compone por 2 bombas (SISS, 2017). Por su parte, las PEAC asociadas al proceso de desalación se ubican en el edificio de captación de agua de mar, y mientras la construida con el proyecto original cuenta con 6 bombas con una potencia total de 775KW y 1.200L/s de capacidad, la integrada en la ampliación de la planta se compone de 4 bombas de 250KW cada una, con una capacidad conjunta de 1.972L/s de caudal. Esta última tiene la capacidad de cubrir el caudal impulsado hasta la desaladora por sí sola, pudiendo reemplazar a la original en caso de ser requerido (Aguas Antofagasta, 2013a), mientras que entre ambas impulsiones representan el 68,7% de la capacidad conjunta de las PEAC.

7.1.2. Distribución de agua potable

Posterior al tratamiento y almacenamiento del agua potable, comienza la etapa de distribución, abarcando la infraestructura derivada de los estanques de almacenamiento de las PFSC y de la Planta Desaladora hasta su distribución por las cañerías matrices de la ciudad. Para ello se consideran las conducciones e

Fuente	Población	Long. Red Distr. (Km)	Volumen disp. (m ³)	Q medio (L/s)	L/hab/día
Agua de Cordillera	120.247 (36,1%)	275,87 (41,8%)	11.450 (19,2%)	257,2 (33%)	184,8
Agua de Mar	20.363 (6,1%)	57,37 (8,7%)	6.000 (10,1%)	76,3 (9,8%)	323,74
Agua de Mezcla	192.186 (57,7%)	326,04 (49,5%)	42.246 (70,8%)	444,8 (57,2%)	199,97
Totales	332.796 (100%)	659,28 (100%)	59.696 (100%)	778,3 (100%)	202,06

Tabla 19: Resumen de la distribución de agua potable en Antofagasta
Fuente: Elaboración propia en base a SISS (2011c; 2017)

impulsiones que sirven como alimentadoras de los estanques, desde donde se distribuye a los diferentes sectores del área urbana. En términos generales, y como se detalla en la Tabla 19, las aguas de mezcla son las con mayor presencia en la ciudad, con un volumen disponible de almacenamiento de 42.246m³ y un suministro de 444,8L/s de caudal medio, abasteciendo a cerca del 58% de la población urbana, mientras que, en los mismos términos, la distribución de agua desalada es la que presenta menores valores. Sin embargo, en cuanto al suministro diario por habitante, esta última fuente supera ampliamente a las otras dos, que presentan valores similares entre sí. La infraestructura de distribución de agua potable se muestra en la Cartografía 3. A continuación, se describen las características de la infraestructura encargada de distribución de agua potable de la ciudad de Antofagasta.

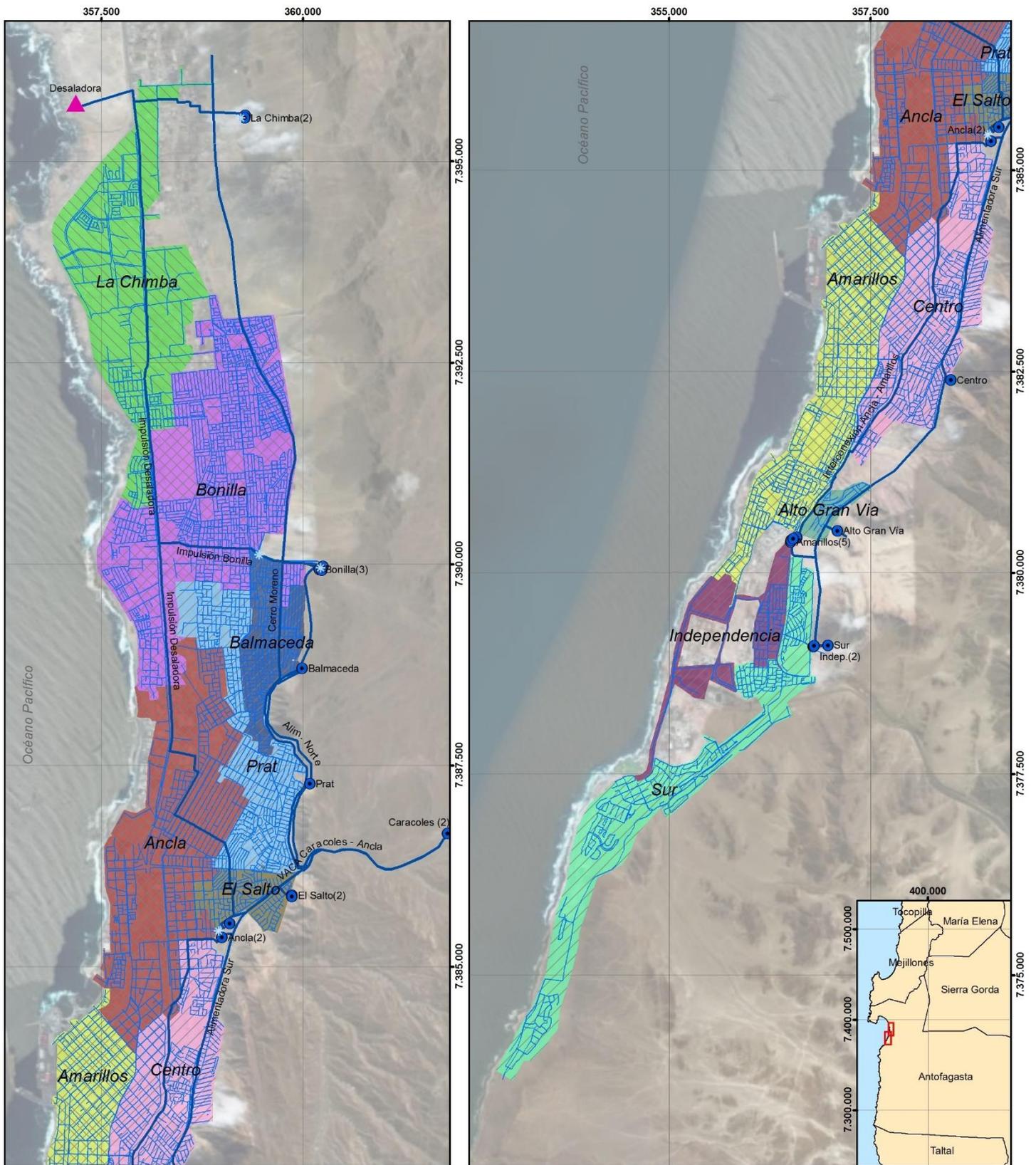
7.1.2.1. Conducciones

	Nombre	Longitud (Km)
Agua de Cordillera	Alimentadora Norte	5,79 (10,8%)
	Alimentadora Sur	11,93 (22,3%)
	VACA Caracoles - Ancla	3,78 (7,1%)
	Aducción Cerro Moreno	10,21 (19,1%)
Agua de mar	Impulsión Desaladora	15,64 (29,2%)
Agua de mezcla	Interconexión Ancla - Amarillos	6,23 (11,6%)
	Total	53,58 (100%)

Tabla 20: Conducciones de agua potable para el abastecimiento de la ciudad de Antofagasta
Fuente: SISS (2017)

La conducción del agua potable es realizada desde los Estanques Caracoles a través de 4 aducciones de agua potable por flujo gravitacional, y desde la Planta Desaladora de Antofagasta a través de una impulsión de agua potable, conduciendo el recurso hasta los estanques de distribución ubicados en la parte alta de la ciudad por medio de sus respectivas derivaciones. Adicionalmente, existe una interconexión que conduce aguas desde los Estanques Ancla hacia los Estanques Amarillos, y que también se considera dentro de la etapa de producción de agua potable (Aguas

Antofagasta, 2011a). Las principales características de las conducciones se observan en la Tabla 20.



Leyenda

- ▲ PTAP
- Estanques
- ★ PEAP
- Conducciones
- Red de Distribución

Fuentes

- ▨ Cordillerana
- ▨ Desalada
- ▨ Mixta

Zonas de distribución

- La Chimba
- Bonilla
- Balmaceda
- Prat
- Ancla
- Centro
- Alto Gran Via
- Amarillos
- Independencia
- Sur

0 0,5 1 2 3 Km

N

Proyección UTM
Datum WGS84
Huso 19S
Escala
1:60.000

fau
UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE ARQUITECTURA Y URBANISMO
Escuela de Pregrado
Departamento de Geografía

Cartografía 3: Infraestructura de distribución de agua potable de la ciudad de Antofagasta
Fuente: Elaboración propia en base a Aguas Antofagasta (2011a) y SISS (2017)

La conducción de agua potable se realiza a través de 53,58Km de tuberías, construidas principalmente en hierro dúctil y acero negro, con un 90,8% y 6,84% respectivamente. Los diámetros superiores a 500mm son los predominantes, abarcando un 49% de las conducciones, mientras que las tuberías con diámetros hasta 300mm y hasta 500mm equivalen al 28,4% y 22,6% respectivamente (SISS, 2017). Los detalles de cada tramo de las conducciones de agua potable y su infraestructura asociada se especifican en el Anexo 16. De las conducciones de agua de cordillera, las más importantes corresponden a las Alimentadoras Norte y Sur, localizadas en la parte alta del límite urbano, y encargadas de abastecer directamente a 5 y 14 estanques respectivamente. Por su parte, la impulsión de la Planta Desaladora de Antofagasta es la más extensa y con mayor diámetro de las conducciones de agua potable, emplazada principalmente a través del trazado de la Avenida Pedro Aguirre Cerda, una de las principales arterias urbanas, y abasteciendo directamente a 6 estanques distribuidos en 3 sectores, dos de los cuales cuentan adicionalmente con suministro de aguas de cordillera. Además, uno de ellos, abastecido por los Estanques Ancla, conduce agua de fuentes mixtas hasta los Estanques Amarillos (SISS, 2017). La interconexión y trasvase de aguas entre estanques con diferentes fuentes es la que determina la existencia de los 3 tipos de agua potable identificados en la ciudad, determinando si se abastecen con fuentes cordilleranas, proveniente de la desalación o una mezcla de ambas. Cabe destacar que la distribución de agua potable en Antofagasta incluye a la Aducción Cerro Moreno, y aunque conduce aguas desde los Estanques Caracoles hasta los estanques del mismo nombre, fuera del límite urbano, la importancia de esta aducción radica en su aporte de agua a los Estanques Bonilla a partir de una derivación, por lo que solo se considerará para el estudio el tramo comprendido entre los estanques mencionados.

7.1.2.2. Estanques de distribución

El sistema de distribución de agua potable de la ciudad de Antofagasta se realiza desde 21 estanques redistribuidores repartidos a lo largo de la ciudad y que abastecen a sus respectivos sectores. De estos estanques, detallados en la Tabla 21 y en el Anexo 14, 10 fueron construidos en acero revestido y 11 en hormigón armado, sumando un volumen total de 59.696m³ de capacidad de almacenamiento de agua potable (SISS, 2017). En términos de volumen y número de estanques predominan las aguas de mezcla como fuente de abastecimiento, destacándose los Estanques Ancla como los con mayor capacidad de la ciudad, debido principalmente a su función como colector de las aguas de la Impulsión de la Desaladora y a que parte de su caudal es destinado al abastecimiento de los Estanques Amarillos. Por su parte, los únicos estanques abastecidos con agua desalada corresponden a los de La Chimba, mientras que los abastecidos con fuentes de cordillera representan el 19,2% de la capacidad total de los estanques de redistribución. La construcción de los estanques se ha relacionado estrechamente con la incorporación de nuevas fuentes y el aumento de la disponibilidad hídrica para abastecer la ciudad, destacándose los Estanques Amarillos con la incorporación de la Captación

	Estanques	Capacidad (m ³)
Agua de Cordillera	Balmaceda	2000 (3,4%)
	Prat	2.000 (3,4%)
	El Salto I	500 (0,3%)
	El Salto II	200 (0,8%)
	Centro	2.000 (3,4%)
	A. Gran Vía	750 (1,3%)
	Independ. I	1.000 (1,7%)
	Independ. II	1.000 (1,7%)
	Sur	2.000 (3,4%)
A. mar	La Chimba I	2.000 (3,4%)
	La Chimba II	4.000 (6,7%)
Agua de mezcla	Bonilla I	2.000 (3,4%)
	Bonilla II	2.000 (3,4%)
	Bonilla III	5.000 (8,4%)
	Ancla I	10.000 (16,8%)
	Ancla II	12.500 (20,9%)
	Amarillo I	2.406 (4%)
	Amarillo II	2.406 (4%)
	Amarillo III	1.978 (3,3%)
	Amarillo IV	1.978 (3,3%)
	Amarillo V	1.978 (3,3%)
	Total	59.696 (100%)

Tabla 21: Estanques de distribución de agua potable de la ciudad de Antofagasta
Fuente: SISS (2017)

Toconce, la construcción de 7 estanques en los años posteriores a la incorporación de la Captación Lequena, y aquellos construidos tras la implementación de la Planta Desaladora de Antofagasta, especialmente en la zona norte de la ciudad.

7.1.2.3. Plantas elevadoras de agua potable⁶²

PEAP	Capac. (L/s)
Imp. Desaladora	600 (56,1%)
Est. La Chimba	70 (6,5%)
Est. Bonilla	150 (14%)
Imp. Bonilla	100 (9,3%)
Est. Ancla	150 (14%)
Total	1.070 (100%)

Tabla 22: PEAP del sistema de distribución de la ciudad de Antofagasta
Fuente: SISS (2017)

Las PEAP que componen el sistema de distribución de agua en la ciudad de Antofagasta trabajan en su totalidad con fuentes de agua de mar, y se detallan en la Tabla 22 y en el Anexo 15. Entre ellas se destacan principalmente las asociadas a la Impulsión de la Desaladora y sus derivaciones hacia los Estanques La Chimba y Bonilla. La principal se compone de 6 bombas, posee una capacidad de 600L/s de caudal y opera con 8.314KW de potencia, mientras que las otras dos tienen una capacidad de caudal de 70L/s y 100L/s respectivamente. Finalmente, las PEAP reelevadoras hacia los Estanques Bonilla y Ancla tienen un caudal de diseño de 150L/s cada una, y mientras la primera posee 3 bombas y opera con 220KW de potencia, la segunda lo hace con 660KW por medio de 5 bombas de elevación de agua (SISS, 2017).

7.1.2.4. Sectores y redes de distribución de agua potable

La ciudad de Antofagasta está sectorizada por la empresa sanitaria según el área de distribución de cada uno de sus estanques, asignándoles el mismo nombre al sector en cuestión, y cuyas principales características se destacan en la Tabla 23 y en el Anexo 17. Aguas Antofagasta declara que posee un 100% de cobertura de agua potable en la región (SISS, 2011c), por lo que toda la ciudad se encuentra contenida en los sectores de distribución, y sus características dependerán tanto de la infraestructura como de sus fuentes de abastecimiento. A continuación, se detallan las características de la red de distribución, cantidad y calidad del suministro a nivel de la ciudad de Antofagasta y por sectores. En términos generales, a nivel urbano predominan las zonas abastecidas por aguas de mezcla, representando el 47% de la superficie de la ciudad y abasteciendo a cerca del 58% de la población. Por su parte, el suministro de aguas de cordillera cubre el 38% de la superficie urbana, abasteciendo a más de 120.000 habitantes, equivalentes al 36% de la población. Finalmente, el Sector La Chimba, único con suministro de agua desalada, representa el 15% de la superficie urbana y el 6% de la población de la ciudad de Antofagasta.

	Sector	Long. red de distr. (Km)	Q medio (L/s)	L/hab/día
Agua de Cordillera	Balmaceda	36,91 (5,6%)	27,6 (3,5%)	121,49
	Prat	59,47 (9%)	49,7 (6,4%)	137,62
	El Salto	21,82 (3,3%)	15,2 (2%)	126,13
	Centro	77,34 (11,7%)	76,8 (9,9%)	166,12
	A. Gran Vía	4,58 (0,7%)	4,9 (0,6%)	286,05
	Indepen.	18,84 (2,9%)	33,8 (4,3%)	537,71
	Sur	56,91 (8,6%)	49,2 (6,3%)	370,64
A. de mar-La Chimba		57,37 (8,7%)	76,3 (9,8%)	323,74
Agua de mezcla	Bonilla	167,06 (25,3%)	177,5 (22,8%)	135,96
	Ancla	91,89 (13,9%)	116,6 (15%)	207,85
	Amarillos	67,09 (10,2%)	150,7 (19,4%)	421,12
Total/Promedio		659,28 (100%)	778,3 (100%)	202,06

Tabla 23: Resumen del abastecimiento de agua potable por sector
Fuente: Elaboración propia en base a SISS (2011c; 2017)

⁶² En adelante: PEAP.

El recurso hídrico es distribuido en la ciudad a través de 659,28Km de tuberías, con diámetros predominantemente menores a 200mm (91,53%) y construidas principalmente de asbesto cemento (40,75%) y PVC (35,35%) (SISS, 2017). La mayor parte de la red, cerca del 50%, distribuye aguas de mezcla, destacándose el Sector Bonilla por poseer cerca de un cuarto del total de la red de distribución, mientras que las aguas de fuentes de cordillera y de mar son distribuidas por 275,87Km y 57,37Km de tuberías respectivamente, esta última fuente representada solo por el Sector La Chimba. Además de Bonilla, los otros sectores con una red de distribución de gran longitud son los Sectores Ancla, Centro y Amarillos que oscilan entre los 67Km y los 92Km. Por su parte, los sectores con menor longitud de la red corresponden a El Salto, Independencia y Alto Gran Vía, todos abastecidos por fuentes de cordillera. Al igual que en toda la ciudad, el asbesto cemento es el principal material utilizado en la construcción de las redes de distribución de los sectores de Amarillos, Ancla, Balmaceda, Centro, El Salto, Independencia y Prat, mientras que el PVC presenta predominancia en los sectores de Alto Gran Vía, Bonilla, La Chimba y Sur. Por su parte, el HDPE y el hierro fundido, que completan la red de distribución, se distribuyen principalmente en La Chimba, Ancla y Bonilla para el primero, y Ancla, Prat y Centro para el segundo.

A partir de la década de 1960 se inicia un progresivo aumento en la construcción de la red de distribución de agua potable en la ciudad, al punto que el 87% de la red de distribución de la ciudad fue construida entre 1960 y 2010, destacándose que en la década de 1990 se construyó más de un cuarto de la red actual. En este mismo periodo fue construida casi la totalidad de la red del Sector Alto Gran Vía y la mitad de la red perteneciente al Sector Bonilla, mientras que en la década del 2000 destaca el crecimiento explosivo del Sector La Chimba y su red de abastecimiento. Por lo tanto, al igual que los estanques de distribución, la ampliación de la red de distribución se puede relacionar directamente con la incorporación de nuevas fuentes de abastecimiento y el aumento del caudal disponible para la ciudad de Antofagasta.

7.2. Estimación de vulnerabilidad operativa

	Componente	Capacidad	Cont.	Calid.
Producción	Fuentes	1.669L/s	0,988	0,984
	Captaciones	5.008L/s		
	Aducciones	4.582L/s		
	PTAP	1.850L/s		
	Estanques	63.800m ³		
	PEAC	4.622L/s		
Distr.	Conducciones	53,58Km	0,986	0,976
	Estanques	59.696m ³		
	PEAP	1.070L/s		
	Caudal sumin.	778,3L/s		

Tabla 24: Resumen de la vulnerabilidad operativa del sistema de abastecimiento hídrico

Fuente: Elaboración propia en base a Aguas Antofagasta (2014a) y SISS (2011c; 2017; s/f b)

A partir del análisis de la matriz de vulnerabilidad operativa, que contempla la capacidad de cada uno de los componentes del sistema de abastecimiento, además de indicadores de continuidad y calidad del suministro hídrico, se obtuvieron los valores según las diferentes fuentes, etapas y sectores de abastecimiento hídrico. A su vez, el análisis contempla la revisión y el contraste de datos oficiales emitidos por la SISS (2015; s/f b) con la percepción obtenida a partir de la aplicación de la encuesta en la ciudad de Antofagasta respecto a la continuidad y calidad del suministro hídrico (Monsalve, 2018). La matriz de vulnerabilidad operativa, detallada en el Anexo 18, condensa en profundidad los resultados de los parámetros operativos propuestos por el CEPIS

(2000), aplicados en el sistema de abastecimiento hídrico de la ciudad de Antofagasta como parte de la evaluación de vulnerabilidad integral realizada en el presente estudio, y sus características principales se resumen en la Tabla 24 y se describen a continuación.

7.2.1. Capacidad de abastecimiento

El análisis efectuado sobre la capacidad de abastecimiento del sistema de agua potable de la ciudad de Antofagasta involucra las etapas de producción y distribución del recurso. Para la primera de ellas, respecto a las fuentes de agua cruda, las de cordillera son las únicas sobre las que la empresa sanitaria posee derechos de agua, siendo las más importantes los ríos Loa y Toconce, representando el 55,1% y 28,1% respectivamente del total de derechos de agua. Sin embargo, considerando la demanda hídrica

del proceso de desalación y el océano pacífico como fuente para la desalación, este representa una mayor extracción de aguas, sumado además que no existen derechos sobre la extracción de agua de mar. De forma similar, la suma de la capacidad de las captaciones de agua de cordillera representa sólo el 36,7% de la capacidad total de captación del sistema de abastecimiento, mientras que la bocatoma de la desaladora completa el resto de la capacidad, superando ampliamente las captaciones de cordillera en su conjunto. La capacidad de los componentes para la producción de agua potable según sus fuentes de abastecimiento se observa en la Tabla 25. Por su parte, la capacidad de conducción de agua cruda de cordillera, considerando que se realiza casi íntegramente por la NACA, representa sólo el 17,5% de la capacidad total, completando el resto con las dos impulsiones de la desaladora, que representan el 69,2% en conjunto. Cabe destacar que la longitud es un factor de vulnerabilidad, ya que implica la exposición de infraestructura que, de interrumpirse en algún punto, afectaría a toda la conducción, por lo que las fuentes de cordillera, al representar casi la totalidad de las conducciones de agua cruda, se encontrarían mucho más expuesta que las fuentes de mar, las cuales representan cerca del 0,1% de la longitud total de las conducciones.

Por su parte, las PTAP de cordillera, correspondientes a las dos PFSC, poseen una mayor capacidad en conjunto que la Planta Desaladora, representando el 54% de la capacidad de potabilización de agua del sistema de abastecimiento. A su vez, los estanques del proceso de producción son en su mayoría de regulación, todos asociados a fuentes de cordillera, y siendo los más importantes los reguladores de la NACA, mientras que los estanques de almacenamiento del agua potabilizada son también principalmente de aguas de cordillera, que en contraste con el de almacenamiento de agua desalada, representan el 39,2% y 2,8% del volumen total de almacenamiento respectivamente. Sin embargo, la superioridad en la capacidad de estos componentes para las fuentes de cordillera no se condice con el caudal suministrado a la ciudad, considerando que la Planta Desaladora opera a capacidad completa y que representa el 85% del agua potable producida por las PTAP para abastecer a la ciudad de Antofagasta. En cuanto a las PEAC, las del sistema de producción de cordillera se asocian al proceso de captación y representan el 31,4% de la capacidad de elevación, completando la capacidad restante con las dos impulsiones de agua de mar de la Planta Desaladora.

En cuanto al resto de la infraestructura de distribución, las conducciones más extensas son la impulsión de la planta desaladora, representando el 29,2% de la longitud de las conducciones de agua potable en conjunto. Del resto, el 11,6% es la Interconexión Ancla-Amarillos, la única que conduce agua de mezcla, y el restante corresponde a las conducciones de agua de cordillera, siendo

Componente	Capac. fuentes de cordillera	Capac. fuentes de mar
Fuentes	1.669L/s	-
Captaciones	1.836L/s (36,7%)	3.172L/s (63,3%)
Aducciones	1.410L/s (30,8%)	3.172L/s (69,2%)
PTAP	1.000L/s (54%)	850L/s (46%)
Estanques	62.000m ³ (97,2%)	1.800m ³ (2,8%)
PEAC	1.450L/s (31,4%)	3.172L/s (68,6%)

Tabla 25: Capacidad de producción de agua potable por fuentes de abastecimiento

Fuente: Elaboración propia en base a Aguas Antofagasta (2014a) y SISS (2017)

las con mayor longitud en la ciudad. Por su parte, de los estanques de distribución de agua potable, los con mayor capacidad son Ancla, Amarillos y Bonilla, todos abastecidos de aguas de mezcla y que en conjunto representan el 66,8% del volumen total de los estanques de la ciudad, mientras que los estanques abastecidos con aguas de cordillera representan en total el 19,1% de la capacidad total de almacenamiento. El resto del volumen de la ciudad corresponde a los dos estanques del sector La Chimba. Adicionalmente, entre las PEAP, la con mayor capacidad es la asociada a la impulsión de la desaladora, representando el 56,1% del total, mientras que el resto son reelevadoras principalmente asociadas a estanques, siendo el 34,5% de la capacidad restante.

La cantidad de agua potable suministrada a cada sector depende tanto de su infraestructura como de sus fuentes de abastecimiento, las cuales determinan el caudal absoluto por sector y lo suministrado a cada habitante diariamente. A escala de la ciudad de Antofagasta, el sistema de distribución de agua potable tiene una capacidad de abastecimiento promedio de 778,3L/s de caudal y puede llegar a un máximo diario de 912,1L/s, lo que significa un caudal medio de 202L por habitantes diariamente. Los sectores con mayor caudal de suministro son los de Bonilla, Amarillos y Ancla, que además de ser los con mayor volumen de estanques de almacenamiento, en conjunto representan el 57,2% del caudal de abastecimiento de la ciudad. Por su parte, el suministro de agua por habitante diariamente presenta sus mayores valores en los sectores de Independencia y Amarillos, coincidiendo este último con los con mayor caudal suministrado. En contraste, los sectores de Balmaceda y El Salto son los con menor suministro diario por habitante, y este último, junto con el sector Ato Gran Vía, son los que reciben el menor porcentaje del caudal suministrado, con 15,2L/s y 4,9L/s respectivamente.

Respecto a la cantidad suministrada por fuentes, es importante destacar que los sectores abastecidos únicamente con aguas de fuentes cordilleranas son los con menor caudal medio, con 257L/s de suministro, mientras que los abastecidos por fuentes mixtas son los con mayor volumen y caudal, con 42.246m³ y 326L/s respectivamente. Sin embargo, pese a los valores de las fuentes de agua de mezcla, al ser también la con mayor población abastecida, es la segunda con mayor volumen diario por habitante, aportando cerca de 200L, una cifra cercana, aunque por debajo, del volumen medio para la ciudad. A su vez, a excepción de los sectores Prat y Centro, los sectores abastecidos por aguas de cordillera son también los con menor población, por lo que el caudal diario disponible por habitante varía por sector y fuente, siendo los sectores Independencia y Amarillos, abastecidos con fuentes de cordillera y mixtas respectivamente, los con mayor cantidad de agua por habitante al día, con un promedio de 537L y 421L cada uno, muy por sobre el promedio de la ciudad. También se encuentran sobre el promedio diario de agua por habitante de la ciudad, en orden decreciente, los sectores Sur, Alto Gran Vía, Ancla y La Chimba mientras que el resto de la ciudad, que concentra el 65% de la población urbana, tiene un suministro menor al promedio de la ciudad, destacándose que las fuentes de agua de cordillera son las con menor suministro por habitante, con una capacidad media de 184,8L diarios. Cabe señalar que volumen disponible según los estanques de cada sector no se condice necesariamente con el caudal suministrado debido a las interconexiones entre estanques explicadas anteriormente. Finalmente, en cuanto al Sector La Chimba, único abastecido con agua desalada, presenta los menores valores entre todas las fuentes respecto al volumen disponible entre sus estanques y la longitud de la red de distribución. Sin embargo, es la fuente que representa un mayor volumen diario por habitante, rondando los 323L, muy superior al volumen medio por habitante de la ciudad de Antofagasta y al resto de las fuentes de abastecimiento. A partir

del análisis del caudal por cada fuente, es posible determinar el contenido de cada fuente en las aguas de mezcla, de manera que, para el caso de los sectores y estanques abastecidos con fuentes mixtas de agua potable, tras descontar a ambas fuentes anteriores lo suministrado en los sectores abastecidos sólo por una de ellas, las fuentes de cordillera podrían suministrar hasta un 61,81% del total abastecido por aguas de mezcla, mientras que las fuentes de agua de mar superan ampliamente abastecimiento de las fuentes mixtas, pudiendo cubrir fácilmente ambos suministros.

7.2.2. Continuidad del suministro

Con respecto a la continuidad del suministro de agua potable, asociado tanto a la producción como a la distribución del recurso, dependerá de cómo se aborde. Por una parte, considerando los cortes asociados al bajo nivel de agua en los estanques de distribución como resultado de fallas en el proceso de producción para el periodo 2011-2014 (SISS, 2015), el valor obtenido mediante la aplicación del indicador de continuidad de agua potable (SISS, 2011b) para el sistema de producción y distribución sería de 0,995. A su vez, el Índice de Continuidad del Servicio de Agua Potable aplicado por la SISS (s/f b) para evaluar el suministro según los eventos de cortes de agua, sus causas, duración y clientes afectados por empresa sanitaria y localidad abastecida, otorga a la empresa sanitaria un indicador promedio de continuidad de 0,988 para el periodo 2007-2015, menor al obtenido mediante el análisis de los cortes de suministro, y homologable al sistema de abastecimiento de Antofagasta, ya que este representa el mayor sistema de producción que posee la empresa Aguas Antofagasta. El mismo organismo entrega un valor promedio para el indicador de continuidad en la ciudad de Antofagasta de 0,986 para el citado periodo, siendo menor al indicador de la empresa (SISS, s/f b) y aplicable al sistema de distribución. Aguas Antofagasta se encuentra permanentemente entre las empresas con menor índice, rondando el 4to lugar a nivel nacional, aunque se destaca que en 2013 fue la segunda peor evaluada, mientras que en 2015 alcanzó su mínimo y fue además la con menor índice de continuidad⁶³.

Sectores	Continuidad				Calidad-Percep.	
	Numero de cortes	Durac. Media	Ind. Con.	Perc. Con.		
Agua de Cordillera	Balmaceda	103 (6,3%)	3:41	0,975	0,759	0,421
	Prat	229 (14%)	3:45	0,973	0,742	0,465
	El Salto	70 (4,3%)	3:07	0,985	0,762	0,619
	Centro	298 (18,2%)	3:35	0,974	0,739	0,504
	A. Gran Vía	11 (0,7%)	3:56	0,914	0,754	0,444
	Indepen.	42 (2,6%)	3:38	0,982	0,847	0,545
	Sur	79 (4,8%)	3:02	0,976	0,790	0,519
A. de Mar-La Chimba	114 (7%)	3:04	0,967	0,725	0,490	
Agua de mezcla	Bonilla	334 (20,4%)	3:46	0,978	0,729	0,492
	Ancla	228 (14%)	3:10	0,984	0,744	0,429
	Amarillos	126 (7,7%)	4:05	0,971	0,813	0,495
Totales	1.634 (100%)	3:33	0,976	0,753	0,491	

Tabla 26: Continuidad del servicio y calidad del agua potable por sector
Fuente: Elaboración propia en base a Monsalve (2018) y SISS (2011c; 2011d; 2015)

Como se detalla en la Tabla 26, en términos absolutos, en el periodo 2011-2014 se registraron 1.634 cortes de suministro en la ciudad, con una duración media de 3:33 horas y que afectaron en suma a más de 1,5 millones de clientes (SISS, 2015). De éstos, el 80% corresponde a cortes no programados, y el resto presenta valores muy similares entre los cortes programados y aquellos provocados por la acción de terceros. Adicionalmente, más de la mitad de los cortes

⁶³ Cabe destacar que en 2015 existe una ausencia de datos de las empresas generalmente peor evaluadas (SISS, s/f b), haciendo que Aguas Antofagasta descienda al último lugar de la lista de dicho año.

fueron provocados por fallas en las matrices distribuidoras de agua potable, equivalente a cerca del 40% de los clientes afectados, aunque también se destacan los cortes provocados por fallas en elementos de conducción, como arranques, conexiones, uniones y piezas especiales de abastecimiento, y los asociados la acción de terceros por trabajos de otras empresas (SISS, 2015). Cabe señalar que los cortes con mayor duración media son los producidos por trabajos de ampliación de redes y conexiones de agua potable, que a su vez corresponden a cortes programados, promediando más de 11 horas. Por su parte, los de menor duración son los asociados al uso de grifos y a la falla de válvulas, promediando poco más de 1 hora cada uno.

En cuanto a la continuidad en el suministro de agua potable por sectores, como se muestra en la Tabla 26, los con mayor cantidad de eventos de cortes de agua en el periodo 2011-2014 son los de Bonilla y Centro, representando el 20,4% y 18,2% respectivamente del total de cortes, seguidos por los sectores Prat y Ancla que poseen valores similares entre sí y representan en conjunto el 28% de los cortes en la ciudad. Todos los sectores promedian más de 3 horas de duración de los cortes de agua, algunos superándolo ampliamente, destacándose el sector Amarillos con más de 4 horas de duración media de los eventos de corte. Adicionalmente, los cortes producidos por fallas en las matrices de distribución de agua potable se concentran principalmente en el Sector Centro, mientras que las fallas en los elementos de conducción señalados anteriormente se han concentrado en el Sector Bonilla. Los cortes por ampliaciones de la red de distribución por su parte se han registrado principalmente en sectores abastecidos total o parcialmente con agua desalada, como lo son La Chimba, Bonilla y Amarillos. Finalmente, y mediante la aplicación de la misma metodología para determinar los indicadores de continuidad de agua potable según los cortes de suministro registrados (SISS, 2011b), se desprende que los sectores con mayor índice, superiores a 0,98, son El Salto, Ancla e Independencia, mientras que el resto presenta valores entre 0,97 y 0,98, con los sectores de La Chimba y Alto Gran Vía como los con menores índices de continuidad, destacándose este último con un valor de 0,914, muy inferior al resto de los sectores y de la ciudad.

Según lo anterior, para las diferentes fuentes de abastecimiento observadas en la ciudad, como lo muestra la Tabla 27, los sectores abastecidos por aguas de mezcla son los con mayor continuidad de suministro, mientras que los abastecidos por alguna de las otras dos fuentes presentan valores similares entre sí. En contraste a los indicadores obtenidos a partir de la información de la SISS (2015; s/f b), según los resultados obtenidos de la encuesta

Fuente	Capacidad (L/s)	Continuidad		Calidad
		Cortes	Encuesta	
Cordillera	257,2 (33%)	0,968	0,774	0,500
Mar	76,3 (9,8%)	0,967	0,725	0,490
Mixta	444,8 (57,2%)	0,974	0,758	0,486
Total/Media	778,3 (100%)	0,976	0,753	0,491

Tabla 27: Vulnerabilidad operativa en la distribución de agua potable según fuentes de abastecimiento
Fuente: Elaboración propia en base a Monsalve (2018) y SISS (2011c, 2011d, 2015)

(Monsalve, 2018), la evaluación que realizaron los habitantes de Antofagasta respecto a la continuidad presentan valores muy inferiores a los obtenidos de la SISS (s/f b), traducido en un indicador de 0,753 para la continuidad en la ciudad, siendo el agua desalinizada la con menor continuidad y mayor cantidad de cortes, mientras que las aguas de mezcla presentan valores similares al de la ciudad. Por su parte, los sectores abastecidos de agua de cordillera son los con mayor continuidad y menor cantidad de cortes. A nivel de los sectores de la ciudad, los valores de continuidad oscilan entre 0,725 y 0,847, siendo La Chimba el sector con menor continuidad y mayor cantidad de cortes, concentrando el 29,2% de los cortes, seguido por Bonilla con un 24,1% del total

de cortes. Por otro lado, los sectores de Independencia y Amarillos son los mejor evaluados en cuanto a continuidad del suministro, ambos con indicadores por sobre 0,8. Aunque los cortes programados superan en cantidad a los no programados, tanto en la ciudad como en cada sector de ella, ambos presentan tendencias similares en distribución y duración, predominando los cortes entre 1 y 6 horas de duración en más de la mitad de los casos. Finalmente, cabe destacar que los sectores Independencia y La Chimba se repiten como el mejor y peor evaluado respectivamente según las diferentes evaluaciones de continuidad.

7.2.3. Calidad del agua potable

En términos de calidad, basado en los indicadores de calidad del agua potable de la SISS (s/f b), tanto la empresa como la ciudad de Antofagasta se encuentran en general mal evaluadas respecto al resto de empresas y ciudades, y si bien hay años donde ha obtenido la máxima evaluación, sus valores siguen siendo bajos en una perspectiva global, promediando durante el periodo 2007-2015 un indicador para la empresa y la etapa de producción de 0,984, mientras que para la distribución de agua de la ciudad de Antofagasta el indicador de calidad desciende a un 0,976. Al comparar con la percepción de la población de la ciudad de Antofagasta, los indicadores de calidad en la distribución decaen notablemente, con una evaluación media de calidad de 0,491 para la ciudad, siendo los sectores de Balmaceda y Ancla los peor evaluados, con valores que oscilan los 0,42. Por su parte, los sectores Centro, Sur, El Salto e Independencia superan el 0,5 de índice, siendo los mejor evaluados en términos de calidad. En términos de las fuentes de abastecimiento, los sectores abastecidos de aguas de mezcla son los con peor calidad, por debajo del promedio de la ciudad, mientras que el sector abastecido con agua desalinizada presenta un indicador de calidad similar al de la ciudad. Finalmente, los sectores abastecidos por aguas de cordillera son en general los mejor evaluados.

7.3. Evolución del abastecimiento

El sistema de abastecimiento hídrico no ha tenido una evolución continua o uniforme a lo largo de la historia de la ciudad de Antofagasta, y su desarrollo se encuentra estrechamente relacionado a la demanda de agua potable en la región, y a la implementación de nuevas tecnologías en el abastecimiento, pasando así desde plantas condensadoras de agua de mar, a la conducción y posterior tratamiento de aguas provenientes de captaciones ubicadas a más de 300Km aguas arriba de la ciudad, para luego volver a la desalación como método de abastecimiento, esta vez sustentado por el desarrollo tecnológico. Este último hito marca el paso desde un escenario previo abastecido únicamente con fuentes de cordillera, a uno que complementa el suministro por medio de la desalación, hasta llegar a la actualidad, en donde constituye la principal fuente de suministro hídrico de la ciudad de Antofagasta. Adicionalmente, la proyección de la empresa sanitaria para convertir la desalación en la única fuente de abastecimiento plantea también un escenario futuro que contemple la dependencia total de plantas desaladoras de agua de mar para abastecer la necesidad de agua de la ciudad, transformando por completo la producción de agua potable regional. A continuación, se analiza la evolución del sistema de abastecimiento hídrico, tanto de la producción como de su distribución, a través de una revisión de los principales cambios que ha tenido la infraestructura y la capacidad de abastecimiento.

7.3.1. Evolución de infraestructura

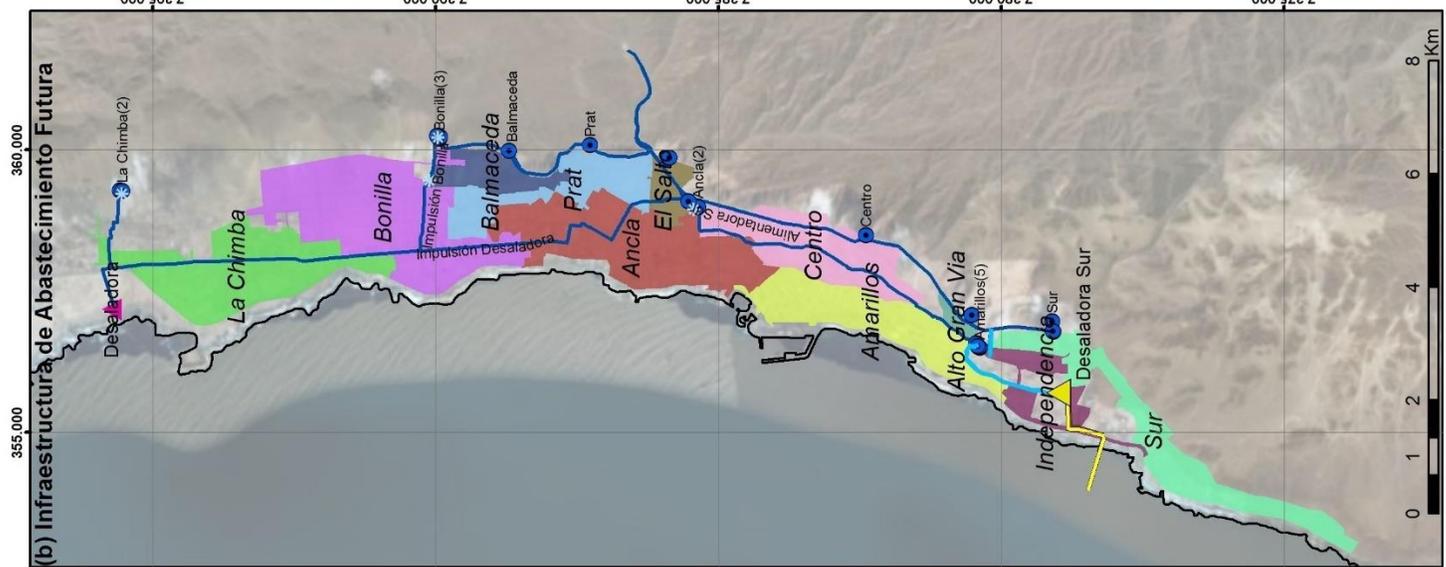
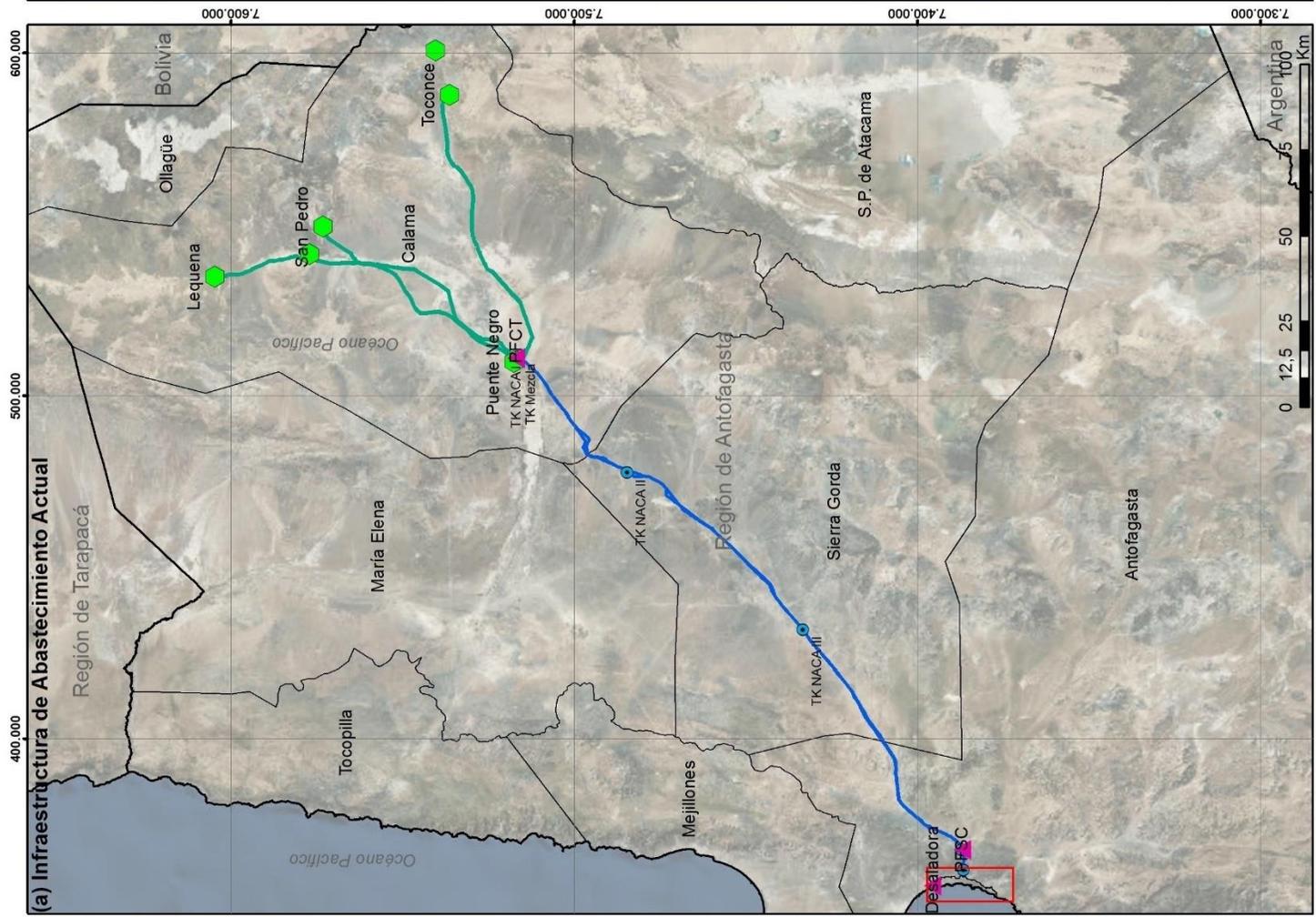
La implementación de la desalación y la consecuente infraestructura a su producción y distribución, tanto a manera de complemento del suministro de cordillera como de fuente

Escenarios	PTAP (L/s)	Lon. Red Prod.(Km)	Est. Prod. (m ³)	Est. Distr. (m ³)	Long. Red Dist. (Km)
Previo	1.000 (2)	723,16	62.000 (7)	47.696 (17)	535,91
Actual	1.850 (3)	729,91	63.800 (8)	59.696 (21)	659,28
Proyección	1.850 (2)	7,38	6.800 (2)	59.696 (21)	725,21

*Tabla 28: Evolución de la infraestructura de abastecimiento de agua potable
Fuente: Elaboración propia en base a Aguas Antofagasta (2011c) y SISS (2017)*

primaria de suministro hídrico de Antofagasta, y las principales variaciones de producción en los diferentes escenarios, se muestran en la Tabla 28 y en la Cartografía 4. Debido a que, previo a la implementación de la Planta Desaladora, el abastecimiento hídrico de la ciudad de Antofagasta se realizaba únicamente a partir de fuentes de agua de cordillera, la mayor parte de la infraestructura de producción de agua de cordillera fue construida anterior a la llegada de la desalación, efectuándose sólo algunas mejoras en las cañerías y conducciones de agua en años posteriores, además de implementarse infraestructura complementaria a la existente. Cabe mencionar que las PFSC, encargadas de la potabilización de agua destinada a abastecer Antofagasta, presentan en conjunto una capacidad de producción máxima de 1.000L/s, por lo que no presentan problemas para tratar el total del caudal de agua disponible. En cuanto a la infraestructura de distribución de agua potable, 17 estanques y 535,9Km de cañerías, equivalentes al 80% del volumen actual de los estanques y el 81,29% de la red de distribución actual, fueron construidos previos a la desaladora. Por su parte, la red de distribución, la mayor parte fue construida en asbesto cemento (49,39%) y PVC (39,44%), mientras que casi la totalidad de las cañerías de fierro fundido (99,24%) y asbesto cemento (98,53%) se encuentran operando previo a la desaladora, además de las tuberías de acero negro (96,18%) y PVC (90,70%) también presentan porcentajes relevantes.

Por su parte, la infraestructura de producción y distribución actual corresponde a la descrita previamente, y a modo de resumen, desde la construcción de la Planta Desaladora no se ha implementado nueva infraestructura destinada a la producción de agua de cordillera, solo se han realizado mejoras en las instalaciones existentes, incrementándose únicamente la capacidad de producción de agua de mar (Aguas Antofagasta, 2013a). En cuanto a la distribución, fueron incorporados 4 nuevos estanques y cerca de 124Km de cañerías, equivalentes al 20,1% del volumen total y el 18,71% de la red de distribución actual. La red de distribución implementada tras la planta desaladora se encuentra construida principalmente de HDPE (77,18%) y PVC (17,57%), siendo este último material el con mayor crecimiento respecto al escenario previo, implementándose el 80,4% del total en el periodo actual. Además, la nueva fuente de agua potable contemplaba la construcción de la Impulsión de la Desaladora y sus derivaciones, y la Interconexión Ancla-Amarillos, parte importante de la red de distribución. Por su parte, los sectores con mayor crecimiento de su red de distribución en este periodo son los abastecidos por los estanques La Chimba (39,08%) y Sur (33,22%) respectivamente, mientras que los sectores Ancla (22,9%), Bonilla (21,58%) y Amarillos (17,16%) también presentan porcentajes importantes de su red implementada posterior a la planta desaladora. Según esto, es posible determinar que en el periodo posterior a la construcción de la planta desaladora se ha implementado más infraestructura de producción, traducido en la misma planta y su aporte del 85% del suministro, y de distribución, ya que cerca del 20% de esta última ha sido construida en los últimos 13 años, muy superior a cualquier periodo similar.



Leyenda

- Captaciones
- Aducciones
- Aducc. Calama-Antofagasta
- PTAP
- Estanques
- Conducciones AP

Infra. Futura

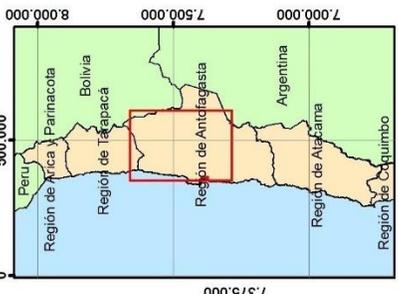
- ▲ Desaladora Sur
- ▲ Captación
- ▲ Descarga
- ▲ Conducciones AP

Sectores

- La Chimba
- Bonilla
- Balmaceda
- Prat
- El Salto
- Ancla
- Centro
- A. Gran Via
- Anarillos
- Incepe
- Sur

Proyección UTM
Datum WGS84
Huso 19S
Escala
1:120.000 (a)
1:1.800.000 (b)

fau
UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE ARQUITECTURA Y URBANISMO
Escuela de Pregrado
Departamento de Geografía



Cartografía 4: Evolución de la infraestructura de abastecimiento hídrico de la ciudad de Antofagasta
Fuente: Elaboración propia en base a Aguas Antofagasta (2011c) y SISS (2017)

En cuanto a las proyecciones de la empresa sanitaria, como ya se ha mencionado, su principal objetivo consta en abastecer a la ciudad de Antofagasta completamente con agua desalada al año 2020. Aunque actualmente no existen proyectos que contribuyan con este fin, existe el antecedente del proyecto de la Planta Desaladora Sur (Aguas Antofagasta, 2011c), aprobado por el SEA el año 2012, y a pesar de ser posteriormente desistido, sienta un precedente respecto a la visión de la empresa y la presentación de una propuesta viable desde el punto de vista técnico. La implementación de una nueva fuente de abastecimiento de agua desalada implicaría necesariamente la implementación de infraestructura asociada a su producción y distribución. Si bien el proyecto de la Planta Desaladora Sur contemplaba, además de la infraestructura asociada a la desalación, la construcción de nuevas conducciones de agua potable y red de distribución asociada, su proceso contemplaba el almacenamiento del agua tratada en los actuales Estanques Amarillos y el uso de gran parte de la infraestructura existente. Sin embargo, considerando el impacto que tuvo la Planta Desaladora de Antofagasta en la implementación de infraestructura para el abastecimiento hídrico de la ciudad, y aunque no existe un proyecto definitivo para una nueva planta, es posible pronosticar un aumento cercano al 10% en la infraestructura de distribución concentrado entre los años previos y posteriores a su construcción, ya que es un crecimiento similar al asociado a la construcción de la desaladora existente. Adicionalmente, tras la conversión en las fuentes de abastecimiento, gran parte de la infraestructura asociada a fuentes de agua de cordillera cambiaría su función, destinando el recurso a otras localidades o distribuyendo el de la nueva fuente, o simplemente quedando obsoleta. Así, a modo de ejemplo, mientras la Interconexión Ancla-Amarillos y la VACA Caracoles-Ancla podrían conducir el agua desalada hasta los Estanques Caracoles para luego ser distribuida por flujo gravitacional a través de las Alimentadoras Norte y Sur, la Aducción Cerro Moreno quedaría abandonada. Pese a esto, se plantea conservar la infraestructura de cordillera para ser utilizada en el abastecimiento de la ciudad de ser necesario.

7.3.2. Evolución de capacidad

Evolución de la producción	Pobl. Abast.	Q Medio (L/s)	L/ hab/ día	Crecimiento suministro
Escenario Previo	312.790	567,29	156,7	-
Escenario Actual	339.049	1.337,93	340,95	135,85%
Proyección	363.251	1.805,8	429,51	34,97%

Tabla 29: Evolución de la capacidad de abastecimiento de agua potable en la ciudad de Antofagasta

Fuente: Elaboración propia en base a Aguas Antofagasta (2011c; 2017) e INE (2013)

La evolución del sistema de abastecimiento hídrico y sus fuentes ha significado, en términos generales, un incremento en la capacidad de producción y el suministro de agua hacia la ciudad de Antofagasta, asociado a la implementación de infraestructura

para la desalación de agua de mar. Los principales cambios de la capacidad de producción y abastecimiento de agua potable en la ciudad de Antofagasta se detallan en la Tabla 29. Según esto, los escenarios planteados varían también en la capacidad de producción de las diferentes plantas de tratamiento que lo sustentan, por lo que la capacidad de cada escenario se encuentra definida por la capacidad total de las plantas potabilizadoras que interfieren en el suministro hacia la ciudad. Previo a la construcción de la Planta Desaladora, el sistema de producción de agua potable de la empresa sanitaria era capaz de suministrar un caudal medio de 156,7L diarios por habitante, traducido en un caudal de 567,29L/s destinado a abastecer la ciudad de Antofagasta, y equivalente al 41,76% del total producido por las captaciones de agua de cordillera, una fracción poco mayor a las proporciones actuales de distribución de aguas crudas. Por otra parte, si bien las PFSC poseen una capacidad máxima superior a las plantas de osmosis inversa consideradas, su producción

depende del caudal de agua captado en la cordillera, por lo que su producción real equivale a cerca de la mitad de su capacidad máxima. Cabe destacar que los porcentajes de agua cruda destinados a cada localidad oscilan escasamente entre el escenario previo y la actualidad, por lo que la principal diferencia entre estos radica en la implementación de la Planta Desaladora de Antofagasta y su infraestructura asociada que, en términos de suministro de agua potable, incrementó gradualmente su capacidad tras cada ejecución de sus fases y ampliaciones hasta más del doble del caudal previo.

A su vez, para un escenario futuro con su abastecimiento sostenido únicamente en fuentes de agua de mar, y considerando que el abandonado proyecto de la Planta Desaladora Sur consideraba una producción de 1.000L/s, se toma este caudal como base para sumarlo a la producción de la desaladora existente. Si bien la capacidad de producción de ambas desaladoras es levemente menor que la de las potabilizadoras actuales, cabe destacar que su suministro abastecería únicamente a las ciudades de Antofagasta y Mejillones, y dado que esta última ya se abastece únicamente con la diferencia de la desalación actual, la construcción de una nueva planta supondría que se destinara toda su producción únicamente al abastecimiento de la ciudad de Antofagasta. Adicionalmente, su incorporación significaría también un crecimiento en el suministro hídrico de la ciudad y sus habitantes, aumentando en cerca de un 35% respecto al caudal actual.

7.3.3. Evolución de vulnerabilidad operativa

Complementario al análisis de la evolución en la capacidad del abastecimiento hídrico para la ciudad de Antofagasta, en términos de calidad y continuidad del agua potable, y según los datos entregados por la SISS (s/f b), se puede establecer que ambos han tendido al descenso en el periodo 2002-2015. La continuidad ha evolucionado desde un 0,99 inicial en 2002, tendiendo al alza y descenso durante el periodo, alcanzando su máximo en 2008 y su mínimo en 2011. Por su parte, la calidad presenta una gran variación entre los diferentes años, comenzando con un 0,991 en 2002 para descender a su mínimo en 2007 con un 0,915, y si bien alcanzó el valor máximo del indicador en 2009, 2010 y 2013, en general ha tendido al descenso. En términos generales, la continuidad aumentó levemente tras la implementación de la planta desaladora, aunque comenzó un progresivo descenso pese a la implementación de las diferentes fases de la planta, para luego obtener valores más estables entre 2012 y 2015. Por su parte, la calidad alcanzó su nivel más bajo justo tras la implementación de la planta desaladora, y aunque ha tendido al alza con la implementación de las diferentes fases de la planta, sus indicadores han descendido notablemente desde el 2013 a la fecha. La evolución de los indicadores de continuidad y calidad para la ciudad de Antofagasta se observa en el Gráfico 2.

Considerando la tendencia al descenso de los indicadores de continuidad y calidad con la puesta en marcha de la Planta Desaladora en el mismo periodo, este puede atribuirse a la inclusión e incremento del agua desalada en el abastecimiento hídrico, asociándola a parámetros deficientes de continuidad y calidad. Esto se complementa con los indicadores de continuidad deficientes según los cortes registrados en la ciudad y según la percepción negativa de los habitantes de Antofagasta para el agua desalada, y si bien no es posible establecer la evolución de la percepción de los parámetros operativos, se destaca la tendencia de mala evaluación para el agua desalada en aspectos de continuidad y calidad del agua. Pese a lo anterior, la continuidad del servicio de agua potable se ha visto constantemente incrementada tras cada nueva infraestructura incorporada al sistema de abastecimiento hídrico, y considerando que el suministro continuo es reciente y que se debe en gran parte al aporte de agua por parte de la Planta Desaladora, su aporte en términos de continuidad ha sido relevante para el suministro hídrico de la ciudad de Antofagasta.

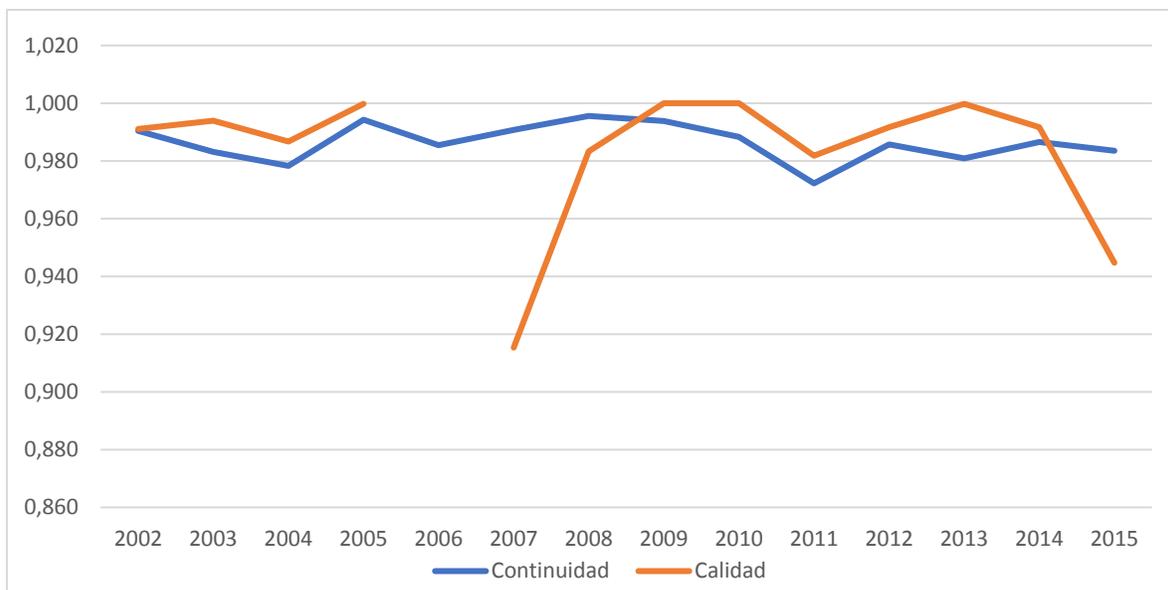


Gráfico 2: Evolución de los indicadores de Continuidad y Calidad en la ciudad de Antofagasta para el periodo 2002-2015
Fuente: Elaboración propia en base a SISS (s/f b)

De esta manera, la evolución que significó la incorporación de la desalación al abastecimiento hídrico de la ciudad de Antofagasta respecto al escenario previo con fuentes de cordillera trajo consigo un aumento en la capacidad del sistema y del caudal suministrado a la ciudad, y mejoró la continuidad respecto al abastecimiento únicamente con aguas de cordillera. Sin embargo, la nueva fuente no logra mejorar las condiciones de calidad del agua, sino todo lo contrario, significando un retroceso respecto al escenario previo. Para el escenario futuro, sumado al aumento de la capacidad producto de la planta desaladora proyectada, considerando el impacto positivo que tuvo la implementación de la Planta Desaladora para la continuidad del servicio y que las características de esta fuente hacen menos variable su caudal producido, se espera una mejora en los parámetros de continuidad a partir de la construcción de una nueva desaladora, esto pese a la evolución negativa de los parámetros de continuidad recientes (SISS, s/f b). En contraste, respecto a la calidad del agua potable, y considerando la mala calidad asociada a las fuentes de agua de mar, la evolución de este parámetro dependerá de la capacidad de la empresa sanitaria para mejorar los procesos en su planta actual y asegurar las operaciones en la nueva planta a fin de suministrar agua con una calidad óptima para su consumo en la ciudad de Antofagasta, revirtiendo la tendencia actual de mala calidad asociada a esta fuente.

8. Amenazas al abastecimiento hídrico

Las amenazas al sistema de abastecimiento hídrico consignadas en la presente investigación corresponden a aquellos factores de riesgo con potencial de afectar parcial o totalmente la capacidad de abastecer con agua potable a la ciudad de Antofagasta. A continuación, se detallan las principales características de las amenazas identificadas como posibles condicionantes para el suministro hídrico de la ciudad, clasificadas según su origen en amenazas naturales, antrópicas y tecnológicas, detallando además los valores que las caracterizan y sus áreas de impacto, permitiendo establecer una idea general de las amenazas previo a su aplicación sobre el sistema de abastecimiento hídrico. Cada una de las amenazas identificadas fue evaluada de forma diferente de acuerdo con su naturaleza, pudiendo ser espacializadas en la mayoría de los casos, aunque otras solo pudieron ser analizadas a partir de su impacto estructural esperado, por lo que los resultados obtenidos no son homogéneos entre amenazas. Cabe señalar que la clasificación de las amenazas responde a la metodología propuesta por el CEPIS (2000) que desagrega y descarta la clasificación de amenazas socionaturales entre las clasificadas como naturales y antrópicas para la presente investigación. A su vez, este resultado se limita al análisis de las amenazas con potenciales efectos negativos sobre el sistema de abastecimiento estudiado, y no al impacto de las amenazas en este sistema, cuestión que se aborda mediante la superposición de las amenazas y el sistema de abastecimiento realizada en el resultado que responde al último objetivo específico planteado.

8.1. Amenazas naturales

Las amenazas naturales corresponden a las manifestaciones propias de las dinámicas del planeta, abarcando todos los fenómenos del ambiente biofísico con capacidad de afectación adversa sobre los seres humanos, los cuales no pueden incidir en su ocurrencia (Lavell, 1996; BID, 2002). A partir de esta definición, se identificaron 7 amenazas clasificadas como de origen natural con potencial de comprometer el abastecimiento hídrico de la ciudad de Antofagasta, y que abarcan el conjunto de tipologías propuestos por Lavell (1996), con amenazas geotectónicas, geomórficas, meteorológicas e hidrológicas. Las principales características y valores que las definen a cada una de ellas se detallan a continuación.

8.1.1. Sísmica

Los terremotos corresponden a la liberación súbita de la energía producida por la tierra en forma de ondas elásticas que agitan la superficie, originando daños en ella o en las construcciones humanas (SERNAGEOMIN, 2014), definidos según su fuente, recurrencia, magnitud y aceleraciones esperadas (CEPIS, 2000). Dentro del área de estudio, se identifican dos fuentes de posibles sismos. Por una parte, dada la ubicación de Chile en el borde de la Placa Sudamericana, es que el territorio concentra una alta actividad tectónica que genera sismos interplaca, siendo uno de los países más sísmicos del mundo. La ciudad de Antofagasta se encuentra dentro de la zona con mayor actividad sísmica del país, comprendida entre los 18°S y 23,5°S (Madariaga, 1998). Los mayores sismos que afectaron a Antofagasta fueron registrados en la misma ciudad en 1995, con una magnitud de 8,0M_L, y en Tocopilla en 2007, de magnitud 7,5M_L, ninguno de los cuales generó grandes consecuencias para la ciudad (Comte y Mora, 2009). En base a lo anterior, y en el marco del proyecto RADIUS, se estimó para la ciudad de Antofagasta un terremoto probable de magnitud 8,2M_s, a una distancia hipocentral de 150Km, con un periodo de recurrencia de 112 años y una probabilidad de excedencia/ocurrencia del 98% (Tapia et al., 2000).

Clase	Región		Ciudad
	Unidades	Área (Km ²)	Área (Km ²)
A	4	2.509,42 (2%)	-
B	32	43.482,08 (34,5%)	147,16 (50%)
C	32	54.840,59 (43,6%)	41,66 (14,2%)
D	8	6.419,85 (5,1%)	73,76 (25,1%)
E	6	18.651,38 (14,8%)	31,63 (10,8%)
Totales	82	125.903,33 (100%)	294,21 (100%)

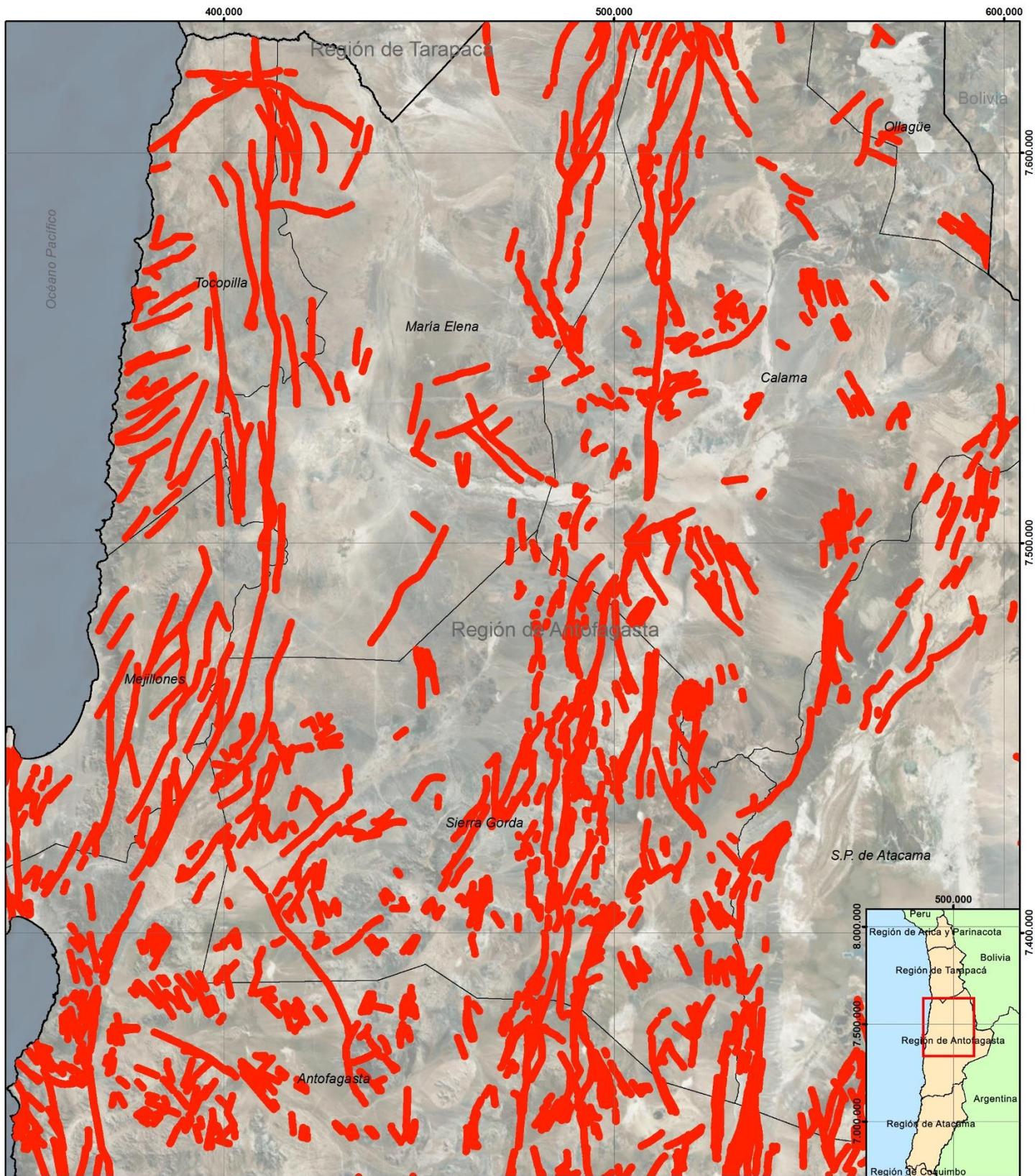
Tabla 30: Unidades geológicas según clases de suelos NEHRP identificados en el área de estudio

Fuente: Elaboración propia en base a NEHRP (2009) y SERNAGEOMIN (2003; 2014)

A partir de la reclasificación de las unidades geológicas presentadas por el SERNAGEOMIN (2003) según los criterios de clasificación de suelos propuestos por el NHERP (2009), y la intensidad propuesta por SERNAGEOMIN (2014), fue realizada la zonificación para determinar el nivel de amplificación sísmica e intensidad esperada que presentan las distintas unidades a nivel de la Región de Antofagasta, clasificándolas en las 5 categorías propuestas. A escala regional, como se muestra en la Tabla 30 y en

la Cartografía 5, priman los suelos de Clase C, correspondientes a suelos muy densos o roca blanda, que cubren un 43,6% de la superficie de la región y se distribuyen en gran parte de esta, concentrándose en la parte central de las cordilleras prealtiplánica y altiplánica, en la pampa del tamarugal y en las planicies desérticas. Por su parte, los suelos Clase A y B en conjunto, correspondientes a suelos de roca dura, ocupan cerca del 36% de la superficie regional y se concentran principalmente en la cordillera de la costa y en el sector precordillerano. Finalmente, los suelos de Clases D y E, correspondientes a suelos de tipo rígido y blando, cubren el 5,1% y 14,8% de la superficie regional respectivamente, y se distribuyen principalmente en las depresiones de atacama y del Río Loa, y en el norte de la precordillera de Domeyko, con parches distribuidos especialmente en la precordillera y en los llanos del desierto de atacama. Por su parte, la ciudad de Antofagasta se emplaza casi completamente en suelos Clase D, con presencia además de suelos Clase E en el extremo norte y en el sector sur asociados a depósitos eólicos antiguos, depósitos antrópicos y abanicos aluviales ricos en arena (SERNAGEOMIN, 2014).

Adicionalmente, en el área de estudio se reconocen fallas geológicas capaces de generar terremotos superficiales de magnitudes menores a 7Ms y epicentros a profundidades menores a 15Km, asociados principalmente al Sistema de Fallas de Atacama, extendida entre las ciudades de Iquique y La Serena, que puede generar sismos intraplaca que afecten el sistema de abastecimiento de aguas. González (2011) determinó para este sistema de fallas un desplazamiento vertical entre 0,25mm y 0,45mm al año, por lo que se clasifica como una falla lenta con un periodo de recurrencia de 3.000 años. El último sismo registrado en la Falla de Atacama ocurrió entre 2.240 y 2.760 años atrás, por lo que un futuro sismo podría producirse entre 240 y 760 años más, con una intensidad inferida de entre 6,7° y 7° en la escala de Richter a profundidades de 15Km (González, 2011). El mismo autor plantea que su reactivación parece ser condicionada por terremotos de subducción. Cabe destacar que la dirección de ruptura es gobernada por la ley de fricción, por lo que es totalmente aleatoria y condicionada por efectos locales, por lo que no existen estudios detallados que permitan zonificar como seguro o inseguro un cierto perímetro alrededor de una falla. Pese a lo anterior, se sugiere como zona de restricción por fallas geológicas el perímetro a 1Km de la falla, donde se debe evitar la construcción de infraestructura crítica frente a desastres (Muñoz & Rauld, 2010), resultando en un área de 27.746Km² con restricción sugerida por amenaza sísmica de fallas observada en la Cartografía 6, que representa alrededor del 22% de la superficie regional.



<p>Leyenda</p> <p> Restricción por fallas</p>	<p>0 10 20 40 60 Km</p> <p>N</p> <p>Proyección UTM Datum WGS84 Huso 19S Escala 1:1.250.000</p>	 <p>fau</p> <p>UNIVERSIDAD DE CHILE FACULTAD DE ARQUITECTURA Y URBANISMO Escuela de Pregrado Departamento de Geografía</p>
---	--	--

Cartografía 6: Zona de restricción por sismos de falla
Fuente: Elaboración propia en base a SERNAGEOMIN (2003) y Muñoz & Rauld (2010)

8.1.2. Tsunami

Los tsunamis corresponden a una serie de ondas de marea que se generan en el mar y que pueden desplazarse a grandes distancias y velocidades, definidos por variables según su fuente, recurrencia, grado, altura de la ola y cota máxima de inundación (SERNAGEOMIN, 2007). En la ciudad de Antofagasta se han registrado 22 eventos de tsunamis entre 1871 y 2009, con una altura máxima de 6m en 1877, siendo todos generados por terremotos interplaca. Con estos antecedentes, el SERNAGEOMIN (2014), en base a la Carta de Inundación por Tsunami para la ciudad de Antofagasta elaborada por el SHOA (1997), propone como cota máxima de inundación los 9msnm, considerando además el sismo propuesto por RADIUS de 8,5 RICHTER producido a 35Km de profundidad y con un periodo de recurrencia de 128 años para una probabilidad de excedencia del 50%. Sin embargo, y considerando la ocurrencia de tsunamis extremos de mayor periodo de recurrencia, se sugiere además la cota 30msnm como área de seguridad para la evacuación y para la ubicación de infraestructura crítica de la ciudad (SERNAGEOMIN, 2014). Estas cotas y sus respectivas áreas de inundación por tsunamis se muestran en la Cartografía 5.

8.1.3. Remociones en masa

Una remoción en masa es el proceso geológico por el cual un determinado volumen de roca, suelo o ambos, se moviliza lenta o rápidamente por acción de la gravedad (SERNAGEOMIN, 2007), cuyo nivel de amenaza se mide según su tipo, material, velocidad, contenido de agua y mecanismo de rotura. Esta amenaza se compone tanto de causas internas o factores condicionantes, como la estructura geológica, litología, relieve y condiciones climáticas, además de causas externas o factores desencadenantes, como procesos geológicos, climáticos y la acción humana que puede generar un proceso de remoción en masa (SERNAGEOMIN, 2007). En la ciudad de Antofagasta existe registro de eventos de remociones en masa, siendo los más frecuentes los flujos de detritos o “aluviones” (SERNAGEOMIN, 2014) con 5 eventos en los últimos 80 años⁶⁴ (Vargas, 1996). Sin embargo, igualmente se registran remociones en masa de tipo de caída de rocas y, en menor medida, deslizamientos. La caída de rocas en la ciudad de Antofagasta ocurre principalmente en la zona del escarpe costero, generado principalmente por la fractura y meteorización de la roca, además de sus elevaciones cercanas a los 700msnm y pendientes de entre 25° y 45°, acentuándose en el acantilado costero de la zona norte de la ciudad, cerca de “La Portada de Antofagasta”, debido a la fuerte presencia de visitantes, especialmente en temporada estival, aumentando el riesgo de caída de rocas (SERNAGEOMIN, 2014).

En cuanto al flujo de detritos, debido a la pendiente producida por el fuerte desnivel topográfico entre el escarpe costero y la franja costera, además del aumento de pendiente en las quebradas y la alta disponibilidad de material transportable, incrementan la probabilidad de ocurrencia de este tipo de amenazas frente a un evento de precipitaciones esporádicas, cuya intensidad dependerá de la manera en que se presenten las variables en el lugar (SERNAGEOMIN, 2014). En este sentido, en las Quebradas de Farellones y El Toro, ubicadas en el centro de la ciudad, al tener mayor pendiente y una presencia predominante de detritos más gruesos de origen volcánico, tiene un mayor poder destructivo (Vargas et al., 2000), mientras que en la Quebrada El Huáscar, en la zona sur de la ciudad, presenta principalmente detritos de tamaño medio a fino de origen de arenas eólicas y, por lo tanto, con un menor poder destructivo (SERNAGEOMIN, 2014). El último evento de flujo de detritos en la ciudad de Antofagasta tuvo lugar el 18 de junio de 1991, con un gran poder destructivo que provocó

⁶⁴ Los eventos ocurrieron en agosto de 1930, julio de 1940, mayo de 1982, julio de 1987 y junio de 1991.

la muerte de 91 personas, 70.000 damnificados y 6.000 casas destruidas, con una pérdida total estimada en US\$80.000.000 (SERNAGEOMIN, 2015). En este caso, se destaca que los sectores más afectados durante este evento fueron aquellos localizados pendiente abajo de la desembocadura de las quebradas con cuencas de mayor tamaño, en este caso, las Quebradas de Salar del Carmen, La Cadena y La Negra, y en quebradas menores que desembocan en el centro de la ciudad (SERNAGEOMIN, 2014). Posteriormente, en 1999, el MOP comenzó la construcción de obras de mitigación en las principales quebradas de la ciudad, por lo que el SERNAGEOMIN (2014) las considera como áreas de nivel medio o bajo de peligros según del tipo de obra construida.

A nivel regional, según se muestra en la Tabla 31 y en la Cartografía 7, las características geológicas determinan que el 53,4% de la superficie regional posee un nivel nulo de susceptibilidad, seguido por el 24,8% de grado muy alto de susceptibilidad asociado a la geología, mientras que las características topográficas establecen que el 45,6% de la superficie posee un grado nulo de

Ind Susc	Grado Susc.	Región		Antofagasta
		Unidades	Área (Km ²)	Área (Km ²)
0	Nulo	22	52.000,16 (41,3%)	48,89 (18,6%)
1	Bajo	47	25.939,7 (20,6%)	
2	Moderado	46	16.180,1 (12,9%)	179,23 (68,3%)
3	Alto	32	31.649,17 (25,1%)	34,46 (13,1%)
4	Muy Alto	8	134,21 (0,1%)	
Totales		155	125.903,33 (100%)	262,58 (100%)

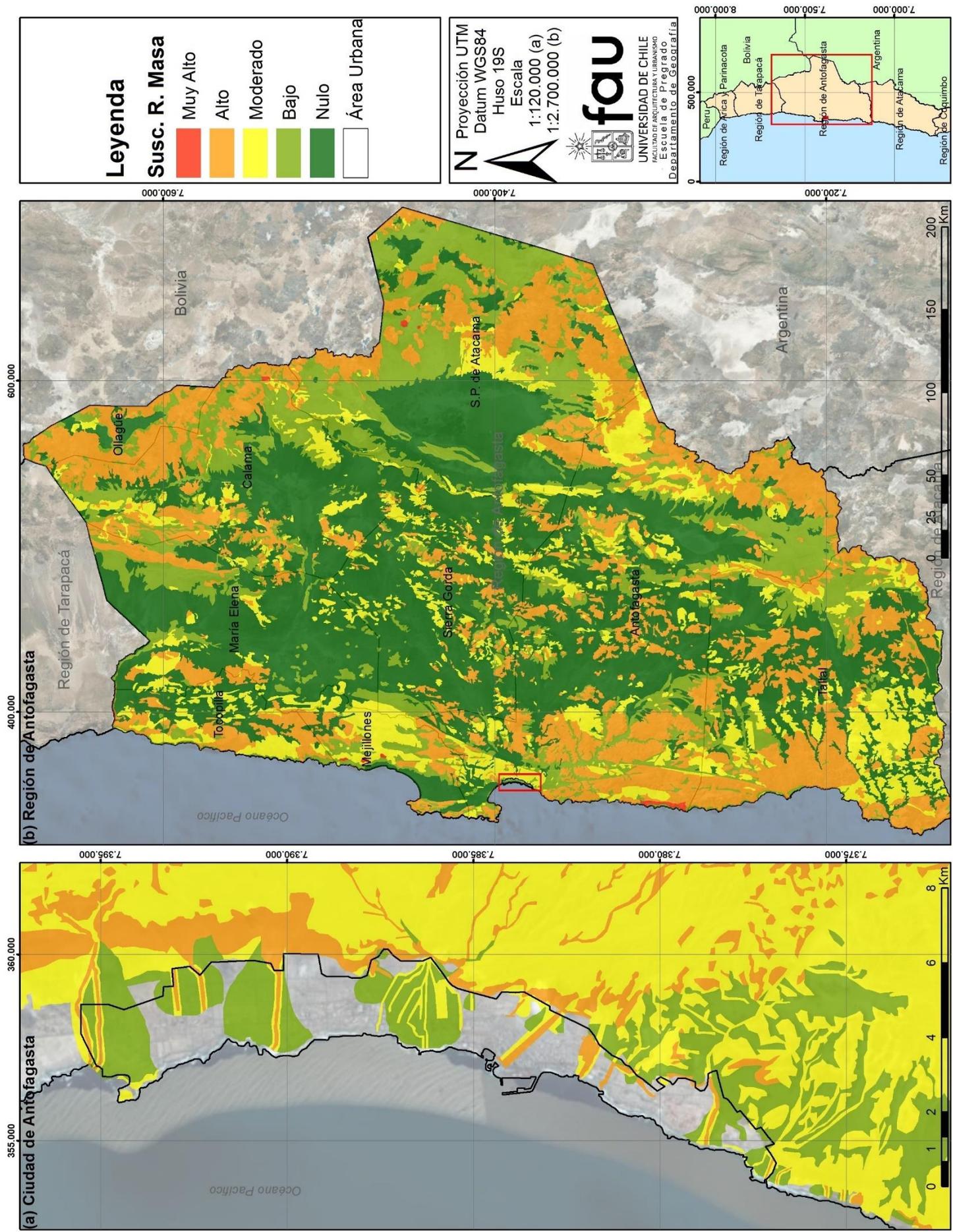
Tabla 31: Unidades geológicas según susceptibilidad a remociones en masa identificadas en el área de estudio

Fuente: Elaboración propia en base a Lara (2007), SERNAGEOMIN (2003; 2014) y SRTM (2000)

susceptibilidad al presentar pendientes promedio menores a los 5°, mientras que el resto de la región presenta grados de susceptibilidad bajo y moderado, con un 28,4% y 25,9% respectivamente. Según lo anterior, el grados de susceptibilidad de remociones en masa predominante en la región es el nulo, abarcando más del 40% de la superficie regional y distribuido principalmente en los sectores de la Pampa del Tamarugal, los llanos y depresión de atacama y la depresión del Río Loa, seguido por zonas con grado alto de susceptibilidad, que abarca cerca del 25% y se encuentran principalmente en los sectores precordilleranos, cordilleranos y el farellón costero, además de parte importante de la cordillera de la costa. La superficie restante se encuentra dominada por zonas de grado bajo y moderado de susceptibilidad, con un 20,6% y 12,9% y con presencia principalmente en la precordillera y la cordillera de la costa respectivamente. Cabe destacar que los eventos de remociones en masa se relacionan a otras amenazas naturales, ya que mientras la influencia sísmica aumenta la ocurrencia de caída de rocas (SERNAGEOMIN, 2014), evidenciado en el terremoto de abril de 2014 (SERNAGEOMIN, 2015), los flujos de detritos han coincidido con precipitaciones anuales muy por sobre la media, por lo que se relacionan con el invierno altiplánico y con años excepcionalmente lluviosos por el fenómeno del niño (Garreaud & Rutllan, 1996; Vargas, 1996).

8.1.4. Volcánica

La amenaza volcánica en el área de estudio se encuentra condicionada por procesos de erupciones volcánicas que generan la expulsión de diferentes materiales a su alrededor (SERNAGEOMIN, 2007). La zonificación de riesgo volcánico realizada por la ONEMI (2012) considera el nivel de amenaza de los volcanes activos y diferentes factores físicos para determinar las áreas de flujo de lavas, lahares y piroclastos, y las zonas de dispersión y de caída de material piroclástico. Los eventos de erupciones volcánicas se relacionan principalmente con el Volcán Lascar, ubicado en San Pedro de Atacama, el cual ha presentado cerca de 30 erupciones explosivas desde el siglo XIX, siendo el volcán más activo



Cartografía 7: Distribución de la amenaza de remociones en masa en el área de estudio
 Fuente: Elaboración propia en base a Lara (2007), SERNAGEOMIN (2003; 2014) y SRTM (2000)

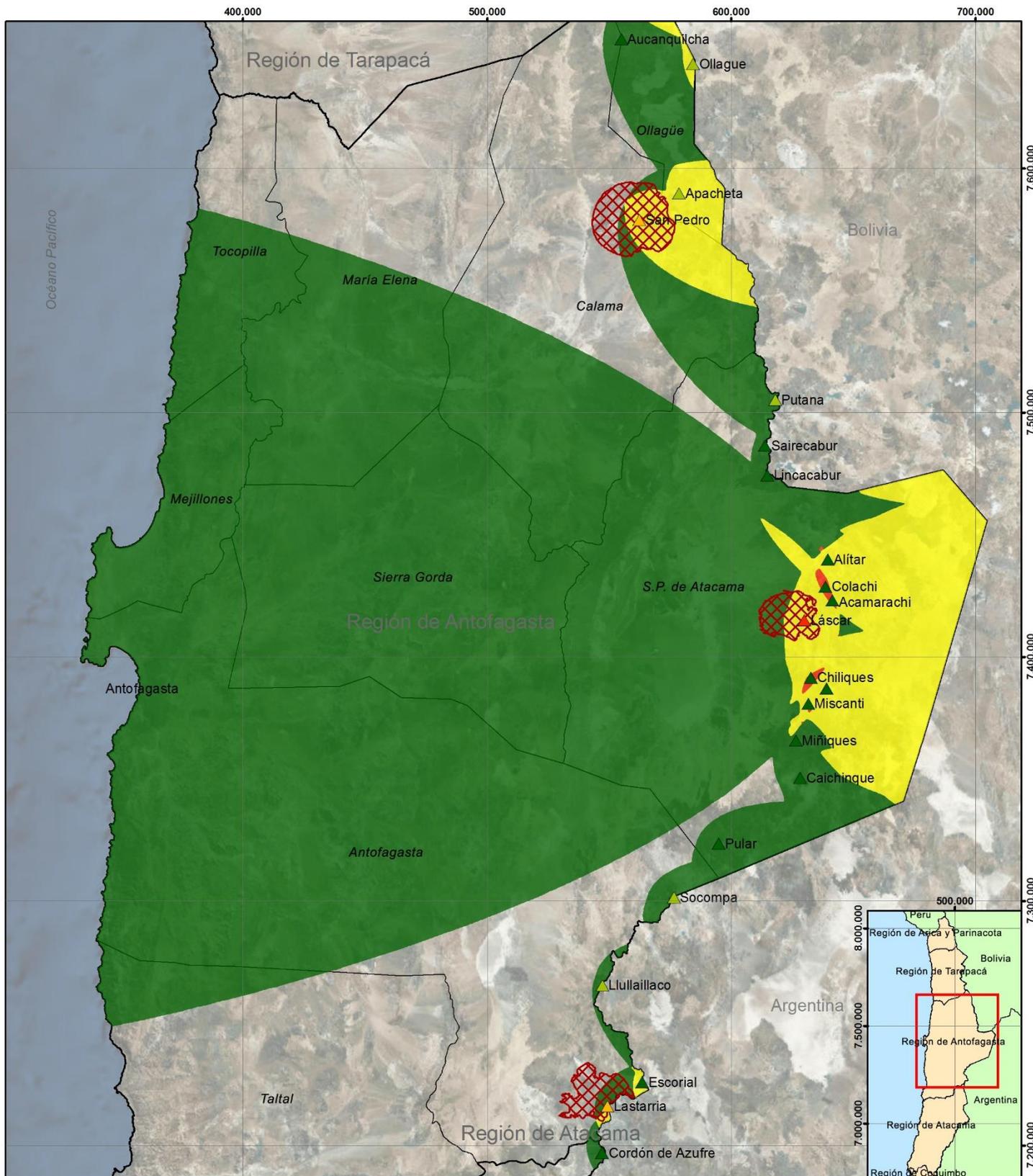
del norte del país y provocando la mayor erupción reciente ocurrida en dicha zona en 1993. Entre el 2005 y 2007 ocurrieron una serie de explosiones menores en el volcán, siendo la última actividad eruptiva registrada en el (ONEMI, 2012). La importancia de la amenaza volcánica para el sistema de abastecimiento de agua de cordillera radica en la destrucción de infraestructura y contaminación de las fuentes producto de eventos volcánicos. La distribución de la amenaza volcánica en el área de estudio se muestra en la Cartografía 8. De los 23 volcanes activos que se encuentran en la región, 14 de ellos representan un nivel muy bajo y 5 poseen un nivel bajo de amenaza. Los 3 volcanes con nivel moderado de amenaza son el Irruputunco en la comuna de Ollagüe, el San Pedro en la comuna de Calama y Lastarria de la comuna de Antofagasta, mientras que el Volcán Lascar es el único que representa un nivel de amenaza muy alto. A su vez, las zonas de flujo de lavas, lahares y piroclastos se asocian a los 3 volcanes de amenaza moderada y al Volcán Lascar, con el Volcán San Pedro como el de mayor área de flujos con cerca de 780Km², mientras el resto no superan los 400Km² cada uno.

En cuanto a la amenaza por dispersión y caída de material piroclástico, los sectores cercanos a los volcanes Colachi, Acamarachi y Chilikues concentran el nivel alto de esta amenaza, sumando cerca de 90Km² de superficie, mientras que la zona aledaña a la cordillera volcánica activa en San Pedro de Atacama y al Volcán San Pedro presentan un nivel medio de amenaza, con una superficie total de 9.149Km². Por su parte, más de la mitad de la superficie regional está en la zona de baja amenaza de dispersión y caída de piroclastos, extendida por más de 74.000Km², y asociada principalmente a la dispersión de cenizas, considerando el Volcán Lascar y el complejo volcánico aledaño como los con mayor impacto en la emisión de material piroclástico. Sin embargo, dada la dirección de los vientos en esta zona del planeta, la dispersión de cenizas tiende a dirigirse hacia el noreste.

8.1.5. Invierno Altiplánico

El invierno altiplánico, también denominado “Invierno Boliviano”, es un fenómeno climático que ocurre en Los Andes Centrales, a una altura media de 3700msnm, que genera una concentración de la precipitación anual en la estación de verano del hemisferio sur, específicamente entre los meses de diciembre y marzo. Se produce debido a las características topográficas y climáticas de la zona asociadas a una baja presión atmosférica, baja densidad de aire, baja humedad y baja temperatura, lo que, sumado a la advección de vapor de agua desde la cuenca amazónica producida en verano, dan lugar a eventos de precipitación asociados principalmente a tormentas locales de tipo convectivas y producidos durante la tarde debido al aumento de la temperatura superficial del Altiplano (Aceituno, 1998). Las precipitaciones registradas por este evento se extienden hasta la Región de Antofagasta, generalmente provocando daños asociados a inundaciones y aluviones. El último gran evento que afectó a la zona norte del país se registró durante el verano de 2016 y generó interrupción en rutas, caída de rocas, socavones por remociones en masa y alteración del agua potable, especialmente en el sector cordillerano (La Tercera, 27-02-2016), por lo que las precipitaciones asociadas a este fenómeno no son una amenaza en sí misma, ya que su impacto radica en ser un factor gatillante, al igual que los sismos, de procesos de remoción en masa.

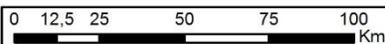
A partir del análisis de las isoyetas de precipitación anual de la DGA (1991) para la Región de Antofagasta, se define que en el borde costero rondan los 2mm de precipitación al año, aumentando hacia el interior y concentrando las precipitaciones en la zona cordillerana de las comunas de Antofagasta, Calama, San Pedro de Atacama y Ollagüe. Las isoyetas de precipitación máxima diaria se observan en la Cartografía 9. De esta manera, según la clasificación ombroclimática citada en Monjo (2010), en la mayor parte del territorio regional predomina un ombroclima hiperárido, con



Legenda

Volcanes por Amenaza **Disp. y caída de mat. piroclástico**

- | | |
|------------|---|
| ▲ Muy Alta | ■ Alto Peligro |
| ▲ Moderada | ■ Medio Peligro |
| ▲ Baja | ■ Bajo Peligro |
| ▲ Muy Baja | ■ Flujo de lavas, lahares y piroclastos |



Proyección UTM
Datum WGS84
Huso 19S
Escala
1:2.000.000



fau

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE ARQUITECTURA Y URBANISMO
Escuela de Pregrado
Departamento de Geografía

Cartografía 8: Distribución de la amenaza volcánica en la Región de Antofagasta
Fuente: Elaboración propia en base a ONEMI (2012)

precipitaciones anuales menores a 100mm, mientras que desde aproximadamente los 3.000msnm se caracteriza como árido, con precipitaciones de hasta 300mm anuales. Una situación similar se evidencia en las isoyetas de precipitaciones máximas diarias (Torres, 2016), aunque con una distribución más detallada. En las comunas de Tocopilla, Mejillones y María Elena se identifican las isoyetas de hasta 4mm de precipitación máxima diaria, mientras que la ciudad de Antofagasta oscila entre los 8mm y 10mm como máximos diarios. Las precipitaciones se acentúan hacia el interior y también hacia el sur de la región, situación que se evidencia claramente en la comuna de Calama, que oscila desde los 4mm de precipitación máxima diaria en su parte occidental hasta los 42mm en su parte más alta, concentrando parte de las isoyetas máximas definidas para la región junto con la comuna de San Pedro de Atacama. Sin embargo, se observa una disminución de las precipitaciones máximas diarias a partir del límite sur de la comuna de Ollagüe hacia el norte. De esta manera, según la distribución de las precipitaciones, es posible inferir que los alcances del Invierno Altiplánico se traducen en una concentración de las precipitaciones que va desde la zona prealtiplánica hasta el límite oriental de la región. Adicionalmente, tal como se ha señalado anteriormente, la amenaza de las precipitaciones estivales del Invierno Altiplánico radica en su relación con la ocurrencia de fenómenos de remociones en masa, ya que constituye un factor gatillante para dichos procesos, especialmente para los flujos de detritos. En este sentido, cabe destacar que las precipitaciones de concentran principalmente en parte de las zonas con grado alto y muy alto de susceptibilidad a remociones en masa situadas en la zona oriental de las comunas de Calama y San Pedro de Atacama, propiciando la ocurrencia de eventos de este tipo desde la parte prealtiplánica de la región.

8.1.6. Cambio climático

Escenarios	T° (°C)	Balance hídrico (L/s)				
		Pp	Escorrentía	ETP		
Actual	13,2°	23.527	3.164	20.710		
Loa Alto	2011-2030	B2	14,3°	23.526,98	2.239,49 (-29,2%)	21.640,4 (4,5%)
		A1B	14,4°	23.526,99	2.149,08 (-32,1%)	21.730,81 (4,9%)
		A2	14,4°	23.526,97		21.730,79 (4,9%)
Loa Alto	2031-2050	B2	14,8°		1.777,52 (-43,8%)	22.102,35 (6,7%)
		A1B	15,1°	23.526,97	1.487,74 (-53%)	22.392,13 (8,1%)
		A2	15,2°		1.388,9 (-56,1%)	22.490,97 (8,6%)
Actual	13,2°	32.584	2.760	29.985		
Loa Intermedio	2011-2030	B2	14,3°	32.583,98	1.472,41 (-46,7%)	31.274,49 (4,3%)
		A1B	14,4°	32.583,99	1.347,2 (-51,2%)	31.399,71 (4,7%)
		A2	14,4°	32.583,97		31.399,69 (4,7%)
Loa Intermedio	2031-2050	B2	14,8°		832,6 (-69,8%)	31.914,29 (6,4%)
		A1B	15,1°	32.583,97	431,27 (-84,4%)	32.315,62 (7,8%)
		A2	15,2°		294,38 (-89,3%)	32.452,51 (8,2%)

Tabla 32 Variación del balance hídrico por subcuenca y escenario

Fuente: Elaboración propia en base a DGA (2014) y Rojas (2012)

a estos (Percy & Oyoo, 2016) y que para el abastecimiento hídrico se traducen en una variación de las condiciones hidroclimáticas con un consecuente impacto en la disponibilidad hídrica. Así, tras la aplicación del modelo climático regional y los escenarios propuestos al balance hídrico de las subcuencas del Río Loa Alto e Intermedio, se obtuvieron las variaciones esperadas en la escorrentía y evapotranspiración según el aumento de las temperaturas en la zona, resumidas en la Tabla 32.

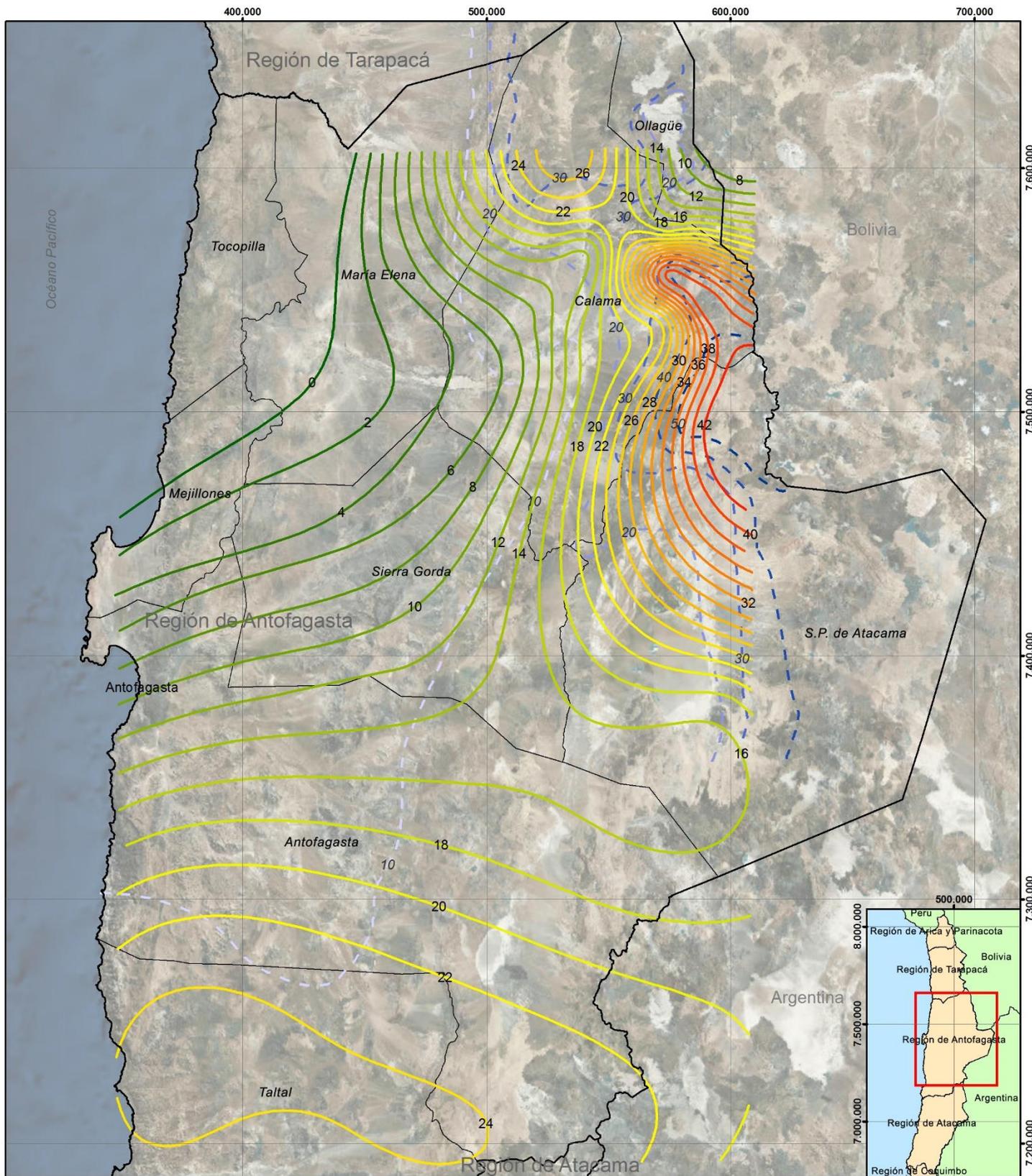
El cambio climático se define como cualquier variación en el clima a través del tiempo, ya sea debido a su variabilidad natural o como resultado de la actividad humana, referido generalmente al aumento observado y previsto de la temperatura global y sus impactos asociados (Percy & Oyoo, 2016), por lo que su vulnerabilidad está determinada por el grado de susceptibilidad

Se evidencia un progresivo incremento del porcentaje de caudal evapotranspirado y una consecuente reducción del caudal de escorrentías, con una diferencia porcentual entre un 4% y un 7,6% para ambos elementos, siendo mayores en la subcuenca intermedia y aumentando entre escenarios y entre periodos. De esta manera, y tras aplicar la reducción porcentual esperada para la precipitación en los diferentes escenarios, se obtuvieron los valores de caudal de escorrentía y de evapotranspiración. Para la subcuenca del Río Loa Alto se esperan reducciones del caudal de escorrentía cercanos al 30% para el primer periodo, y oscilando entre un 43,8% y un 56,1% para el segundo periodo, mientras que para la subcuenca del Río Loa Intermedio la reducción de este caudal ronda el 50% para el primer periodo, y entre un 70% y 90% para el segundo periodo entre los distintos escenarios. Por su parte, el incremento en el caudal evapotranspirado presenta valores similares en ambas subcuencas, siendo levemente superior en la subcuenca del Río Loa Alto, y con valores oscilan entre un 4% y un 5% para el primer periodo, y entre un 6,4% y un 8,6% de aumento de dicho caudal esperado para el segundo periodo. De esta manera, la reducción en el caudal de escorrentía condiciona directamente la disponibilidad hídrica en las diferentes fuentes de agua de cordillera, siendo mayor su impacto en la subcuenca del Río Loa Alto debido al emplazamiento de la mayor parte de la infraestructura de captación en ella.

8.1.7. Presencia natural de contaminantes

Las fuentes de abastecimiento hídrico de la ciudad de Antofagasta presentan diferentes condiciones de concentración de elementos que resultan nocivos para la salud humana asociadas a sus características particulares, y que han impactado también de forma diferenciada en cada una de ellas. Por una parte, la marea roja es considerada como una amenaza al abastecimiento hídrico debido a la toxicidad asociada a la alta concentración de microorganismos planctónicos en el mar. En marzo del año 2011, producto de un aumento explosivo de microalgas o “Bloom algal” en las costas de Antofagasta, se generó una emergencia sanitaria por contaminación del agua potable suministrada al sistema urbano debido al excesivo ingreso de algas al proceso de desalinización, que implicó cortes de agua durante cerca de 4 días que afectaron a más de 30.000 personas (Nogales, 07-01-2013). Si bien en un principio la contaminación comenzó en la zona norte de la ciudad, completamente abastecida de agua desalinizada, pronto se expandió a gran parte de la ciudad debido a su alto aporte al sistema hídrico urbano. Mientras Diersing (2009) señala que un factor del aumento explosivo de algas sería el aumento de la temperatura del agua asociado al fenómeno del niño, Ovalle (04-03-2011) plantea en una entrevista que otro factor responsable del Bloom algal sería la misma planta desalinizadora debido a un aumento en la concentración de nutrientes en el mar derivado de la disposición de los residuos del proceso de desalinización. Este evento, además del impacto y la emergencia sanitaria que significó para la ciudad, sirve como referencia debido a que el bloom algal estaba contemplado por la empresa, ni en la planificación y construcción de la planta desalinizadora, ni en las medidas de emergencia para afrontar el evento, lo cual se reflejó en la extensión del impacto de la amenaza, tanto en temporalidad como en sus alcances en la ciudad. Actualmente la empresa sanitaria asegura que, debido a que la presencia de marea roja en las costas de Antofagasta corresponde a un fenómeno común, la Planta Desaladora se encuentra adaptada para operar sin problemas frente a esta amenaza, contando con los planes de contingencia necesarios para asegurar la continuidad del suministro (Cerdeira, 2012).

Por otra parte, como se señaló anteriormente, en las aguas de cordillera utilizadas para el abastecimiento hídrico de la ciudad de Antofagasta, se registran altos niveles en las concentraciones



Leyenda
Isoyetas Pp Máx Diaria

- Torres (2016)
- - - DGA (1991)

0 12,5 25 50 75 100 Km



Proyección UTM
 Datum WGS84
 Huso 19S
 Escala
 1:2.000.000



fau

UNIVERSIDAD DE CHILE
 FACULTAD DE ARQUITECTURA Y URBANISMO
 Escuela de Pregrado
 Departamento de Geografía

Cartografía 9: Isoyetas de Pp máxima diaria en el área de estudio
 Fuente: Elaboración propia en base a DGA (1991) y Torres (2016)

de metales pesados que se presentan de manera natural debido a las condiciones hidrogeológicas de sus fuentes. Sin embargo, la empresa sanitaria declara que su infraestructura destinada a la potabilización del agua de cordillera posee la capacidad de abatir la concentración de estos elementos, ajustando su producción según la normativa de calidad del agua potable vigente, por lo que los niveles de contaminantes naturales presentes en las aguas de esta fuente no representarían una amenaza para el abastecimiento de Antofagasta (Maino & Recabarren, 2011). Por otra parte, como parte de los efectos asociados a la ocurrencia del Invierno Altiplánico se encuentra el incremento en la turbiedad de las fuentes de captación, impactando en la capacidad de abastecimiento al imposibilitar su correcto tratamiento para su uso en el abastecimiento hídrico, aunque estos efectos se analizaron en la evaluación del impacto del factor de riesgo que constituyen estos eventos. De esta forma, pese a lo anterior, la concentración natural de elementos contaminantes del recurso hídrico no representa una amenaza significativa para el sistema de abastecimiento hídrico, aunque puede impactar en la calidad del agua suministrada para el consumo de la población de la ciudad de Antofagasta, y comprometer su capacidad debido al Invierno Altiplánico y su consecuente incremento en la turbiedad del agua captada.

8.2. Amenazas antrópicas

Las amenazas antrópicas, que corresponden a los eventos generados por la acción humana y que producen desastres asociados a la vulnerabilidad de su receptor (Lavell, 1996), son las con menor presencia en el área de estudio al identificarse solo 3 amenazas de este origen con capacidad de impactar negativamente en el sistema de abastecimiento hídrico de la ciudad de Antofagasta. A continuación, se detallan sus principales características y su manifestación en el caso de estudio.

8.2.1. Contaminación de fuentes

Cada una de las fuentes se encuentra expuesta a diferentes agentes contaminantes asociados a las actividades desarrolladas en las áreas de captación de agua. Mientras el agua de mar recibe descargas de riles desde emisarios de diferentes actividades industriales, además de posibles derrames de petróleo, siendo el último de estos registrado en 2012 (Garcés, 27-04-2012), el proceso de desalación no es capaz de eliminar una parte de la contaminación del agua de mar. Por otra parte, sumado a la presencia natural de elementos nocivos para la salud humana en las aguas de cordillera, la contaminación producida principalmente por la actividad minera en la región ha generado una acumulación de metales pesados en el agua, como el boro, el plomo y el mercurio, obligando a la empresa sanitaria a implementar un tratamiento especial para la potabilización de estas aguas (Sola, 28-10-2012). Lo anterior ha derivado en que los informes de indicadores de calidad del servicio (SISS, s/f b), que analiza 43 parámetros microbiológicos, químicos y físicos, señale que existen más de 200.000 clientes en la región afectados por los altos niveles de sulfatos, hierro, arsénico y turbiedad del agua (Cooperativa, 15-02-2016). Si bien los niveles de contaminación de esta fuente, tanto por la presencia natural de elementos nocivos para la salud como por la importancia de la actividad minera para la economía regional y nacional, se presentan como una amenaza permanente, esta puede ser controlada mediante la acción humana, especialmente asociada a la implementación de tecnologías que permitan asegurar la calidad del suministro hídrico producido para la ciudad de Antofagasta.

8.2.2. Accidentes externos

La ocurrencia de accidentes que puedan comprometer la capacidad de suministro de agua potable puede abordarse en el contexto de las amenazas tecnológicas asociadas a los sistemas de abastecimiento hídrico, distinguiendo además diferencias según su origen. Por ello, las amenazas al sistema de abastecimiento suscitadas por factores internos causantes de accidentes en la red se analizan más adelante desde un enfoque de las amenazas tecnológicas. Por su parte, el sistema también presenta exposición de su infraestructura frente a accidentes que puedan ser provocados por agentes externos. De esta manera, la SISS (2015) clasifica dentro de los tipos de fallas asociados a los cortes de agua registrados la ocurrencia de accidentes provocados por terceros, distinguiendo como causas la realización de trabajos por parte de otras empresas, el choque de vehículos contra componentes de la infraestructura o el paso de vehículos pesados, además de otras causas que, si bien no están especificadas, se agrupan bajo dicha tipología. La SISS (2011b) también señala que no se deben incluir como externos los accidentes provocados por empresas contratistas de la empresa sanitaria, agrupándose dentro de los factores internos que se analizan más adelante.

Debido al desarrollo urbano de Antofagasta y las permanentes intervenciones realizadas en la infraestructura urbana, el sistema de abastecimiento se encuentra expuesto a la ocurrencia de accidentes por trabajos de otras empresas. De esta manera, tal como se muestra en la Tabla 33, se identificaron en total 100 cortes producidos por este motivo para el periodo 2011-2014, concentrados en los sectores Ancla y Bonilla. Además, muchas de las conducciones que conforman la infraestructura de abastecimiento se encuentran construidas en la superficie y en zonas aledañas a diferentes vías vehiculares, por lo que un accidente de tránsito podría involucrar daños que impacten sobre la continuidad del suministro hídrico de la ciudad, eventos sobre los cuales existe amplio registro en la ciudad. En este sentido, los cortes de suministro registrados en la ciudad por dichos motivos ascienden a 56 para el mismo periodo, registrándose principalmente en los sectores Prat, Ancla y Bonilla. Por último, se identificaron 39 cortes clasificados por otros motivos no especificados para el mismo periodo, lo que significa que anualmente los cortes producidos por accidentes externos rondan los 50 en total para la ciudad, siguiendo la tendencia de distribución por tipo de corte al concentrarse mayoritariamente en los sectores Bonilla y Ancla.

Sector	Trabajos	Choque vehículo	Otros	Total
La Chimba	8	0	1	9
Bonilla	27	10	10	47
Balmaceda	5	2	2	9
Prat	3	11	0	14
El Salto	6	3	0	9
Ancla	30	11	4	45
Centro	5	9	9	23
A. Gran Vía	1	0	0	1
Amarillos	7	5	8	20
Indepen.	4	4	2	10
Sur	4	1	3	8
Total	100	56	39	195

Tabla 33: Cortes por acción de terceros entre 2011 y 2014 en la ciudad de Antofagasta
Fuente: Elaboración propia en base a SISS (2015)

8.2.3. Geopolíticas

El componente geopolítico se refiere clásicamente a la doctrina de las relaciones de la tierra con los desarrollos políticos basado en fundamentos de la geografía, especialmente de la geografía política como doctrina y estructura de los organismos políticos del espacio que la definen como la ciencia geográfica del estado (Cuéllar, 2012). Bajo este enfoque, la amenaza identificada, derivada de procesos geopolíticos que impacta en la disponibilidad hídrica para el abastecimiento de Antofagasta, se constituye a partir de la existencia de una disputa por parte de los gobiernos de

Chile y Bolivia respecto al uso de las aguas del Río Silala, originado en el Departamento de Potosí, al sureste de este último país, y que desemboca sus aguas en el Río San Pedro de Inacaliri y posteriormente en el Río Loa, principal fuente de extracción de aguas de cordillera del sistema de abastecimiento hídrico de la ciudad de Antofagasta (Mora, 03-07-2017). El río posee un caudal medio que oscila entre 120L/s y 180L/s (MOP, 2012), por lo que el conflicto compromete la disponibilidad hídrica en varias de las fuentes de agua de cordillera que posee la empresa sanitaria.

La demanda, presentada en 2016 a la Corte Internacional de la Haya por el Gobierno de Chile, se funda en la condición de Río Internacional que posee el Río Silala debido a que su curso recorre más de un país, ratificada en el Tratado de Paz y Amistad de 1904 firmado por ambos países, y desconocida por el Gobierno Boliviano desde 1997, tras lo cual se han realizado diferentes campañas desde el país vecino para reivindicar esta postura y demandar la fuente de agua como propia (Álvarez, 03-07-2017). El Programa de las Naciones Unidas para el Medioambiente (2007) define la vulnerabilidad en las cuencas hidropolíticas según las relaciones entre los estados en disputa, la existencia o no de tratados internacionales, la simetría del desarrollo económico, social e institucional, la variabilidad climática natural, entre otros factores, por lo que la cuenca del Río Silala se encuentra definida como una de las más vulnerables del mundo en términos hidropolíticos (Mora, 03-07-2017). Actualmente, tras la presentación de la memoria de demanda al tribunal internacional en Julio de 2017 (Álvarez, 03-07-2017), el proceso se encuentra a la espera de la presentación de la contramemoria del Gobierno de Bolivia, que dispone de un año para dicho cometido a partir de la fecha indicada, tras lo cual la Corte de la Haya definirá las fechas para una eventual réplica y dúplica de la demanda. De esta manera, un resultado desfavorable para Chile en el litigio podría impactar en el caudal disponible de las fuentes de captación de agua de cordillera.

8.3. Amenazas Tecnológicas

Las amenazas clasificadas por su origen como de tipo tecnológica son eventos específicos dentro de las amenazas antrópicas, y corresponden a posibles fallas en dotaciones de infraestructura urbana o en procesos que representan un gran potencial de peligro, pudiendo generarse por negligencias, faltas de control adecuados o una mala capacidad de prevención a la ocurrencia de eventos catastróficos (Lavell, 1996). Para el sistema de abastecimiento hídrico de la ciudad de Antofagasta se identificaron 6 amenazas clasificadas bajo esta tipología, y aunque por su naturaleza no es posible espacializarlas, su análisis se basa en las características que pueden significar un impacto sobre el agua suministrada a la ciudad. Además, debido al componente de prevención, muchas de ellas dependen de la ocurrencia de otros eventos para manifestarse, evidenciando la estrecha correlación entre los factores de riesgo identificados para el presente estudio. A continuación, se describen las principales características de cada una de ellas que podrían comprometer la capacidad de abastecer con agua potable a la ciudad de Antofagasta.

8.3.1. Cortes eléctricos

El sistema hídrico de la ciudad de Antofagasta, al igual que la mayor parte de los sistemas que componen los medios urbanos, depende de la electricidad como recurso para asegurar su correcto funcionamiento. En el caso del suministro de agua de la ciudad de Antofagasta, existe una dependencia eléctrica total del sistema de abastecimiento hídrico debido a su demanda por parte de las plantas potabilizadoras, de abatimiento de arsénico y desalinizadora. Aguas Antofagasta (2017) señala que las plantas asociadas a fuentes de agua cordilleranas poseen planes de contingencia frente a emergencias provocadas por cortes o apagones eléctricos, los cuales se basan

principalmente en la presencia de generadores y baterías que entregan autonomía a dichas plantas para asegurar su funcionamiento. Adicionalmente, la SISS fiscaliza periódicamente las instalaciones sanitarias de la empresa, en las cuales se ha analizado el sistema de emergencia eléctrico de las plantas y su correcto funcionamiento (El Nortero, 04-05-2014). Sin embargo, cabe destacar que Cristian Jiménez señala que la Planta Desalinizadora La Chimba no posee medidas de emergencia frente a cortes eléctricos debido al alto consumo energético de ésta, lo que vuelve inviable la implementación de sistemas auxiliares de alimentación.

Las dos fuentes de agua para el abastecimiento de la ciudad de Antofagasta dependen de diferentes fuentes de energía eléctrica. Mientras el sistema de producción de agua de cordillera y de distribución de agua potable, así como la región de Antofagasta, se encuentran conectados al SING, el cual ha presentado dos apagones en los últimos 25 años⁶⁵ por fallas en el sistema, sumado al apagón posterior al terremoto del 27 de febrero de 2010 (El Nortero, 02-07-2014), han afectado directamente a la ciudad de Antofagasta y sus fuentes de abastecimiento hídrico. En términos generales, debido a la duración de dichos cortes, la respuesta de los sistemas de energía auxiliares de las PTAP de agua de cordillera ha sido positiva, permitiendo que sigan operando (El Nortero, 04-05-2014). Por su parte, el suministro eléctrico de la Planta Desalinizadora depende de una línea de transmisión directa desde una planta termoeléctrica en Mejillones, y considerando que su consumo asciende a 18MWh, resulta imposible suministrarla con medios alternativos, como equipos electrógenos o una conexión de respaldo a la red local. Esto ha significado que el proceso de desalinización se haya visto interrumpido varias veces por fallas del sistema eléctrico, como en enero del 2013 producto del choque de un camión contra parte de la postación de la línea de abastecimiento eléctrico, o con la falla más reciente a finales del 2016 (Ramírez, 27-12-2016). De esta manera, se evidencian claramente las diferencias de los niveles de exposición de cada fuente debido a su capacidad de autoabastecerse de energía eléctrica para su correcto funcionamiento, con un impacto total sobre las fuentes de agua de mar en contraste con las fuentes de agua de cordillera, cuya autonomía energética les permite seguir operando frente cortes eléctricos.

8.3.2. Envejecimiento de la infraestructura

El ciclo de vida corresponde a una herramienta de identificación de los impactos ambientales de un producto, proceso o actividad a lo largo de su vida útil, diferenciando 5 etapas que van desde la extracción de materias primas, su fabricación, su transporte y distribución, la instalación, uso y mantención del elemento, y finalmente su reciclaje y eliminación, ofreciendo una visión completa de los aspectos ambientales del producto para estimar las ventajas y desventajas de estos (Sustainable Solutions, 2017). El envejecimiento como amenaza al sistema de abastecimiento se ubica dentro de la etapa de uso, y se define según la antigüedad de la infraestructura respecto a su vida útil estimada, estando expuesta en caso de encontrarse con su vida útil cumplida. Esto implica que dicha infraestructura pueda presentar fallas provocadas o potenciadas por su envejecimiento, comprometiendo el abastecimiento hídrico en su etapa asociada. Existen diferentes escalas de análisis dependiendo del componente evaluado, ya que mientras la evaluación de una tubería se limita solo a dicha infraestructura, la evaluación de infraestructura más compleja, como lo son las

⁶⁵ El 3 de Julio de 2002 se produjo un corte de aproximadamente 2 horas de duración, mientras que el 2 de Julio de 2014 el apagón se extendió por más de 9 horas (Ramírez, 27-12-2016).

PTAP, abarca los múltiples elementos que la componen y se consideran en su conjunto para su clasificación, influyendo también en el nivel de detalle del análisis de cada componente. A nivel general, en la infraestructura de abastecimiento, las obras civiles poseen una duración mayor que las obras electromecánicas y de control, lo mismo que las tuberías respecto a los equipos (CONAGUA, 2015). Cabe recordar que, si bien la duración de los materiales de la infraestructura determina su vida útil, el envejecimiento es solo una parte de los factores que definen la vida útil de los componentes, y que el elemento preponderante lo constituye la operación y mantenimiento de la infraestructura (CONAGUA, 2015), pero al no contar con información sobre el mantenimiento específico de cada componente, la evaluación de este aspecto de la infraestructura de abastecimiento hídrico se aborda únicamente desde la antigüedad de los elementos analizados.

8.3.3. Materialidad

Uno de los elementos que define la vulnerabilidad en el abastecimiento hídrico corresponde al material de las tuberías que lo componen y que define sus características de resistencia mecánica, durabilidad, resistencia a la corrosión, capacidad de conducción, economía, facilidad de conexión y reparación, y principalmente la conservación de la calidad del agua (CONAGUA, 2015). En términos de la vulnerabilidad del sistema de abastecimiento hídrico, los parámetros a evaluar se relacionan con sus resistencias mecánicas y a la corrosión, además de la durabilidad y el envejecimiento del sistema, abordados separadamente más adelante. La resistencia mecánica corresponde a su capacidad de soportar cargas externas, tanto estáticas como dinámicas, y cargas internas de operación y transitorios, como los golpes de ariete, además de su resistencia a daños durante su instalación. A su vez, la resistencia a la corrosión se asocia a su durabilidad, ya que se refiere a su capacidad de resistir suelos y aguas agresivos, capaces de provocar reacciones químicas adversas en las tuberías y reduciendo su capacidad de conducción y su vida útil (CONAGUA, 2015).

Las tuberías de asbesto cemento se caracterizan por su ligereza, resistencia a la corrosión en general e inmunidad a la corrosión electroquímica y a la tuberculización, aunque también son frágiles y se requieren cuidados adicionales en su transporte e implementación (CONAGUA, 2015). Adicionalmente, el trabajo con este tipo de tuberías, dada la naturaleza del material utilizado en su fabricación, genera riesgos de contraer asbestosis producto de la inhalación de asbesto, tanto para los trabajadores de las fábricas como para los implicados en su instalación o remoción, y aunque no es probable contraer enfermedades respiratorias por el uso de tuberías de asbesto cemento, existen serias consecuencias para la salud de las comunidades suministradas con agua conducida por estas tuberías debido a su deterioro y consecuente lixiviación de fibras de amianto en el agua, siendo el principal riesgo asociado la posibilidad de contraer mesotelioma peritoneal (Sadler et al., 1984). Esto llevó a su prohibición total en la Unión Europea a partir de 2003 (Diario Oficial de la Unión Europea, 15-04-2003) y en varios países posteriormente, y aunque en Chile está prohibida la producción, importación, distribución, venta y uso de elementos o productos que contengan asbesto⁶⁶, su alta presencia en redes de agua y una posible solución a ello aún no han sido abordadas adecuadamente.

Entre las tuberías de poliéster sintético se identifican de dos tipos en el área de estudio. El primero corresponde al PVC, que cuenta con características de hermeticidad al impedir filtraciones y fugas, son altamente eficientes ya que sus paredes interiores son lisas, es inmune a la corrosión química o electroquímica y altamente resistente al ataque químico de suelos o agua agresivos, además de ser

⁶⁶ Decreto 656 del 12-09-2000 que prohíbe uso de asbesto en productos que indica.

ligero, flexible, fácil de instalar y con una alta resistencia a la tensión que genera un mejor comportamiento frente a cargas externas, como movimientos sísmicos o sobrepresiones momentáneas (CONAGUA, 2015). Sin embargo, es susceptible a factores que pueden afectar su resistencia, como daños durante su manejo e instalación y su exposición prolongada a rayos solares o a temperaturas menores a 0°C, mientras que a temperaturas mayores a 25°C se debe reducir la presión de trabajo. El segundo material plástico es el Polietileno de alta densidad o HDPE, con las mismas ventajas que el PVC, sumadas a una mayor durabilidad y compresibilidad, se unen por termofusión, tienen mayor rapidez y menores costos de implementación, y mayor compatibilidad con otros materiales, mientras que sus desventajas son el elevado costo respecto a tuberías de otros materiales y la reducción progresiva de su resistencia a la presión (CONAGUA, 2015).

Por su parte, las tuberías de hormigón armado, si bien son más utilizadas en líneas de conducción que en redes de distribución, se destacan por sus características de alta resistencia mecánica y a altas presiones en grandes diámetros, su alta capacidad de conducción, larga vida útil y bajo mantenimiento, pero también presenta problemas de corrosión en suelos agresivos y una alta dificultad para sus conexiones y reparaciones. Respecto a las tuberías fabricadas de hierro, se identifican las de hierro fundido y de hierro dúctil, siendo esta última una mejora al primero en cuanto a su dureza y resistencia, y se destaca su larga vida útil, una alta resistencia mecánica y a la corrosión, su casi nulo mantenimiento y el bajo costo de su soldadura, pero también se destaca su susceptibilidad a corrosión eléctrica o química si no cuenta con la protección necesaria, además de su alto peso y su poca disponibilidad (CONAGUA, 2015). Finalmente se encuentran las tuberías de acero, con una alta resistencia mecánica, tanto a cargas de impacto como a altas presiones internas, son de fácil transporte e instalación y más ligeras respecto a tuberías de concreto o hierro fundido. Sin embargo, es susceptible al aplastamiento ya que no soporta cargas externas grandes, y presenta características de corrosión propia de los metales, aunque más severa que la del hierro fundido al ser fácilmente oxidable, por lo que los costos de mantenimiento son mayores y su vida útil es menor, requiriendo de recubrimientos internos y externos para su prevención (CONAGUA, 2015).

Material	Resistencia mecánica	Resistencia a la corrosión
Materiales plásticos	Fiable	Importante
Acero	Importante	Fiable
Fundición dúctil	Importante	Importante
Fibrocemento	Regular	Fiable
Materiales plásticos	Fiable	Importante
Hormigón	Importante	Importante
Fundición gris	Fiable	Importante

*Tabla 34: Resistencia mecánica y a la corrosión por material
Fuente: Alonso (2008)*

Si bien no es posible establecer un indicador cuantitativo para jerarquizar los materiales según sus características de resistencias mecánica y a la corrosión, a partir del análisis de la Tabla 34 es posible establecer que las tuberías de asbesto cemento son las con menor resistencia entre los materiales identificados en el sistema de abastecimiento, mientras que las de hierro dúctil y hormigón armado presentan la mayor resistencia para ambos aspectos. En el resto de los materiales,

el HDPE, el PVC y el hierro fundido poseen una gran resistencia a la corrosión y una resistencia mecánica fiable, mientras que en las tuberías de acero estas características se invierten, con una resistencia mecánica importante y resistencia a la corrosión fiable (Alonso, 2008). Así, y sumado a lo especificado previamente, el uso de asbesto cemento como material de construcción de las tuberías para el suministro hídrico urbano constituye un factor de vulnerabilidad, tanto por su baja resistencia mecánica y a la corrosión respecto al resto de materiales, como por los impactos a la

salud asociados a su presencia en redes de agua potable. Sin embargo, cabe señalar que las características químicas específicas del suelo en donde se emplazan tuberías de ciertos materiales pueden contribuir a reducir la resistencia mecánica y a la corrosión de éstas, siendo necesario un análisis en profundidad respecto al efecto de los diferentes tipos de suelo sobre cada material.

8.3.4. Golpe de ariete

Un golpe de ariete o choque hidráulico es el incremento momentáneo de la presión ocurrida en un sistema de aguas tras un cambio repentino de su dirección o velocidad, provocando daños a las tuberías, accesorios y válvulas, y en los casos más severos, la ruptura de dichos componentes. Este fenómeno y sus implicancias para el diseño y operación de los sistemas de abastecimiento hídrico, al no ser ampliamente entendido, en general posee un alto número y frecuencia de fallos causados por estos eventos. Típicamente se reconocen 4 eventos que pueden inducir grandes cambios de presión, como el arranque de una bomba, los fallos en su potencia, el cierre repentino de válvulas y una inapropiada operación e implementación de dispositivos (Michael, 2009). Por otra parte, a modo de soluciones aplicadas para este tipo de amenaza, está la incorporación de dispositivos amortiguadores de golpes de ariete, como válvulas controladas automáticamente, cámaras de aire y estanques de oscilación o reguladores de presión, además de sugerirse una reducción en la velocidad de los flujos de agua (OPS, 1998). Los dispositivos para este fin identificados en el sistema de abastecimiento hídrico de Antofagasta se encuentran agrupados como tal en la revisión de la infraestructura realizada en los estudios tarifarios consultados (SISS, 2006; 2011c), aunque no se especifica claramente a qué tipo de dispositivo se refiere. De esta manera es posible establecer que, de la infraestructura que por su naturaleza es susceptible a la ocurrencia de golpes de ariete, aquella que cuenta con equipos o dispositivos amortiguadores de golpes de ariete se encuentra menos expuesta a daños a partir de estos eventos, mientras que aquella que no registra la existencia de equipos amortiguadores se encuentra totalmente expuesta a esta amenaza, siendo este el criterio utilizado para evaluar su impacto sobre el abastecimiento hídrico de la ciudad de Antofagasta.

8.3.5. Rotura y falla de tuberías

Las tuberías corresponden al componente más frágil del sistema de abastecimiento hídrico, y los daños que pueden producir fallos y roturas en su trazado pueden derivar de diversas causas, como su materialidad y envejecimiento, las que han sido analizadas individualmente en la presente investigación. Sus consecuencias se traducen en la rotura o fuga en tuberías, sus uniones o accesorios, que pueden derivar en fisuras en muros donde se encuentran incrustadas e inundaciones en las instalaciones, resultando finalmente en la restricción o interrupción del servicio de agua potable (OPS, 1998). Así, la amenaza que constituyen las fallas y roturas de tuberías considera los eventos de cortes de suministro de agua potable registrados en la ciudad de Antofagasta y consignados bajo esta tipología de causa, diferenciando además los producidos en matrices y los registrados en arranques, conexiones y equipos accesorios. Como lo muestra la Tabla 35, para la ciudad se

Sector	Matriz	Arranques	Total
La Chimba	60	22	82
Bonilla	135	99	234
Balmaceda	69	12	81
Prat	146	42	188
El Salto	31	17	48
Ancla	113	41	154
Centro	201	33	234
A. Gran Vía	4	2	6
Amarillos	70	13	83
Indepen.	24	3	27
Sur	41	11	52
Total	894	295	1.189

Tabla 35: Cortes por fallas en tuberías entre 2011 y 2014 en Antofagasta

Fuente: Elaboración propia en base a SISS (2015)

registraron un total de 1.189 cortes de suministro asociados a eventos de fallas de tuberías (SISS, 2015), con cerca de la mitad repartidos entre los sectores Bonilla, Centro y Prat, y con tres cuartas partes de ellos ocurridos en las matrices de agua potable, resultando en una media anual cercana los 300 cortes de agua registrados para la ciudad.

8.3.6. Falla de equipos

Además de las tuberías, los sistemas de agua potable involucran una serie de estructuras civiles destinadas al apoyo de la producción o como parte importante del proceso, los que al igual que en las fallas de tuberías, poseen diversas causas que han sido analizadas de manera individual para la presente investigación, pero que en su ocurrencia pueden impactar la capacidad del suministro hídrico hacia la ciudad de Antofagasta (OPS, 1998). Según lo anterior, la SISS (2015) clasifica dentro de las causas de cortes de suministro la falla de equipos, incluyendo reductoras de presión, bombas de elevación y de impulsión, según la cual se registra solo un evento ocurrido en la ciudad y que afectó parcialmente al Sector Bonilla, por lo que el impacto de esta amenaza analizado desde este indicador no es significativo.

9. Evaluación de vulnerabilidad del sistema de abastecimiento

A partir de la superposición de cada una de las amenazas identificadas con potencial de afectar negativamente el suministro hídrico hacia la ciudad de Antofagasta con el sistema en sí, fue posible definir el grado de exposición de cada uno de sus componentes y del sistema en general, permitiendo la realización del análisis de vulnerabilidad del sistema. Los impactos registrados se traducen en indicadores de vulnerabilidad física del sistema, que representan el grado de impacto esperado en el suministro hídrico para la ocurrencia de las diferentes amenazas. Estas mismas presentan diferentes grados de relación entre sí, evidenciando una relación de causalidad entre ellas, por lo que estos eventos, aunque analizados individualmente, son inseparables en su ocurrencia, derivando uno del otro. A su vez, las características específicas de cada amenaza definen la metodología utilizada en su evaluación, ya que mientras algunas poseen un componente espacial, otras solo se aplican directamente sobre las características físicas y de flujos de agua del sistema. Por otra parte, la vulnerabilidad del sistema también responde a factores administrativos asociados al manejo de emergencias, y que funciona como síntesis de la vulnerabilidad asociada a los aspectos operativos del sistema, incluyendo además la capacidad de respuesta y medidas de mitigación ejecutadas y contempladas.

A continuación, se presentan los principales resultados obtenidos mediante la aplicación de las amenazas identificadas sobre el sistema de abastecimiento hídrico, y su comparación con la evaluación realizada por la empresa sanitaria para la elaboración de su Plan de Emergencias, a fin de analizar las medidas de mitigación implementadas y requeridas para reducir la vulnerabilidad del sistema según lo propuesto por el CEPIS (2000). De esta manera, la investigación no se limita a señalar los problemas asociados a la vulnerabilidad identificada para el sistema y sus componentes, sino que también aborda las acciones realizadas y aquellas que se podrían incorporar para mitigar los efectos producidos por la ocurrencia de los eventos consignados, todo esto bajo un enfoque integrado y de sostenibilidad, que permita reducir la vulnerabilidad del sistema de abastecimiento de aguas y asegurar el suministro hídrico hacia los habitantes de la ciudad de Antofagasta.

9.1. Impactos en el abastecimiento por amenaza

Cada una de las amenazas identificadas para la presente investigación puede tener diferentes efectos en el sistema de abastecimiento hídrico de Antofagasta asociados a su ocurrencia, derivando finalmente en comprometer la capacidad del sistema para cumplir sus funciones adecuadamente y poder suministrar el agua potable requerida por la ciudad. Las principales características y las áreas de impacto de cada una de estas amenazas obtenidas a partir del desarrollo del objetivo previo se encuentran resumidas en la Tabla 36. Aunque su análisis se realiza individualmente, las amenazas pueden impactar en conjunto al encontrarse algunas estrechamente relacionadas. Por lo tanto, la evaluación de cada amenaza fue realizada respecto a su impacto en el sistema de abastecimiento hídrico a escala de sus componentes, en las etapas de producción y distribución comprendidas en el suministro hídrico, así como de los sectores de distribución y del sistema en general, mediante el uso de indicadores de impacto esperado, vulnerabilidad y capacidad remanente en cada uno, incluyendo además a la población afectada parcial o totalmente por la ocurrencia de estos eventos, recogiendo la metodología propuesta por el CEPIS (2000) para su revisión en profundidad.

	Amenaza	Valor que la caracteriza	Área de impacto
	Sísmica	8,2Ms de magnitud; 35Km de profundidad; 150Km de distancia hipocentral; 112 años de recurrencia; 98% de ocurrencia.	Suelos de tipo rígido y blando; 19,9% de superficie regional, principalmente en Depresiones de Atacama y del Loa, y en el norte de la Precordillera de Domeyko, con parches en la Precordillera y en Llanos del Desierto de Atacama; 35,9% de Antofagasta, cubriendo gran parte de la superficie urbana, principalmente en sectores norte y sur.
	Sísmica de fallas	6,7Ms-7Ms de magnitud; <15Km de profundidad; 3.000 años de recurrencia, último evento hace aprox. 2.500 años.	1Km en torno al Sistema de Fallas de Atacama; 22% de la superficie regional.
	Tsunami	9msnm; 128 años de recurrencia; 50% de ocurrencia; 30msnm para tsunamis extremos.	Todo el borde costero, en promedio 300m desde la línea de costa; Tsunamis extremos entre 400m y 1Km desde la línea de costa, críticos en zona centro de la ciudad.
Natural	Remociones en masa	Asociada a factores internos condicionantes y externos desencadenantes, como sismos o precipitaciones; Su recurrencia está condicionada por estos fenómenos.	Suelos susceptibles y con alta pendiente; 25,2% de superficie regional, principalmente en sectores de Precordillera y Cordilleras de Los Andes y de la Costa; 13,1% de la superficie de Antofagasta, principalmente en el Escarpe Costero.
	Volcánica	Volcán Lascar con nivel muy alto de amenaza y recurrencia de 1 a 99 años; Irruputunco, Lastarria y San Pedro con nivel moderado, este último con misma recurrencia que Lascar.	Zonas de flujo de lavas y dispersión de material piroclástico en torno a volcanes activos; Flujos entre 400Km2 y 800Km2 en torno a cada volcán; 7,3% de superficie regional con nivel alto y medio de dispersión.
	Invierno Altiplánico	Concentración de Pp en periodo estival; Máximo de 42mm diarios; Ocurrencia anual, potenciada por fenómeno del niño con recurrencia de 4 años.	Desde la zona prealtiplánica hasta el límite oriental de la región, con isoyetas máximas en San Pedro de Atacama y parte alta de Calama.
	Cambio climático	Incremento de T° entre 1,1°C y 2°C, y disminución de Pp entre 1,3% y 3,4% en periodo 2011-2050.	Reducción del caudal de escorrentía, en Subcuenca Loa Alto entre un 29,2% y 56,1%, y en Loa Intermedio entre un 46,7% y 89,3%, para el periodo 2011-2050.
Antrópica	Contaminación natural	Concentración de elementos que impacten en la capacidad de producción y calidad del agua.	Fuentes agua de cordillera por altas concentraciones de arsénico inorgánico; Fuente de agua mar por marea roja.
	Contaminación antrópica	Concentración de elementos que impacten en la capacidad de producción y calidad del agua.	Fuentes de cordillera por impacto de actividad minera; Fuente de agua de mar por disposición de RILES y derrames de petróleo.
	Accidentes externos	N° de accidentes provocados por 3ros que impacten en el suministro hídrico.	Principalmente producidos por trabajos de otras empresas y choques de vehículos, con 51,3% y 28,7% respectivamente.
	Geopolítica	Disputa con Bolivia por control de fuentes de agua.	Rio Silala y efluentes.
	Cortes eléctricos	Capacidad de asegurar el suministro frente a cortes en la fuente primaria de energía.	Existencia de generadores de emergencia en infraestructura que la requiera.
Tecnológica	Envejecimiento	Antigüedad de la infraestructura respecto a su vida útil estimada.	Infraestructura que haya cumplido su vida útil.
	Materialidad	Baja resistencia mecánica y a la corrosión; Impacto en calidad del agua y del servicio.	Tuberías de Asbesto Cemento.
	Golpe de ariete	Rotura de tuberías por incremento repentino de presión.	Infraestructura susceptible y que no posea equipos amortiguadores.
	Rotura y falla de tuberías	Cortes por roturas y fallas en matrices y en arranques; Múltiples causas posibles.	Principalmente en matrices con el 75,2% de los cortes.
	Falla de equipos	Cortes por fallas de equipos; Múltiples causas posibles.	Según infraestructura que falle o que sea susceptible según lo analizado.

Tabla 36: Resumen de amenazas al sistema de abastecimiento hídrico de la ciudad de Antofagasta
Fuente: Elaboración propia

9.1.1. Amenaza sísmica

	Componente	Impacto	Cap. Remanente	Ind Vuln
Producción	Captaciones	1.686L/s (33,7%)	3.322L/s (66,3%)	0,337
		98,5Km (33,8%)	2,08Km (0,7%)	0,993
	Aducciones	1.410L/s (30,8%)	3.172L/s (69,2%)	0,308
		238,4Km (54,7%)	0,21Km (0,1%)	0,999
	PTAP	1.000L/s (54,1%)	850L/s (45,9%)	0,541
	Estanques	35.000m ³ (54,9%)	28.800m ³ (45,1%)	0,549
	PEAC	650L/s (14,1%)	3972L/s (85,9%)	0,141
Total	1.000L/s (54,1%)	850L/s (45,9%)	0,541	
Distr.	Conducciones	38,35Km (71,6%)	15,23Km (28,4%)	0,716
	Estanques	31.756m ³ (53,2%)	27.940m ³ (46,8%)	0,532
	PEAP	320L/s (29,9%)	750L/s (70,1%)	0,299

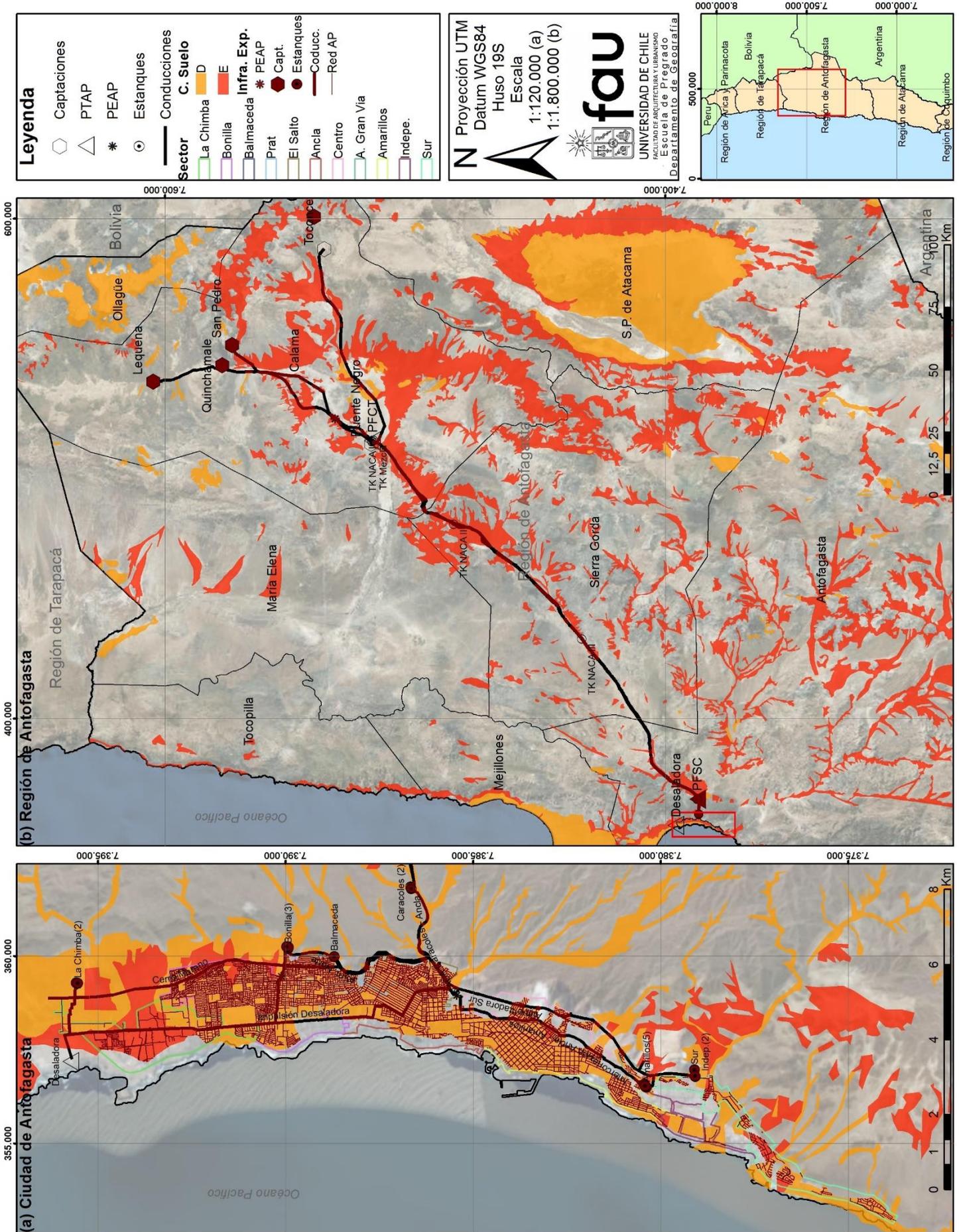
Tabla 37: Vulnerabilidad de infraestructura de abastecimiento hídrico de la ciudad de Antofagasta a amenaza sísmica

Fuente: Elaboración propia en base a Aguas Antofagasta (2017), CEPIS (2000) NEHRP (2009), SERNAGEOMIN (2003; 2014), SISS (2017), y Tapia et al. (2000)

amenaza. La capacidad remanente de las captaciones corresponde principalmente a la captación de agua de mar, conservándose el 65,3% de la capacidad total de captación, por lo que el índice de vulnerabilidad de las captaciones es de 0,357. Sin embargo, debido a que las aducciones de cordillera representan casi la totalidad de la extensión de las aducciones de captación, el hecho que estén en su mayoría expuestas a suelos con alta amplificación sísmica hace que tengan un índice de vulnerabilidad de 0,993. El detalle del impacto de la amenaza sísmica en la infraestructura de abastecimiento de la ciudad de Antofagasta se muestra en la Tabla 37 y se detalla en el Anexo 19, y su espacialización se observa en la Cartografía 10.

En cuanto a las aducciones de agua cruda, el 100% de la capacidad de conducción de aguas de cordillera se encuentra comprometido al estar el 54,7% de la extensión de la NACA y la VACA expuestas a suelos clase D y E, debido a su trayecto a través de parte de la Precordillera de Domeyko y de los llanos del Desierto de Atacama, ya que al igual que las aducciones de las captaciones, se encuentran sobre depósitos aluviales y coluviales. De esta forma, la capacidad remanente es de un 69,2%, asociado completamente a la desalación, por lo que el índice de vulnerabilidad es de 0,308. Sin embargo, al igual que con las aducciones de las captaciones, debido a la longitud de la NACA y la VACA, el índice de vulnerabilidad de las tuberías de componente asciende a 0,999.

Lo mismo ocurre con las PTAP, ya que únicamente se encuentran expuestas las dos PFSC al estar en depósitos del mismo tipo que los anteriores, por lo que la capacidad remanente sería de un 45,9%, atribuido únicamente a la planta desaladora, y el índice de vulnerabilidad del componente sería de 0,541. Además, todos los estanques asociados a las PTAP vulnerables también están expuestos a esta amenaza, por lo que toda la infraestructura de potabilización para el abastecimiento hídrico de Antofagasta sería vulnerable. Estos últimos representan cerca del 55% del volumen de los estanques de producción, por lo que la capacidad remanente de éstos sería del 45,1%, resultando entonces un índice de vulnerabilidad de 0,549 para este componente. Por su parte, de las PEAC solo se encuentra expuesta una de las pertenecientes al sistema de captación Lequena, por lo que el remanente sería el 85,9% de la capacidad total, representado por las impulsiones de la planta desaladora.



Cartografía 10: Impacto de la amenaza sísmica en el sistema de abastecimiento hídrico de la ciudad de Antofagasta
 Fuente: Elaboración propia en base a NEHRP (2009), SERNAGEOMIN (2003, 2014), SISS (2017) y Tapia et al. (2000)

Para el caso de la distribución del recurso, todas las conducciones de agua potable tienen parte de su extensión en suelos de alta amplificación sísmica, algunas cerca del 40% de su longitud, como la Alimentadora Sur y la Interconexión Ancla-Amarillos, y otras como la Impulsión de la Desaladora con cerca del 90% expuesta. En total, cerca del 70% de la extensión de las conducciones de agua potable se encuentra expuesta a la amenaza sísmica, por lo que la capacidad remanente es del 28,4%, correspondiente a las partes no expuestas de las conducciones, y el índice de vulnerabilidad es de 0,716, aunque cabe mencionar que la exposición de una parte de las conducciones de agua compromete la capacidad completa de dicha conducción. Además, más del 50% de la capacidad de los estanques de distribución se encuentra expuesta al emplazarse 14 estanques en zonas de alta amenaza sísmica, siendo los principales todos los estanques La Chimba, Bonilla y Amarillos, ya que estos últimos representan el 46,5% de la capacidad de almacenamiento de agua de mezcla, por lo que la capacidad remanente es del 46,8%, que corresponde principalmente a agua de mezcla, y el índice de vulnerabilidad del componente asciende a 0,532. Por último, de las PEAP, las asociadas a los estanques La Chimba y Bonilla se encuentran también expuestas, comprometiendo toda su capacidad. En conjunto representan cerca del 30% de la capacidad del componente, por lo que la capacidad remanente es de un 70,1% y el índice de vulnerabilidad es de 0,299.

Respecto al impacto en el suministro de agua potable a la ciudad y sus sectores, como se muestra en la Tabla 38 y se detalla en el Anexo 19, considerando el impacto de la amenaza sísmica en la producción, los sectores con suministro de agua desalada serían los menos afectados debido a la baja exposición de la infraestructura de desalación. Por su parte, en la etapa de distribución, debido a que todas las conducciones de agua potable se encuentran expuestas, no se considerarán para el análisis, aunque si se tiene presente como factor de vulnerabilidad. Los sectores con sus estanques o infraestructura asociada

Sectores	Impacto	Cap. Remanente	Pobl. Impact.
La Chimba	100%	0%	
Bonilla	100%	0%	100%
Balmaceda	100%	0%	
Prat	55,7Km (93,7%)	3,77Km (6,3%)	29.860 (93,7%)
El Salto	18,4Km (84,3%)	3,42Km (15,7%)	8.780 (84,3%)
Ancla	77,49Km (84,3%)	14,4Km (15,7%)	40.873 (84,3%)
Centro	43,08Km (55,7%)	34,26Km (44,3%)	22.250 (55,7%)
A. Gran Vía	2,61Km (57%)	1,97Km (43%)	843 (57%)
Amarillos	100%	0%	
Indepen.	100%	0%	100%
Sur	100%	0%	
Total	515,1L/s (66,2%)	263,2L/s (33,8%)	303.216 (91,1%)

Tabla 38: Vulnerabilidad de la distribución de agua potable en la ciudad de Antofagasta a amenaza sísmica

Fuente: Elaboración propia en base a Aguas Antofagasta (2017), CEPIS (2000), NEHRP (2009), SERNAGEOMIN (2003; 2014), SISS (2011c; 2017), y Tapia et al. (2000)

en zonas de alta amenaza sísmica no cuentan con capacidad remanente, afectando totalmente a los habitantes de estos, como lo son los sectores de La Chimba, Bonilla, Balmaceda, Amarillos, Independencia y Sur. Para el resto de ellos, la capacidad remanente depende de la extensión de la red de agua potable que se encuentra expuesta, ya que se considera el supuesto de que la capacidad de producción de la planta desaladora permite abastecer la totalidad de la demanda hídrica de la ciudad en caso de requerirse. Así, el 79,5% de la red de distribución de agua potable de la ciudad es vulnerable, y mientras que los sectores del Centro y Alto Gran Vía tienen cerca del 55% de su red expuesta, los sectores de Ancla y El Salto rondan el 84%, destacándose el Sector Prat con el 93,7% de su red expuesta, afectando a porcentajes similares de población en sus respectivos sectores.

	Componente	Impacto	Cap. Remanente	Ind Vuln
Producción	Captaciones	1.736L/s (34,7%)	3.272L/s (65,3%)	0,347
		19,41Km (6,7%)	272Km (93,3%)	0,067
	Aducciones	1.410L/s (30,8%)	3.172L/s (69,2%)	0,308
		75,3Km (17,3%)	360,6Km (82,7%)	0,173
	Total	1.000L/s (54,1%)	850L/s (45,9%)	0,541
Distr.	Conducciones	2Km (3,7%)	51,58Km (96,3%)	0,037
	Estanques	2.000m3 (3,4%)	57,696m3 (96,6%)	0,034

Tabla 39: Vulnerabilidad de infraestructura de abastecimiento hídrico de la ciudad de Antofagasta a amenaza de sismos por fallas

Fuente: Elaboración propia en base a Aguas Antofagasta (2017), CEPIS (2000), Muñoz & Rauld (2010), SERNAGEOMIN (2003) y SISS (2017)

Para el caso de la amenaza que suscitan los sismos producidos por fallas geológicas activas en el área de estudio, tal como ocurre con los terremotos, la exposición de la infraestructura se limita al abastecimiento con agua de cordillera al localizarse parte de esta en las zonas de restricción definidas en la región. De esta manera, como se detalla en la Tabla 39 y en el Anexo 19, y como

se observa en la Cartografía 11, para la etapa de producción, casi la totalidad de la capacidad de captación, así como la NACA y la VACA, se encuentran expuestas, comprometiendo la totalidad de la producción de esta fuente. Además de esto, en la etapa de distribución de agua, se identifican impactos únicamente sobre un pequeño tramo de la Alimentadora Sur, además del estanque y cerca del 30% de la red de distribución del Sector Centro, resultando expuesta la totalidad de la capacidad de abastecimiento de dicho sector. Cabe señalar que la exposición de la Alimentadora Sur implica también impactos sobre los sectores Alto Gran Vía, Independencia y Sur, abastecidos por esta. A su vez, las fallas ubicadas cerca de la ciudad se distribuyen en casi la totalidad de su escarpe costero, por sobre el límite urbano, por lo que podría significar un factor gatillante de procesos de remociones en masa que pudieran afectar a la ciudad y su sistema de abastecimiento hídrico.

9.1.2. Amenaza de tsunamis

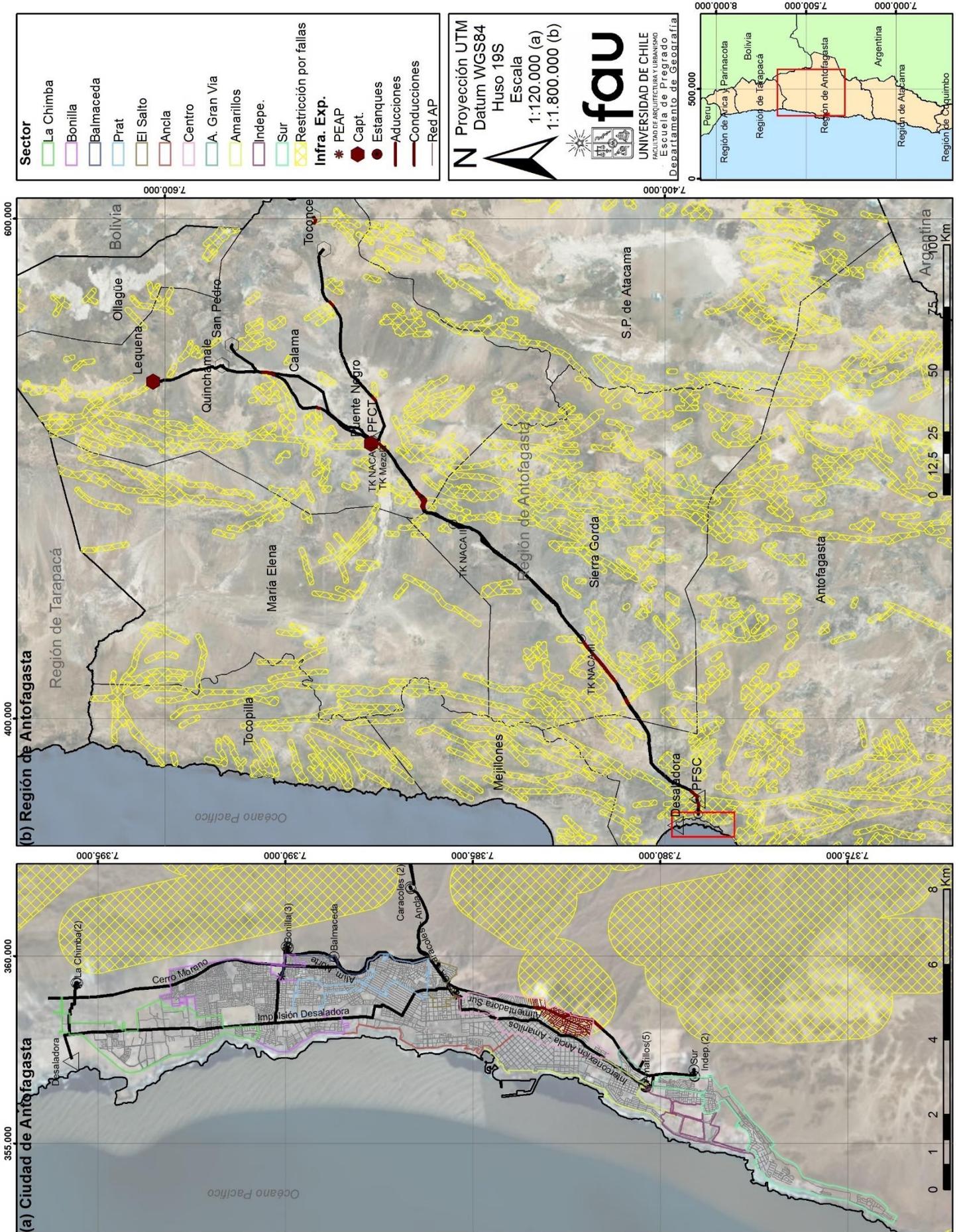
La amenaza de tsunami, en la etapa de producción, según se detalla en la Tabla 40 y en el Anexo 19, y se observa en la Cartografía 12, solo impactaría a la Planta Desaladora de Antofagasta, ya que su bocatoma y ducto emisario, además del edificio de captación y sus PEAC se encuentran en la zona de inundación de 9msnm, mientras que el resto de la infraestructura de la planta se encuentra en la zona de 30msnm. Por lo tanto, la capacidad remanente corresponde a toda la infraestructura

	Componente	Impacto	Cap. Remanente	Ind Vul
Producción	Captaciones	3.172L/s (63,3%)	1.836L/s (36,7%)	0,633
		0,35Km (0,1%)	291,05Km (99,9%)	0,001
	Aducciones	3.172L/s (69,2%)	1.410L/s (30,8%)	0,692
		0,21Km (0,1%)	435,69Km (99,9%)	0,001
	PTAP	850L/s (46%)	1.000L/s (54%)	0,541
	Estanques	1.800m3 (2,8%)	62.000m3 (97,2%)	0,028
	PEAP	3.172L/s (68,6%)	1.450L/s (31,4%)	0,686
	Totales	850L/s (45,9%)	1.000L/s (54,1%)	0,459
	Distr. - PEAP	600L/s (56,1%)	470L/s (43,9%)	0,561

Tabla 40: Vulnerabilidad de infraestructura de abastecimiento hídrico de la ciudad de Antofagasta a amenaza de tsunami

Fuente: Elaboración propia en base a Aguas Antofagasta (2017), CEPIS (2000), SERNAGEOMIN (2014), SISS (2017) y SRTM (2000)

de producción de cordillera, que representa el 36,7% de la capacidad de captación, el 30,8% de las aducciones, el 54% de la capacidad de potabilización, el 97,2% del volumen de los estanques de producción, el 31,4% de las PEAC y el 43,9% de las PEAP. A su vez, los indicadores de vulnerabilidad más altos corresponden a componentes en los que la desalación es predominante, como en las captaciones, aducciones y plantas elevadoras, oscilando entre 0,633 y 0,692.



Sectores	Impacto (L/s)	Cap. Remanente	Pobl. Impact.
La Chimba	100%	0%	100%
Bonilla	109,71 (38,2%)	67,79L/s (61,8%)	100%
		51,92L/hab/día	
Ancla	44,53 (38,2%)	72,07L/s (61,8%)	100%
		128,47L/hab/día	
Amarillos	57,55 (38,2%)	93,15L/s (61,8%)	100%
		260,29L/hab/día	
Total	288,09 (37%)	490,21L/s (63%)	212.549 (63,9%)

Tabla 41: Vulnerabilidad de la distribución de agua potable en la ciudad de Antofagasta a amenaza de tsunamis

Fuente: Elaboración propia en base a Aguas Antofagasta (2017), CEPIS (2000), SERNAGEOMIN (2014) y SISS (2011c; 2017)

En cuanto a los sectores de distribución, como lo detalla la Tabla 41 y el Anexo 19, los con suministro de agua de mar corresponden a los más impactados, como el Sector La Chimba, ya que el agua desalada es su única fuente de abastecimiento hídrico. Por su parte, los sectores abastecidos a partir del uso de aguas de mezcla podrían suplir hasta en un 61,8% su capacidad con agua de cordillera, impactando parcialmente a la totalidad de los habitantes de estos sectores al reducir el caudal

suministrado en un 38,2%. Cabe destacar que los tsunamis no representan una amenaza para el abastecimiento de los sectores con suministro de agua de cordillera.

9.1.3. Amenaza de remociones en masa

La amenaza que suscitan los fenómenos de remociones en masa, detallada en la Tabla 42 y en el Anexo 19, y espacializada en la Cartografía 13, implica que las 3 principales captaciones de Toconce, Lequena y Quinchamale, tengan parte de sus respectivas aducciones en suelos con alto nivel de exposición a la amenaza, oscilando entre 0,5Km y 2Km, equivalentes hasta un 2,2% de sus respectivas longitudes. Estas captaciones representan el 86,4% de la capacidad de captación de aguas de

	Componente	Impacto	Cap. remanente	Ind Vuln
Prod.	Captaciones	1.586L/s (31,7%)	3.422L/s (68,3%)	0,317
		3,61Km (1,2%)	19,4Km (6,66%)	0,933
	Aducciones	610L/s (13,3%)	3.972L/s (86,7%)	0,133
		0,24Km (0,11%)	217,39Km (49,9%)	0,501
	Totales	317L/s (17,1%)	1533L/s (82,9%)	0,171
Distr.	Conducciones	14,16Km (26,4%)	39,42Km (73,6%)	0,264
	Estanques	13.000m3 (21,8%)	46.696m3 (78,2%)	0,218
	PEAP	150L/s (14%)	920L/s (86%)	0,140

Tabla 42: Vulnerabilidad de infraestructura de abastecimiento hídrico de la ciudad de Antofagasta a amenaza de remociones en masa

Fuente: Elaboración propia en base a Aguas Antofagasta (2017), CEPIS (2000), Lara (2007), SERNAGEOMIN (2003; 2014), SISS (2017) y SRTM (2000)

cordillera y poco más del 30% de la capacidad total de captación del sistema de abastecimiento, por lo que la capacidad remanente del componente es de un 68,3%, constituido principalmente por la planta desaladora, haciendo que el índice de vulnerabilidad de las captaciones sea de 0,317. Por su parte, de las aducciones de agua cruda, solo la VACA tiene una pequeña parte de su extensión sobre suelos de alto nivel de amenaza, equivalente al 0,1% de su tubería, y su vulnerabilidad implica que cerca de la mitad de la extensión de este componente esté amenazado por remociones en masa, mientras que en capacidad representa cerca del 13% del total de caudal. En este sentido, la capacidad remanente del componente sería de un 86,7%, principalmente por la permanencia de la planta desaladora como fuente, por lo que su indicador de vulnerabilidad sería de 0,133.

En cuanto a la distribución, todas las conducciones de agua potable tienen parte de su extensión expuesta a remociones en masa, representando el 26,4% del total de ellas, distribuida principalmente en las Alimentadoras Norte y Sur con cerca del 80% y 25% de su longitud expuestas. En este sentido, la capacidad remanente sería el 73,6% de la extensión que no se encuentra en zonas

altamente amenazadas, por lo que el índice de vulnerabilidad de este componente ascendería a 0,264, aunque cabe destacar que toda la red de conducciones de agua potable estaría expuesta al encontrarse parte de su infraestructura comprometida. A su vez, de los estanques de distribución, solo los estanques Bonilla y su PEAP, Balmaceda y Prat se encuentran en zonas de amenaza de remoción en masa, representando el 21,3% de la capacidad de almacenamiento de agua de mezcla y el 34,9% de la de cordillera, por lo que cerca del 22% de la capacidad total de almacenamiento se encuentra comprometida, permaneciendo entonces una capacidad remanente del 78,2% atribuido principalmente a aguas de mezcla, y significando un indicador de vulnerabilidad de 0,218 para este componente. Finalmente, como la PEAP de los Estanques Bonilla es la única vulnerable de este componente, el remanente corresponde al 86% de su capacidad total, por lo que el indicador de vulnerabilidad solo asciende a 0,140.

Sectores	Impacto	Cap. Rem. (Km)	Pob. Impactada
La Chimba	0,83Km (1,4%)	56,54 (98,6%)	295 (1,4%)
Bonilla	100%	0%	
Balmaceda	100%	0%	100%
Prat	100%	0%	
El Salto	0,88Km (4%)	20,94 (96%)	420 (4%)
Centro	12,29Km (15,9%)	65,05 (84,1%)	6.348 (15,9%)
A.Gran Vía	1,29Km (28,2%)	3,29 (71,8%)	417 (28,2%)
Amarillos	9,55Km (14,2%)	57,54 (85,8%)	4.401 (14,2%)
Indepen.	0,89Km (4,7%)	17,95 (95,3%)	257 (4,7%)
Sur	5,72Km (10,1%)	51,19 (89,9%)	1.153 (10,1%)
Totales	254,8L/s (32,7%)	535,5L/s (67,3%)	177.600 (53,4%)

Tabla 43: Vulnerabilidad de la distribución de agua potable en la ciudad de Antofagasta a amenaza de remociones en masa

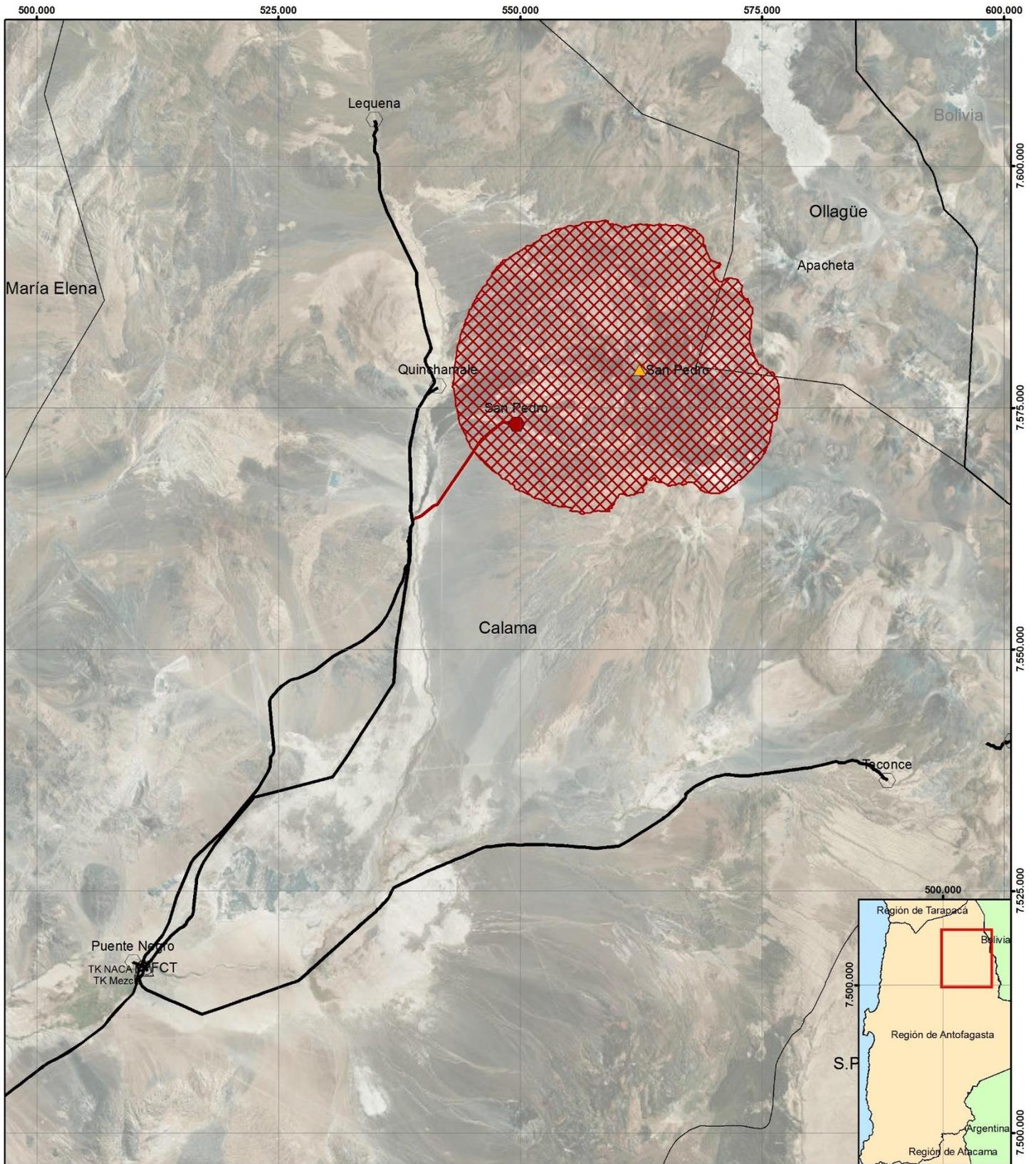
Fuente: Elaboración propia en base a Aguas Antofagasta (2017), CEPIS (2000), Lara (2007), SERNAGEOMIN (2003; 2014), SISS (2011c; 2017) y SRTM (2000)

Para el suministro de aguas en los diferentes sectores, como se detalla en la Tabla 43 y en el Anexo 19, y considerando la exposición de la infraestructura de abastecimiento hídrico, aquellos sin capacidad remanente es debido a la exposición de sus estanques o infraestructura asociada a ellos, como lo son los sectores de Bonilla, Balmaceda y Prat, mientras que el resto se encuentra expuesto en función del porcentaje de su red de distribución amenazado por remociones en masa. Entre estos destacan los sectores de Centro, Amarillos y Sur, con capacidades remanentes que oscilan entre el 84%

y 90%, y los sectores La Chimba, El Salto e Independencia superan el 95%, por lo que la población afectada oscila entre un 4% y un 15% en los sectores mencionados, con el Sector Alto Gran Vía alcanzando un 28% de impacto en su red de distribución y sus habitantes. Cabe señalar que el Sector Ancla no presenta vulnerabilidad a las remociones en masa ya que su infraestructura no se encuentra expuesta a esta amenaza.

9.1.4. Amenaza volcánica

Para el caso de las amenazas volcánicas, como se muestra en la Cartografía 14 y se detalla en el Anexo 19, la única infraestructura que se encuentra en zona de alta amenaza es la Captación San Pedro y el 34% de su aducción, por lo que la capacidad remanente de captación del sistema de abastecimiento hídrico sería del 98% y, por lo tanto, el indicador de vulnerabilidad del componente es de 0,020. Así, considerando el bajo aporte que significa esta captación para el sistema de producción de agua de cordillera, y que el déficit se repartiría entre todos los consumidores del agua captada en esta fuente, es que el impacto de perder esta captación, tanto en la producción como en la distribución sería mínimo, y compensable con el caudal producido por la Planta Desaladora.



Leyenda

△ PTAP	Amenaza Volcánica	Infra. Exp.
○ Captaciones	Volcanes por Amenaza	● Captaciones
⊙ Estanques	▲ Muy Alta	— Aducciones
— Conducciones	▲ Moderada	
	▨ Flujo de lavas, lahares y piroclastos	

0 2,5 5 10 15 20 25 Km

N

Proyección UTM
Datum WGS84
Huso 19S
Escala
1:500.000

Cartografía 14: Impacto de la amenaza volcánica en la infraestructura de abastecimiento hídrico de la ciudad de Antofagasta
Fuente: Elaboración propia en base a ONEMI (2012) y SISS (2017)

9.1.5. Amenaza del Invierno Altiplánico

El impacto del Invierno Altiplánico sobre el sistema de abastecimiento hídrico de la ciudad de Antofagasta se asocia únicamente a las fuentes de aguas de cordillera. De esta manera, tal como se observa en la Cartografía 15 y se detalla en el Anexo 19, las captaciones de Toconce y Hojalar se encuentran sobre algunas de las mayores isoyetas de precipitaciones máximas diarias, entre los 38mm y 40mm, reduciéndose a medida que se avanza en su aducción asociada. Por su parte, las captaciones de Quinchamale y San Pedro se encuentran sobre la isoyeta de 20mm de precipitación máxima diaria, mientras que Lequena lo hace en los 26mm de precipitación máxima diaria. La infraestructura asociada a las captaciones alcanza la isoyeta de entre 6mm y 8mm de precipitación máxima diaria en las instalaciones ubicadas en Calama, desde donde se reduce gradualmente a través del trazado de las Aducciones Calama Antofagasta. Si bien no es posible determinar directamente el impacto de las precipitaciones sobre el abastecimiento hídrico, ya que se aplican a la ocurrencia de otros eventos que pueden comprometer el suministro, el efecto sobre las fuentes de agua de cordillera que tendría el Invierno Altiplánico se evidencia claramente en la distribución de la infraestructura en las zonas expuestas a remociones en masa, asociadas en su génesis a las precipitaciones, y en el aumento de la turbulencia de las fuentes de abastecimiento, complicando de esta manera la continuidad y calidad del suministro de esta fuente. El fenómeno del Invierno Altiplánico es un elemento considerado por Aguas Antofagasta en sus planes y programas de desarrollo y de emergencia debido a sus impactos en la infraestructura localizada en su área de influencia, principalmente la destinada a la captación de fuentes de agua de cordillera (Aguas Antofagasta, 2011b; 2015). En este sentido, la empresa sanitaria debe enfrentar periódicamente emergencias generadas por pérdidas de infraestructura de abastecimiento hídrico, especialmente de las transmisiones de agua desde las captaciones provocadas por remociones en masa, siendo así uno de los principales factores de riesgo consignados por la empresa (Aguas Antofagasta, 2012). Así, es posible señalar que la seguridad hídrica de las fuentes de abastecimiento de cordillera depende en gran parte de la magnitud de los impactos asociados al Invierno Altiplánico.

9.1.6. Amenaza del cambio climático

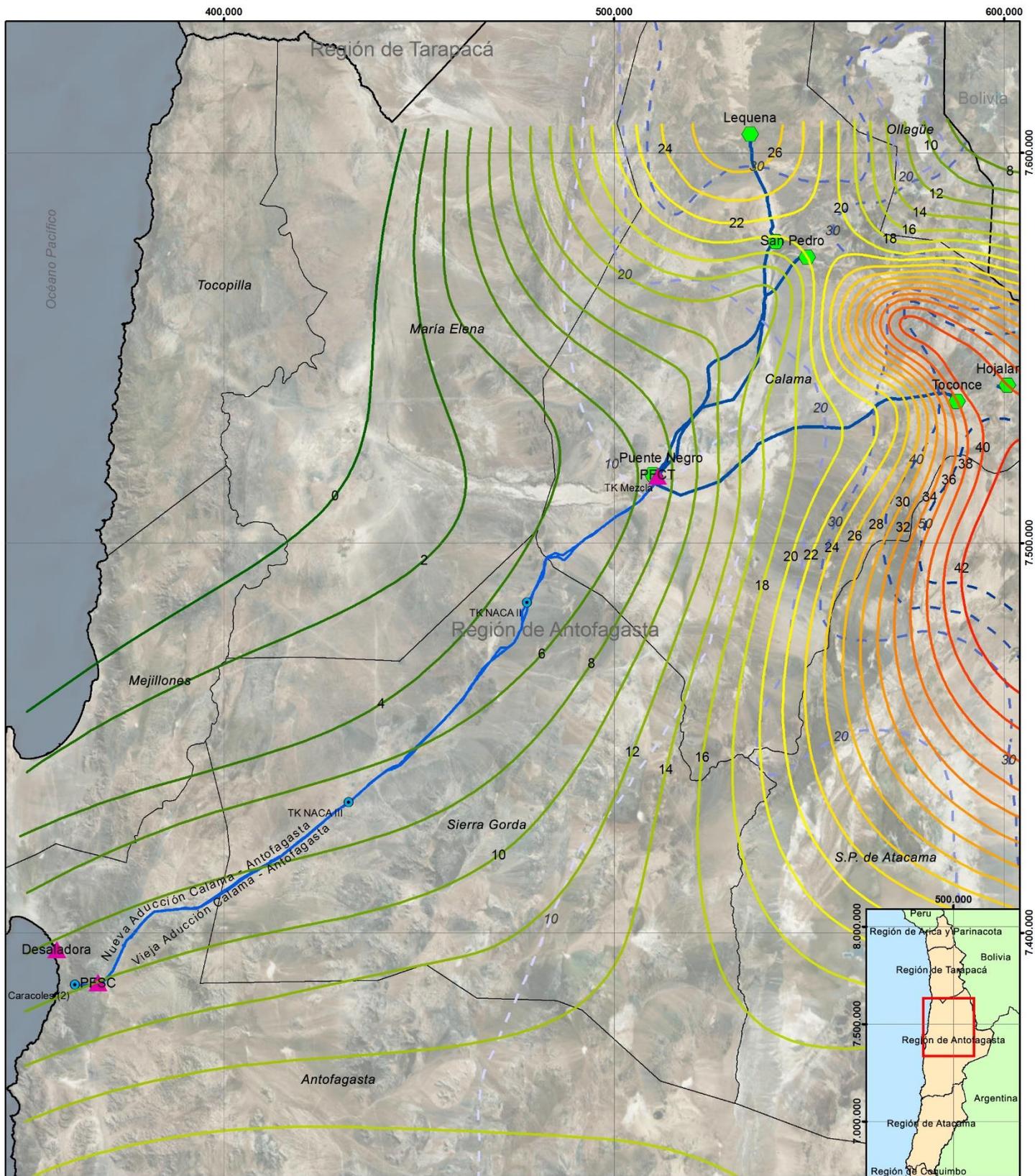
Considerando los 3 escenarios de cambio climático propuestos para los periodos 2011-2030 y 2031-2050 (Rojas, 2012) y sus impactos sobre las dos subcuencas desde donde se extrae el agua de cordillera, como se detalla en la Tabla 44 y en el Anexo 19, en el escenario

Componente	Periodo	Imp. Máx. (L/s)	Cap. Rem. (L/s)	Ind Vul
Producción - Captaciones	2011-2030	421,87 (13,7%)	2.656,41 (86,3%)	0,137
	2031-2050	737,77 (24%)	2.340,51 (76%)	0,240
Totales	2011-2030	137 (7,4%)	1.713 (92,6%)	0,074
	2031-2050	240 (13%)	1.610 (87%)	0,130

Tabla 44: Vulnerabilidad de infraestructura de abastecimiento hídrico de la ciudad de Antofagasta a amenaza del cambio climático

Fuente: Elaboración propia en base a Aguas Antofagasta (2017), CEPIS (2000), DGA (2014), Rojas (2012) y SISS (2017)

más favorable para el primer periodo, que considera el aumento en 1,1°C de la temperatura y la reducción de las precipitaciones en un 1,6%, implicarían una reducción del 29,2% del caudal de escorrentía de la Subcuenca del Río Loa Alto, desde donde extraen agua las captaciones de Toconce, Lequena, Quinchamale y San Pedro, y de un 46,7% para la Subcuenca del Río Loa Intermedio, en donde se emplaza la Captación Puente Negro. Los otros dos escenarios más desfavorables presentan los mismos valores entre sí para el periodo 2011-2030, con una reducción de un 32,1% en el caudal de escorrentía para el primer grupo de captaciones, y en un 51,2% para la Captación Puente Negro. De esta manera, para el segundo periodo y en el escenario más favorable propuestos, se estima una



Leyenda

- Torres (2016)
- - - DGA (1991)
- ▲ PTAP
- Captaciones
- Aducciones

0 10 20 40 60 Km

N

Proyección UTM
Datum WGS84
Huso 19S
Escala
1:1.250.000

fau
UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE ARQUITECTURA Y URBANISMO
Escuela de Pregrado
Departamento de Geografía

Cartografía 15: Impacto del invierno altiplánico en la infraestructura de abastecimiento hídrico de la ciudad de Antofagasta
Fuente: Elaboración propia en base a DGA (1991), SISS (2017) y Torres (2016)

reducción del caudal de escorrentía del 43,8% respecto a la disponibilidad actual para la Subcuenca del Río Loa Alto, y de un 69,8% en la Subcuenca Intermedia del mismo río, mientras que los escenarios intermedio y más desfavorable contemplan una reducción del 53% y 56,1% respectivamente respecto del caudal de escorrentía actual de la primera subcuenca, y de un 84,4% y 89,3% para los mismos escenarios en la subcuenca que abastece la Captación Puente Negro.

Según lo anterior, y considerando que la condición de la Captación San Pedro como fuente no natural de abastecimiento la mantendría al margen del impacto del cambio climático en la disponibilidad hídrica, el impacto máximo esperado sobre el caudal de escorrentía para el primer periodo equivale al 30,6% de la capacidad de cordillera, y a cerca del 14% de la capacidad total de captación, mientras que para el segundo periodo propuesto y en el escenario más desfavorable, la reducción del caudal de escorrentía reduciría en un 53,5% el caudal captado en la cordillera y en un 24% la capacidad total de captación del sistema de abastecimiento de aguas. Para ambos periodos y en los escenarios más desfavorables, la capacidad remanente conserva principalmente el caudal aportado por la Planta Desaladora de Antofagasta, pudiendo captar hasta el 85,2% de la capacidad total del primero, y hasta el 74,2% de la capacidad del componente en el segundo periodo, por lo que los indicadores de vulnerabilidad para las captaciones de agua van desde un 0,148 para el periodo 2011-2030, hasta un 0,258 para el periodo 2031-2050.

Sectores	Imp. Máx. (L/s)		Capacidad Remanente		Pobl. Imp
	2011-2030 (32,7%)	2031-2050 (57,2%)	2011-2030 (67,3%)	2031-2050 (42,8%)	
Balmac.	9,03	15,79	18,57L/s	11,81L/s	100%
			81,76L/hab/día	52L/hab/día	
Prat	16,25	28,43	33,45L/s	21,27L/s	
			90,65L/hab/día	57,65L/hab/día	
El Salto	4,97	8,69	10,23L/s	6,51L/s	
			84,89L/hab/día	53,98L/hab/día	
Centro	25,11	43,93	51,69L/s	32,87L/s	
			111,8L/hab/día	71,1L/hab/día	
A. Gran Vía	1,60	2,80	3,3L/s	2,1L/s	
			192,51L/hab/día	122,43L/hab/día	
Indepen.	11,05	19,33	22,75L/s	14,47L/s	
			361,88L/hab/día	230,14L/hab/día	
Sur	16,09	28,14	33,11L/s	21,06L/s	
			249,44L/hab/día	158,63L/hab/día	
Total	84,1 (10,8%)	147,11 (18,9%)	694,2 (89,2%)	631,19 (81,1%)	120.247 (36,1%)

Tabla 45: Vulnerabilidad de la distribución de agua potable en la ciudad de Antofagasta a amenaza de cambio climático

Fuente: Elaboración propia en base a Aguas Antofagasta (2017), CEPIS (2000), DGA (2014), Rojas (2012) y SISS (2011c; 2017)

Así, el impacto del cambio climático en la distribución y suministro de aguas a la ciudad de Antofagasta, detallado en la Tabla 45 y en el Anexo 19, se refleja sólo en los sectores con suministro únicamente con aguas de cordillera, ya que los sectores con aguas de mezcla pueden sustituirlo por agua de mar. A su vez, al no ser una amenaza que suscite emergencias o con impacto inmediato en el suministro, no se asume la premisa de la capacidad de la Planta Desaladora para abastecer toda la ciudad de

Antofagasta, al menos que a situación requiriera de una variación en los flujos del agua potable, abasteciendo con agua desalada a sectores que tradicionalmente reciben agua de cordillera. Mencionado esto, se espera un impacto parcial sobre toda la población abastecida solo con aguas de cordillera al reducir el suministro entre un 29,8% y un 32,7% para el primer periodo, y entre un 44,7% y un 57,2% para el segundo periodo respecto a la capacidad actual en dichos sectores.

9.1.7. Amenaza de accidentes

La vulnerabilidad del sistema de abastecimiento, asociada a accidentes que comprometan el suministro hídrico, comprende los cortes de agua potable registrados a causa de la acción de terceros y la continuidad asociada a ellos, por lo que solo se evaluó su impacto en términos de la distribución de agua potable en la ciudad. En este sentido, como se muestra en la Tabla 46 y se detalla en el Anexo 19, para el periodo 2011-2014 se registraron 195 cortes por accidentes, con una duración media de 4:21 horas e impactando en promedio a poco más de 1.200 clientes por evento, equivalentes al 1,5% del total de la ciudad, observándose una marcada concentración en los sectores de Bonilla y Ancla, con cerca de 45 eventos cada uno, seguidos por los sectores Amarillos y Centro, que rondan los 20 cortes respectivamente. Por su parte, los sectores con mayor continuidad y, por lo tanto, con mayor capacidad remanente de abastecimiento, corresponden a Prat, El Salto, Alto Gran Vía y Sur, todos muy cercanos al valor máximo para el indicador de continuidad del suministro. Adicionalmente, los sectores de Alto Gran Vía e Independencia son los con mayor porcentaje de clientes afectados en promedio por corte, ambos por sobre el 90%, y mientras que la Chimba y Balmaceda rondan el 40% de población impactada, el resto de los sectores no sobrepasa el 25%, destacándose Bonilla y Ancla al tener promedios de clientes impactados por evento menores al 10%.

Sectores	Impacto		Ind. Cont.	Pobl. Imp. (Clientes)
	Cortes	Durac.		
La Chimba	9	4:52	0,996	2.081 (41%)
Bonilla	47	6:11	0,998	1.224 (4,4%)
Balmaceda	9	4:25	0,996	1.985 (40,6%)
Prat	14	3:21	0,999	952 (12%)
El Salto	9	3:04	0,999	367 (14,2%)
Ancla	45	3:24	0,997	940 (7,8%)
Centro	23	3:57	0,998	1.222 (12,3%)
A. Gran Vía	1	3:20	0,999	100%
Amarillos	20	4:13	0,997	1.844 (24%)
Indepen.	10	4:43	0,993	1.236 (91,4%)
Sur	8	3:35	0,999	722 (25,3%)
Total/Prom.	195	4:21	0,998	1.215 (1,5%)

Tabla 46: Vulnerabilidad de la distribución de agua potable en la ciudad de Antofagasta a amenaza de accidentes
Fuente: Elaboración propia en base a Aguas Antofagasta (2017), CEPIS (2000) y SISS (2011c; 2011d; 2015; 2017)

9.1.8. Amenaza de contaminación de fuentes

Si bien es complejo determinar el impacto absoluto de la contaminación debido a la variedad de elementos que la constituyen como amenaza, si es posible deslumbrar algunos de sus efectos sobre el abastecimiento hídrico de Antofagasta mediante un análisis cualitativo del impacto sobre la continuidad y calidad del agua potable según las diferentes fuentes de abastecimiento y de contaminación identificadas. En las fuentes de cordillera, la contaminación producto de la actividad minera desarrollada en las cercanías de las fuentes, sumada a la presencia natural de elementos nocivos para la salud en los cursos de agua explotados por la empresa sanitaria, han derivado en que cerca de un tercio de la población regional abastecida por Aguas Antofagasta sea afectada por altos niveles de turbiedad y la concentración de sulfatos, hierro y arsénico en el suministro hídrico (Timeline Antofagasta, 16-02-2016), esto pese a que la empresa sanitaria asegura que posee la capacidad de abatir la presencia de estos elementos en el agua potable (Maino & Recabarren, 2011). Sin embargo, una alta turbiedad en las fuentes de agua de cordillera, asociada principalmente a precipitaciones, podría limitar la capacidad de producción de esta fuente. Por otra parte, las fuentes de mar, aunque se encuentran expuestas a la descarga de riles y derrames de petróleo, la captación de agua es realizada por la bocatoma situada a 19m bajo el nivel del mar y a 4m sobre el lecho marino, lo que reduce el riesgo de absorción de petróleo u otros hidrocarburos flotantes que puedan afectar las operaciones de la Planta Desaladora. Además, pese a que la empresa declara que tras los

eventos de marea roja y Bloom algal que han comprometido la capacidad de producción de agua desalada, las mejoras implementadas han hecho que no signifiquen una amenaza (Cerda, 2012), también se considera prioritaria entre las con impacto sobre el abastecimiento hídrico de la ciudad.

De esta manera, es posible señalar que la contaminación de las fuentes de agua puede impactar de manera total o parcial en el suministro hídrico. Un impacto total implica que el evento de contaminación impediría la producción de agua, como lo han sido la marea roja en las fuentes de mar y la turbiedad en las de cordillera, mientras que el impacto parcial compromete una parte de la capacidad de producción o afecta en la calidad del suministro, como la presencia de contaminantes en las fuentes de cordillera y de residuos e hidrocarburos en las fuentes de mar. A su vez, es posible relacionar el tipo de evento con su impacto, ya que mientras los eventos extremos, como el Invierno Altiplánico y la marea roja, ocurren de forma discontinua en el tiempo, pero generan un impacto total, la presencia de contaminantes en ambas fuentes suele ser permanente, por lo que su impacto, aunque parcial, también sería continuo. Según lo anterior, no es posible predecir la ocurrencia de cortes de suministro derivados de la contaminación sin asociarlo necesariamente a otras amenazas o eventos, aunque si se pueden analizar los efectos que tiene la contaminación utilizando la evaluación de parámetros de calidad del agua suministrada a la ciudad de Antofagasta.

9.1.9. Amenaza geopolítica

Dadas las condiciones que presenta el conflicto entre los gobiernos chileno y boliviano suscitado por el uso de las aguas del Río Silala expuestas anteriormente, el impacto previsto para el sistema de abastecimiento corresponde a una disminución del caudal del Río San Pedro, del que es afluente el curso en litigio y desde donde nace la captación del mismo nombre. Sin embargo, debido a la condición no natural de esta captación, ya que las aguas son entregadas a la empresa sanitaria por parte de CODELCO (SISS, 2006), por lo que corresponden a un aporte de caudal permanente y que no depende de la disponibilidad de aguas en las fuentes citadas, un resultado desfavorable para Chile no impactaría en el aporte de esta fuente al sistema de abastecimiento. Por otra parte, la consecuente reducción del caudal del Río San Pedro como afluente del Río Loa podría impactar al reducir su caudal disponible. Pese a ello, no es posible determinar la distribución que tendría la reducción entre todos los usuarios que extraen agua del Río Loa, entre los que se encuentra la empresa sanitaria, por lo que la problemática geopolítica no representa una real amenaza al suministro hídrico de la ciudad de Antofagasta. Adicionalmente, si bien no es posible predecir la decisión que adoptará la Corte Internacional de La Haya frente a la demanda en curso, el Gobierno de Chile expresa confianza en los resultados del litigio, argumentando que la condición de río internacional del Silala existe hace más de 80 años y que las autoridades bolivianas reconocieron dicha condición por más de 100 años, cambiando de parecer a partir de 1999 (Mora, 03-07-2017), mientras que el Gobierno Boliviano trabaja en la presentación de la contramemoria de la demanda, sosteniendo el argumento de que los cursos de agua fueron desviados por las autoridades chilenas para su explotación privada y por la que busca exigir una compensación económica, cuyo plazo vence en julio del presente año (Álvarez, 03-07-2017).

9.1.10. Amenaza de cortes eléctricos

La amenaza que supone un corte en el suministro de energía eléctrica para el sistema de abastecimiento de aguas se asocia a la inexistencia de equipos electrógenos de emergencia o a la incapacidad de estos para asegurar el suministro de aguas. De esta manera, según se observa en la Tabla 47 y se detalla en el Anexo 19, las únicas captaciones de agua que no cuentan con generadores

Componente	Impacto (L/s)	Cap. Rem. (L/s)	Ind Vul	
Prod.	Captaciones	250 (5%)	4.758 (95%)	0,050
	PTAP	840,42 (45,4%)	1.009,58 (54,6%)	0,454
	Totales	890,42 (48,1%)	959,58 (51,9%)	0,481
Distr. - PEAP	1.070 (100%)	0%	1	

Tabla 47: Vulnerabilidad de infraestructura de abastecimiento hídrico de la ciudad de Antofagasta a amenaza de cortes eléctricos
Fuente: Elaboración propia en base a Aguas Antofagasta (2017) CEPIS (2000) y SISS (2006; 2011c; 2017)

eléctricos son las de San Pedro y Puente Negro, comprometiendo el 13,6% de la capacidad de captación de aguas de cordillera y cerca del 5% de la capacidad total de captación, por lo que la capacidad remanente corresponde al 95%, compuesto principalmente por la Bocatoma de la Planta Desaladora, y el indicador de vulnerabilidad del componente sería de solo 0,050. Esta situación cambia radicalmente al analizar el impacto sobre las PTAP, ya que mientras las PFSC cuentan con generadores eléctricos capaces de abastecer su demanda energética para el proceso de potabilización, la Planta Desaladora cuenta únicamente con un equipo de emergencia de 250Kva con el que se podrían producir hasta 9,58L/s de caudal considerando el costo energético del proceso de desalación, lo que equivale al 0,1% de la capacidad total de la planta, por lo que su uso debe estar destinado a suministrar energía eléctrica hacia otras funciones del recinto. El caudal producido sería insuficiente para abastecer la demanda de agua desalada de la ciudad, afectando a todos los sectores suministrados con esta fuente. De esta manera, la capacidad remanente sería de un 54,6%, correspondientes a las plantas de cordillera, por lo que el índice de vulnerabilidad del componente asciende a 0,454.

Para la etapa de distribución, no se encontraron generadores eléctricos asociados a las PEAP haciéndolas a todas vulnerables, por lo que el componente no posee capacidad remanente y el índice de vulnerabilidad es de 1, afectando a todos los sectores que dependen de este tipo de infraestructura. De esta manera, y según lo anterior, todos los sectores con suministro de agua desalada se encontrarían comprometidos frente a cortes de energía eléctrica debido a la incapacidad de la Planta Desaladora de suministrar el recurso a la ciudad de Antofagasta. Adicionalmente, los sectores de La Chimba y Bonilla, al tener expuestas sus PEAP, no poseen capacidad remanente de abastecimiento, impactando totalmente a sus habitantes. Por su parte, los sectores Amarillos y Ancla, con fuentes tradicionalmente de mezcla, podrían abastecer parte de su demanda con aguas de cordillera, conservando como remanente hasta el 61,8% de su capacidad, por lo que la toda la población de estos sectores estaría parcialmente afectada al reducir su suministro de agua potable en un 38,2%.

9.1.11. Amenaza de envejecimiento de la infraestructura

Con respecto a la amenaza que significa el envejecimiento de la infraestructura que, dado el material o tipo de infraestructura y su antigüedad, determinan si se encuentra vigente o si ha cumplido su vida útil, y tal como se detalla en la Tabla 48 y en el Anexo 19, y según se observa en la Cartografía 16, se obtiene que en el caso de las captaciones de cordillera, las de Toconce, Lequena y Quinchamale, y casi la totalidad de sus respectivas aducciones, además del 92,6% de la aducción de la Captación San Pedro, son vulnerables por el envejecimiento de su infraestructura, lo que impacta en cerca del 92% de la capacidad de captación de cordillera y en más del 30% de la capacidad total de captación, además del 97,5% del total de las aducciones asociadas a las captaciones del sistema de abastecimiento. De esta manera la capacidad remanente es del 66,2%, atribuido principalmente a la planta desaladora, y el indicador de vulnerabilidad es de 0,337. Este último, aplicado a las aducciones de los sistemas de captaciones, indicaría un valor de 0,993 para la vulnerabilidad de las

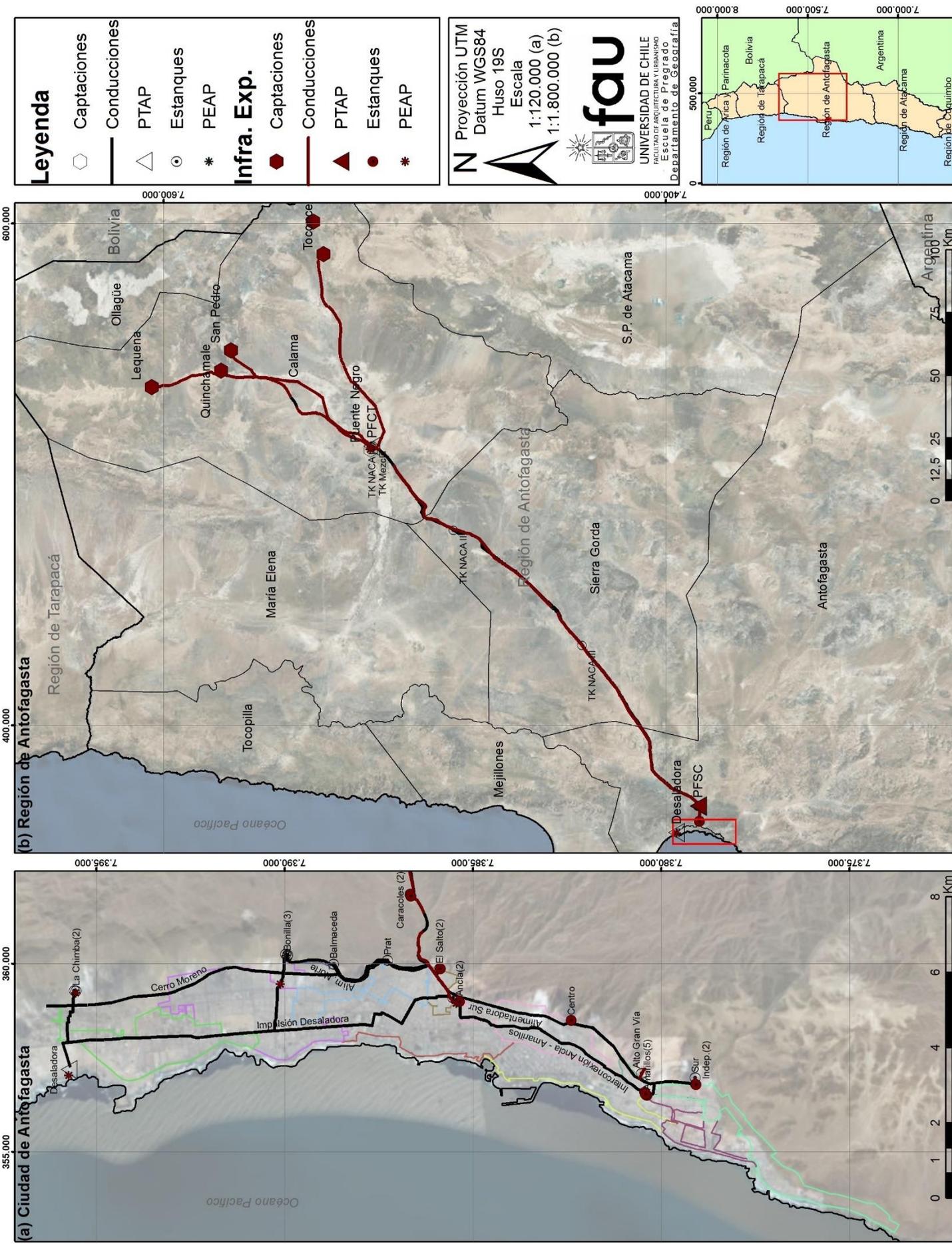
tuberías, debido principalmente a la predominancia de las aducciones de aguas de cordillera. Para las aducciones de agua cruda, la única comprometida es la VACA al tener más del 90% de su extensión con su vida útil cumplida, y tal como ocurre con la amenaza de remociones en masa, implica que cerca de la mitad de la extensión y del 13% de la capacidad total del componente se encuentren expuestos, por lo que la capacidad remanente y el indicador de vulnerabilidad de las aducciones serían del 86,7% y 0,133 respectivamente. Por su parte, de todas las PTAP del sistema de abastecimiento, sólo la PFASC se encuentra obsoleta, representando la mitad de la capacidad de potabilización de agua de cordillera y el 27% de la capacidad total de potabilización, dejando un remanente del 73% de su capacidad, lo que significa un indicador de vulnerabilidad de 0,270 en las PTAP. A su vez, los Estanques Caracoles, que en conjunto representan cerca del 40% de la capacidad total de los estanques de producción y el 93,3% de la capacidad de almacenamiento de agua potabilizada, también se encuentran con su vida útil cumplida, dejando una capacidad remanente del 60,8% y un indicador de vulnerabilidad para el componente de 0,392.

	Componente	Impacto	Cap. remanente	Ind Vul
Producción	Captaciones	1.686L/s (33,7%)	3.322L/s (66,2%)	0,337
		284,04Km (97,5%)	2,08Km (0,7%)	0,993
	Aducciones	610L/s (13,3%)	3.972L/s (86,7%)	0,133
		204,4Km (93,5%)	217,39Km (49,9%)	0,501
	PTAP	500L/s (27%)	1.350L/s (73%)	0,270
	Estanques	25.000m ³ (39,2%)	38.800m ³ (60,8%)	0,392
	PEAC	1.350L/s (29,2%)	3.272L/s (70,8%)	0,292
	Totales	668,5L/s (36,1%)	1.181,5L/s (63,9%)	0,361
Distri.	Conducciones	3,67Km (6,8%)	49,91Km (93,2%)	0,068
	Estanques	26.756m ³ (44,8%)	32.940m ³ (55,2%)	0,448
	PEAP	920L/s (86%)	150L/s (14%)	0,860

Tabla 48: Vulnerabilidad de infraestructura de abastecimiento hídrico de la ciudad de Antofagasta a amenaza de envejecimiento

Fuente: Elaboración propia en base a Aguas Antofagasta (2017), CEPIS (2000), SII (2002) y SISS (2011c, 2017)

A su vez, de las PEAC, se encuentra expuesta por envejecimiento la asociada a la Captación Puente Negro, por lo que todas las captaciones de agua de cordillera contarían con infraestructura con vida útil cumplida, comprometiendo la totalidad de la capacidad del componente para esta fuente. Adicionalmente presenta envejecimiento la PEAC de la primera impulsión de agua de mar de la planta desaladora, comprometiendo el 37,8% de la capacidad de impulsión de esta fuente y, en conjunto con la elevadora de Puente Negro, representan cerca del 30% de la capacidad de componente, por lo que la capacidad remanente sería del 70,8% y el indicador de vulnerabilidad sería de 0,292 para las PEAC del proceso de producción. En la etapa de distribución y el envejecimiento de la infraestructura destinada a ello, se obtiene que solo las Alimentadora Sur y la VACA Caracoles-Ancla de las conducciones de agua potable tienen tramos con su vida útil cumplida, con un 4,3% para la primera y un 83,6% para la segunda, sumando entre ambas 3,67Km de longitud expuesta por envejecimiento. En conjunto, representan cerca del 7% de la longitud total de las conducciones, por lo que la capacidad remanente del componente sería del 93,2%, mientras que su indicador de vulnerabilidad sería solo de 0,068. A su vez, 9 de los estanques, que en conjunto representan cerca del 45% del volumen total de los estanques de distribución de agua potable, se encuentran con su vida útil cumplida. Estos corresponden principalmente a abastecidos por aguas de mezcla, fuente que tiene amenazada el 53,3% de su capacidad de almacenamiento. La capacidad remanente sería entonces del 55,2%, principalmente representada por agua de mezcla, y en menor



Cartografía 16: Impacto de la amenaza de envejecimiento en la infraestructura de abastecimiento hídrico de la ciudad de Antofagasta
Fuente: Elaboración propia en base a SII (2002) y SISS (2017)

medida por agua de cordillera y de mar con porcentajes similares entre sí, generando así un indicador de vulnerabilidad para el componente de 0,448. Por último, en cuanto a las PEAP, las asociadas a las impulsiones de la desaladora y de Bonilla, y las de los Estanques La Chimba y Ancla, que en su conjunto representan cerca del 85% de la capacidad del componente, quedando como remanente solo la asociada a los Estanques Bonilla, que representa el 14% de la capacidad total, y otorgándole a las PEAP un indicador de vulnerabilidad de 0,860.

Sectores	Impacto	Cap. Remanente	Pob. Impactada
La Chimba	100%	0%	100%
Bonilla	107,39L/s (60,5%)	70,11L/s (39,5%)	100%
	36,86Km (22,1%)	53,7L/hab/día	
Balmac.	9,96L/s (36,1%)	17,64L/s (63,9%)	100%
	22,85Km (61,9%)	77,63L/hab/día	
Prat	17,94L/s (36,1%)	31,76L/s (63,9%)	100%
	39,69Km (66,7%)	86,07L/hab/día	
El Salto	12,42L/s (81,7%)	2,78L/s (18,29%)	100%
	16,17Km (74,1%)	23,07L/hab/día	
Ancla	100%	0%	
Centro	100%	0%	100%
Amarillos	100%	0%	
Indepen.	16,9L/s (50%)	10,8L/s (32%)	100%
	12,11Km (64,3%)	171,8L/hab/día	
Sur	17,76L/s (36,1%)	31,44L/s (63,9%)	100%
	8,24Km (14,5%)	236,84L/hab/día	
Total	602,77L/s (77,4%)	175,53L/s (22,6%)	331.316 (99,6%)

Tabla 49: Vulnerabilidad de la distribución de agua potable en la ciudad de Antofagasta a amenaza de envejecimiento

Fuente: Elaboración propia en base a Aguas Antofagasta (2017), CEPIS (2000), SII (2002) y SISS (2011c, 2017)

respectivamente, impactando de forma parcial a toda la población de los sectores al reducir su caudal suministrado a los porcentajes expresados para cada sector. Estos sectores además impactan totalmente a porcentajes de población similares a los de su red expuesta, oscilando entre un 55% y un 75% de los habitantes de cada sector. En el resto de los sectores, la exposición de la población depende de la vulnerabilidad de la red de distribución de sus sectores, siendo los de Balmaceda y Prat los con mayor porcentaje de su red con envejecimiento, ambos por sobre el 60%, mientras que el Sector Sur solo posee expuesto el 14,5% de su red de distribución, impactando a una cantidad similar de los habitantes de este sector. En términos generales, más de 300Km de tuberías, equivalentes al 45,9% del total de la red de distribución, ha superado su vida útil debido a su antigüedad. Adicionalmente, al estar expuesta la Alimentadora Sur, los 7 sectores abastecidos por ella verían afectado su suministro hídrico, por lo que, si bien el Sector Alto Gran Vía no presenta envejecimiento en su infraestructura de distribución, sería vulnerable en función de la capacidad de abastecerse desde la citada alimentadora como su única fuente de aguas, dependiendo de ella para un correcto suministro de agua potable a sus habitantes.

Con respecto al suministro de agua a los diferentes sectores de la ciudad, desglosados en la Tabla 49 y en el Anexo 19, La Chimba, Centro y Amarillos no cuentan con capacidad remanente al presentar obsolescencia en sus estanques e infraestructura asociada a ellos, mientras que Bonilla sólo conserva las aguas de cordillera como posible fuente de abastecimiento, impactando parcialmente a toda la población del sector al reducir su suministro hídrico a un 61,8% de capacidad remanente, y de manera total a cerca del 22% de la población por el envejecimiento de la red de distribución. Lo mismo ocurre en los sectores Ancla, Independencia y El Salto, los que al tener expuestos por envejecimiento solo uno de los estanques que los abastecen, conservan una capacidad remanente de 54,4%, 50% y 28,6%

9.1.12. Amenaza por materialidad

Los materiales utilizados en las tuberías del sistema de abastecimiento hídrico de Antofagasta varían según la etapa de producción y distribución y también en los sectores. Esto responde, en primera instancia, a las características de cada material que determinan su fiabilidad respecto al caudal de diseño, variando notablemente entre las aducciones del sistema de producción y las matrices de distribución, en complemento a la época de construcción y la disponibilidad de materiales en el momento en que fueron implementadas. Así, con respecto a la red de producción de agua potable, para el caso de las conducciones de agua de cordillera, tanto de las captaciones como de la VACA y NACA, las tuberías de hierro dúctil, acero revestido y acero negro presentan porcentajes similares en el total de aducciones, siendo este último material el principal en las aducciones asociadas a las captaciones de cordillera, mientras que de los otros dos se encuentran principalmente en la NACA y la VACA respectivamente. Los otros materiales presentes son el asbesto cemento y hormigón armado, correspondientes a la Aducción Hojalar y encontrados únicamente en ella.

En la ciudad de Antofagasta, según se detalla en la Tabla 50 y en el Anexo 19, el material predominante en la red de distribución es el asbesto cemento, considerado vulnerable por su baja resistencia mecánica y a la corrosión (Alonso, 2008) y como factor de riesgo asociado a la materialidad de las tuberías, representando más del 40% del total de la red y concentrado en los sectores Bonilla, Centro, Ancla y Prat, predominando en estos tres últimos y en Balmaceda, El Salto, Independencia y Amarillos, donde representan entre un 40% y un 70% de las redes de distribución de dichos sectores. A este

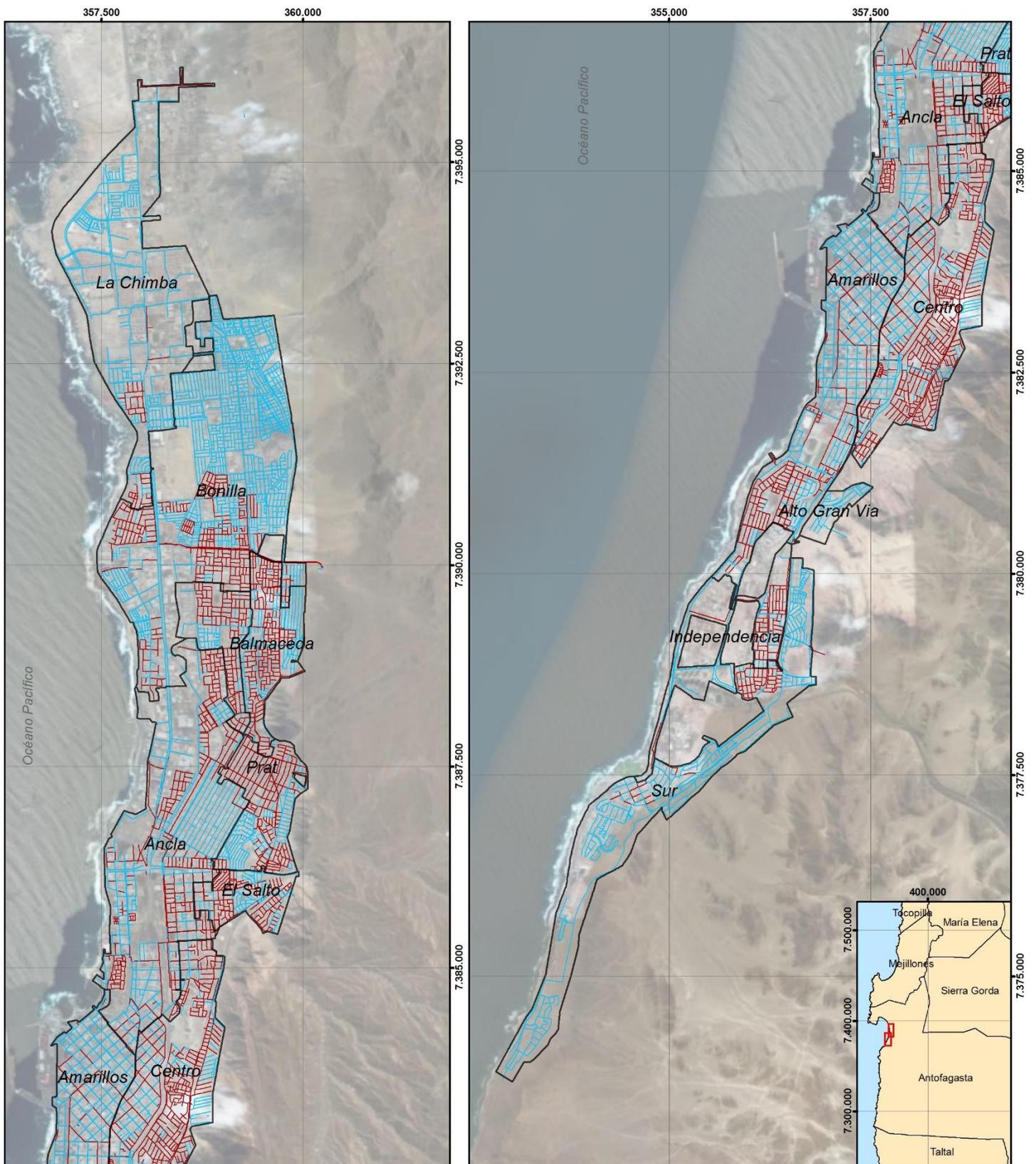
Sectores	Impacto (Km)	Cap. Rem. (Km)	Pobl. Impact.
La Chimba	7,81 (13,6%)	49,56 (86,4%)	2.769 (13,6%)
Bonilla	40,15 (24%)	126,91 (76%)	27.072 (24%)
Balmac.	23,78 (64,4%)	13,13 (35,6%)	12.641 (64,4%)
Prat	37,6 (63,2%)	21,87 (36,8%)	20.149 (63,2%)
El Salto	13,99 (64,1%)	7,83 (35,9%)	6.674 (64,1%)
Ancla	44,08 (48%)	47,8 (52%)	23.265 (48%)
Centro	55,39 (71,6%)	21,96 (28,4%)	28.601 (71,6%)
Amarillos	27,67 (41,2%)	39,42 (58,8%)	12.739 (41,2%)
Indepen.	10,03 (53,2%)	8,81 (46,8%)	2.889 (53,2%)
Sur	8,13 (14,3%)	48,78 (85,7%)	1.640 (14,3%)
Total	268,64 (40,7%)	390,65 (59,3%)	13.5448 (40,7%)

Tabla 50: Vulnerabilidad de la distribución de agua potable en la ciudad de Antofagasta a amenaza por materialidad

Fuente: Elaboración propia en base a Aguas Antofagasta (2017), Alonso (2008), CEPIS (2000), CONAGUA (2015) y SISS (2017)

material le siguen el PVC, con el 35% de la red de distribución de la ciudad, de las cuales cerca de la mitad de las tuberías se concentran en el Sector Bonilla y son también el material predominante en este sector. También es importante su presencia en los sectores La Chimba, Alto Gran Vía y Sur, en los cuales es el principal material de las tuberías, y para el caso del Sector Alto Gran Vía constituye casi el único, con más del 95% de su red. El tercer material con mayor presencia en la red de distribución es el polietileno de alta densidad, con el 18% del total de la red y concentrado en los sectores La Chimba, Bonilla y Ancla, aunque en ninguno es el material predominante. En la última categoría se agrupan las tuberías de acero negro, fierro fundido y hierro dúctil, que no representan un porcentaje importante para la ciudad ni sus sectores. La distribución del asbesto cemento y del resto de materiales en la red de agua potable de la ciudad se observa en la Cartografía 17.

A nivel mundial ha existido una evolución en la predominancia de distintos materiales asociados al periodo en que fueron construidos, ya que entre las décadas de 1950 y 1960 predominaba el hormigón y el asbesto cemento, siendo reemplazado desde la década de 1970 por el PVC y a partir de los '90 por el poliéster como materiales predominantes, derivando en que en el nuevo siglo sean



Leyenda

Red de Distribución

- Otros materiales
- Asbesto Cemento
- Zonas de Distribución

0 0,5 1 2 3 Km

N

Proyección UTM
Datum WGS84
Huso 19S
Escala
1:60.000

fau
UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE ARQUITECTURA Y URBANISMO
Escuela de Pregrado
Departamento de Geografía

Cartografía 17: Impacto de materialidad de tuberías en el abastecimiento hídrico de la ciudad de Antofagasta.
Fuente: Elaboración propia en base a Alonso (2008), CONAGUA (2015) y SISS (2017)

utilizadas mayormente tuberías de polietileno y polipropileno (CONAGUA, 2015). Esta situación, aunque con cierto desfase, se observa en el área de estudio, ya que tal como lo muestra el Gráfico 3, el asbesto cemento ha sido históricamente el principal material utilizado en la construcción de la red de distribución de agua potable de Antofagasta, siendo complementado con el PVC a partir de la década de 1980 y por el polietileno de alta densidad desde 1990 hasta la actualidad. A su vez, se evidencia que estos materiales han sido reemplazados consecutivamente entre sí, ya que la irrupción del PVC coincide con un descenso en uso de asbesto cemento en nuevas tuberías, al igual que con el polietileno de alta densidad respecto al PVC. Sin embargo, estos nuevos materiales no han logrado equiparar por sí mismos la cantidad de tuberías de asbesto cemento implementadas hasta el descenso en el uso de este material. Finalmente, y considerando la vida útil de 30 años definida para las tuberías de asbesto cemento, se define que gran parte de la red de distribución es vulnerable al estar construida con este material, en su mayoría hasta la década de 1980, pudiendo asociarse a los problemas de calidad del agua registrados en el área de estudio.

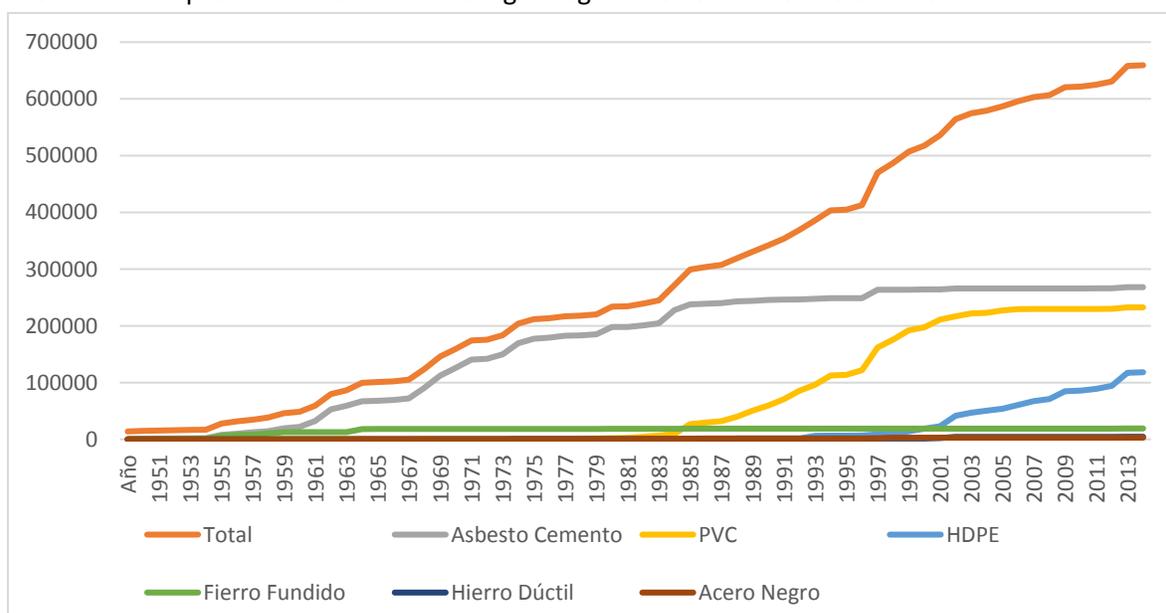


Gráfico 3: Evolución de materiales usados en la red de distribución de agua potable de Antofagasta
Fuente: Elaboración propia en base a SISS (2017)

9.1.13. Amenaza de golpe de ariete

	Componente	Impacto (L/s)	Cap. Rem. (L/s)	Ind Vul
Prod.	Captaciones	100 (2%)	4.908 (98%)	0,020
	Aducciones	610 (13,3%)	3.972 (86,7%)	0,133
	Total	20 (1,1%)	1.830 (98,9%)	0,011

Tabla 51: Vulnerabilidad de infraestructura de abastecimiento hídrico de la ciudad de Antofagasta a amenaza de golpe de ariete
Fuente: Elaboración propia en base a Aguas Antofagasta (2017), CEPIS (2000) y SISS (2006; 2011c; 2017)

Para el análisis del impacto de los eventos de golpes de ariete, se tomó como base la existencia de equipos y dispositivos amortiguadores para esta amenaza en las diferentes conducciones de agua del sistema de abastecimiento hídrico de Antofagasta, identificándose un total de 22 equipos amortiguadores de golpe de

ariete. En las aducciones de las captaciones de agua, los sistemas de Toconce y Quinchamale son los con mayor cantidad de equipos, con 4 y 3 respectivamente, mientras que Lequena, Puente Negro y la Bocatoma de la Plana Desaladora cuentan con un equipo cada una. De esta manera, como lo muestra la Tabla 51 y se detalla en el Anexo 19, solo la Captación San Pedro no cuenta con equipos de este tipo en su aducción, y su exposición implica una capacidad remanente de captación del 98%

y, por lo tanto, un indicador de vulnerabilidad de 0,020 para este componente. Por su parte, entre las conducciones de agua cruda, la NACA es la con mayor cantidad de equipos amortiguadores de golpes de ariete, sumando 10 a lo largo de su trazado, mientras que las dos Impulsiones de la Planta Desaladora poseen un equipo cada una, quedando expuesta solo la VACA al no poseer equipos de este tipo, y al igual que con las amenazas de remociones en masa y de envejecimiento de la infraestructura, implica un remanente de la mitad de la capacidad de cordillera y del 86,7% de la capacidad total del componente, haciendo que su indicador de vulnerabilidad sea de solo 0,133. Finalmente se destaca que no se encontraron registros sobre equipos amortiguadores de golpes de ariete en conducciones de agua potable.

9.1.14. Falla y rotura de tuberías

Las roturas y fallas en las tuberías en el sistema de abastecimiento hídrico surgen como consecuencia del impacto de los diferentes factores de riesgo interno considerados anteriormente, pudiendo analizarse de forma cuantitativa según la continuidad asociada a los cortes de suministro producidos por eventos de fallas en matrices, arranques y conexiones. Se identificaron 1.189 cortes para el periodo 2011-2014 atribuidos a esta causa, con una duración mediana de 3:01 horas y un impacto promedio por evento en 687 clientes, que representan el 0,8% del total de la ciudad. Como lo muestra la Tabla 52 y el Anexo 19, los sectores Bonilla y Centro son los que presentan mayor cantidad de cortes, registrando 234 eventos cada uno, seguidos por Prat y Ancla con 188 y 154 cortes de suministro respectivamente, mientras que

en el resto de los sectores, los eventos de cortes por rotura y falla de tuberías no superan los 100 para el periodo considerado, destacándose el Sector Alto Gran Vía con sólo 6 cortes de agua. De esta manera, la continuidad remanente del suministro hídrico es mayor en los sectores de Independencia y Alto Gran Vía, superando ambos los 0,995 para el indicador de continuidad, seguidos por Bonilla, Balmaceda y Ancla, cuyos indicadores de continuidad rondan los 0,990. Los sectores Prat, Centro y Amarillos son los con menor capacidad remanente de suministro, alzando indicadores cercanos al 0,985 cada uno. Respecto al impacto en los habitantes de los sectores, en Alto Gran Vía se registra el mayor promedio de clientes impactados, ascendiendo al 92% del total del sector, mientras que, en El Salto, Independencia y Sur, los cortes por rotura y falla en las tuberías impactan en promedio un 25% de los habitantes de cada sector. Finalmente, en los sectores Bonilla, Ancla y Centro, el impacto por esta amenaza abarca a menos del 5% de sus respectivas poblaciones.

Sector	Impacto		Ind. Cont.	Pobl. Imp (Clientes)
	Cortes	Durac.		
La Chimba	82	2:36	0,988	514 (10,1%)
Bonilla	234	2:38	0,990	1085 (3,9%)
Balmac.	81	3:13	0,990	600 (12,3%)
Prat	188	3:14	0,983	618 (7,8%)
El Salto	48	2:59	0,987	636 (24,5%)
Ancla	154	2:45	0,991	466 (3,9%)
Centro	234	3:15	0,985	473 (4,8%)
A. Gran Vía	6	2:20	0,996	339 (92%)
Amarillos	83	3:53	0,985	1144 (14,9%)
Indepen.	27	3:09	0,995	357 (26,4%)
Sur	52	2:42	0,988	689 (24,1%)
Total/Prom.	1189	3:01	0,988	686 (0,8%)

Tabla 52: Vulnerabilidad de distribución de agua potable en la ciudad de Antofagasta a amenaza de fallas de tuberías
Fuente: Elaboración propia en base a Aguas Antofagasta (2017), CEPIS (2000) y SISS (2011d; 2015; 2017)

9.1.15. Falla en equipos

Al igual que en las fallas y roturas de tuberías, las fallas en equipos son consecuencia del impacto de los diferentes factores de riesgo interno contemplados en la investigación, ya sea de forma individual o conjunta, abarcando dichas amenazas de forma general. Por otra parte, al ser abordada cuantitativamente según los cortes registrados en la ciudad únicamente bajo esta causa, solo representa una pequeña parte del total de cortes de suministro, por lo que en la evaluación de la amenaza de fallas en los equipos del sistema de abastecimiento se identifica solo un evento de este tipo en el Sector Bonilla, de 4:08 horas de duración y con un impacto sobre el 2,2% de los clientes del sector. De esta manera, la continuidad del suministro para el sector y la ciudad virtualmente no se vería impactada por la ocurrencia de fallas en los equipos de abastecimiento, por lo que no representa una amenaza significativa para el suministro hídrico de Antofagasta. Sin embargo, al ser consecuencia de otros factores de riesgo interno, sus impactos respectivos pueden también adicionarse al impacto de las fallas en equipos, haciéndolo más importante y contraponiéndose a lo obtenido en la continuidad según los cortes por esta causa.

9.2. Estimación de la vulnerabilidad física

Amenaza	Ind. Vul.	Pobl. Impactada
Sismos	0,541	303.216 (91,1%)
Sísmica de fallas	0,541	58.325 (17,5%)
Tsunami	0,459	212.549 (63,9%)
Remoc. en masa	0,171	177.600 (53,4%)
Volcánica	0,020	-
Inv. Altiplánico	0,541	-
Cambio climático	0,074-0,131	120.247 (36,1%)
Accidentes	-	4.879 (1,5%)
Cortes eléctricos	0,481	212.549 (63,9%)
Golpe ariete	0,011	-
Materialidad	0	135.448 (40,7%)
Envejecimiento	0,361	331.316 (99,6%)
Rotura tuberías	-	2.758 (0,8%)

Tabla 53: Vulnerabilidad operativa y población impactada por amenazas al sistema de abastecimiento hídrico

Fuente: Elaboración propia

El impacto que tienen sobre el sistema de abastecimiento hídrico de la ciudad de Antofagasta los diferentes factores de riesgo analizados en la investigación se traduce en los resultados de los indicadores de vulnerabilidad para cada componente implicado, cuyos efectos se manifiestan en la cantidad de población impactada por la ocurrencia de dichas amenazas. De esta manera, y según se observa en la Tabla 53, los eventos sísmicos y el Invierno Altiplánico son los con un mayor indicador de vulnerabilidad, equivalente a un impacto en más de la mitad de la capacidad del sistema, seguidos por los tsunamis y cortes eléctricos, y en menor medida por el envejecimiento de la infraestructura, mientras que el resto de las amenazas poseen un bajo índice de vulnerabilidad o no aplican para este criterio dada su naturaleza. A su vez, los factores de riesgo con mayores alcances

sobre la población corresponden al envejecimiento de la infraestructura y nuevamente a los sismos, ambos con impacto en más del 90% de los habitantes de la ciudad, seguidos por los cortes eléctricos y tsunamis con alcances cercanos al 64% de la población urbana, mientras que las remociones en masa afectan a poco más de la mitad de los habitantes, y la materialidad y cambio climático rondan el 40% población impactada respectivamente. A continuación, se analiza la vulnerabilidad física del sistema de abastecimiento hídrico de la ciudad respecto al impacto de los factores de riesgo evaluados sobre los componentes del sistema, así como en la ciudad y sus diferentes sectores de distribución, además de una revisión según sus fuentes de abastecimiento y los alcances de su evolución. Cabe señalar que no fueron consideradas las amenazas que no impactan según los diferentes parámetros evaluados en cuestión.

9.2.1. Por fuentes de abastecimiento

El análisis del impacto de cada amenaza según las diferentes fuentes de abastecimiento de aguas de la ciudad de Antofagasta considera la evaluación realizada anteriormente por cada una de ellas. De esta manera, el impacto en la producción de agua potable se asocia a la disponibilidad del recurso para el abastecimiento hídrico, mientras que el impacto sobre

Amenaza	Producción		Distribución		
	Cordillera	Mar	Cordillera	Mar	Mixta
Sísmica	100%	0%	43%	100%	73,8%
Tsunami	0%	100%	0%	100%	47,6%
Remoc. en Masa	86,4%	0%	30,1%	0%	22,8%
Volcánica	5,4%	0%	0%	0%	0%
Cambio climático	30,6%-53,5%	0%	32,7%-57,2%	0%	0%
Cortes eléctricos	13,6%	100%	0%	100%	62,8%
Envejecimiento	92%	37,80%	59%	100%	84,2%
Golpe de Ariete	5,4%	0%	0%	0%	0%

Tabla 54: Impacto de amenazas en la producción y distribución de agua potable según sus fuentes de abastecimiento

Fuente: Elaboración Propia

la distribución analiza la población impactada según sus diferentes fuentes de abastecimiento. Este análisis también incluye los criterios utilizados para la evaluación de impacto individual de las amenazas registrado previamente, y sirve a modo de condensación de la información recopilada. El impacto por fuentes de muestra en la Tabla 54 y se describe a continuación.

La principal amenaza a la producción con fuentes de cordillera corresponde a los sismos, que comprometen la totalidad del abastecimiento de esta fuente y el 43% de la capacidad de distribución de agua potable en la ciudad, seguida por el envejecimiento de la infraestructura, que abarca el 92% de la destinada a la producción de agua potable y compromete el 59% de su capacidad de distribución hacia sus consumidores finales. Las remociones en masa por su parte comprometen cerca del 86% de la capacidad de producción y de la disponibilidad de aguas para la ciudad, e impactan en un 30% de la distribución hídrica en la ciudad. Adicionalmente, el cambio climático implicaría un impacto máximo que va desde un 30,6% para el periodo 2011-2030 a un 53,5% para el periodo 2031-2050 en cuanto a la disponibilidad de aguas para abastecer la ciudad, implicando un impacto sobre los sectores abastecidos por fuentes de cordillera en un 32,7% para el primer periodo y un 57,2% para el segundo respectivamente.

Otras amenazas que resultan menos significativas para la producción de agua potable de fuentes cordilleranas y su disponibilidad para el abastecimiento de Antofagasta corresponden a los cortes eléctricos, con un impacto sobre el 13,6% de la capacidad de producción, y las amenazas de golpe de ariete y volcánica, con impactos sobre el mismo de un 5,4% cada una. Cabe destacar respecto a esta última amenaza que, si bien su impacto directo sobre la infraestructura de producción de cordillera es reducido, la ocurrencia de eventos de erupciones volcánicas podría implicar una contaminación de las fuentes que impactaría sobre todo el sistema de cordillera. A su vez, de estas amenazas, ninguna representaría un impacto real sobre la capacidad de distribución de agua potable, ya que no impactarían sobre la infraestructura destinada al suministro hídrico hacia los consumidores finales. Las características de extensión del sistema de producción de agua con fuentes de cordillera, dado que abarcan gran parte de la infraestructura destinada al abastecimiento hídrico urbano de Antofagasta, son una amenaza en sí misma, ya que la cantidad de infraestructura expuesta a cualquier tipo de amenaza es mucho mayor, y el impacto sobre una pequeña parte de este puede comprometer gran parte de su capacidad de abastecimiento de agua potable.

Con respecto al impacto de las diferentes amenazas consignadas para la presente investigación sobre las fuentes de agua de mar utilizadas para el abastecimiento hídrico de la ciudad de Antofagasta, el escenario contrasta con lo observado en las fuentes de cordillera debido al origen de sus amenazas. Así, mientras para las aguas de cordillera no existe exposición a tsunamis y el impacto de los cortes eléctricos es relativamente bajo, las fuentes de mar poseen expuesta la totalidad de su capacidad de producción para estas amenazas, dada la ubicación y demanda energética de esta infraestructura. A su vez, presenta envejecimiento solo en una parte de sus componentes, representando un impacto sobre el 37,8% de la producción de esta fuente. Por su parte, en cuanto a la distribución de agua desalada y su impacto en la población abastecida, en este caso remitida únicamente al Sector La Chimba, se encuentra comprometida la totalidad del suministro hídrico para las mismas amenazas, sumando además la exposición a la amenaza sísmica de infraestructura crítica de distribución para este sector. El agua potable suministrada a la ciudad de Antofagasta desde fuentes mixtas considera tanto las fuentes de cordillera como de mar, por lo que el impacto en la producción corresponde a lo detallado para ambas fuentes y solo se analiza su distribución. De esta manera, en los sectores abastecidos con agua potable de fuentes mixtas, el envejecimiento es el factor que mayor impacto representa sobre el suministro hídrico, comprometiendo cerca del 84% de la distribución del recurso, seguido inmediatamente por la amenaza sísmica, cuyo impacto asciende al 73,8% de estos sectores. Por su parte, los cortes eléctricos comprometen el 62,8% del suministro para los sectores abastecidos de fuentes mixtas, mientras que las amenazas de tsunami y remociones en masa impactarían en un 47,6% y 22,8% de la capacidad respectivamente.

9.2.2. Por componentes del sistema

En lo que respecta a la vulnerabilidad física de los diferentes componentes del sistema de abastecimiento hídrico de la ciudad de Antofagasta a los factores de riesgo que los amenazan, representado en el indicador de vulnerabilidad obtenido para cada uno según se observa en la Tabla 55, en la etapa de producción de agua potable, para el caso de las captaciones, los tsunamis son la amenaza con mayor impacto sobre ellas al ser la única que impacta en la infraestructura de agua de mar, que representa más del 60% de la capacidad de captación. El resto de las amenazas con impactos significativos son los sismos, remociones en masa, invierno altiplánico y envejecimiento, todas principalmente sobre componentes del sistema de cordillera, aunque con indicadores de vulnerabilidad menores, que oscilan entre 0,317 y 0,367. Lo mismo ocurre con las aducciones, con los tsunamis como la amenaza con mayor indicador de vulnerabilidad debido a la predominancia de las fuentes de mar para este componente, mientras que la amenaza sísmica tiene un impacto levemente inferior que en las captaciones. El resto de las amenazas presenta indicadores muy bajos o nulos. En cuanto a las PTAP, la amenaza sísmica es la con mayor impacto sobre este componente dado sus alcances sobre las PFSC, seguido de cerca por los tsunamis y cortes eléctricos, atribuidos a la desalación, y finalmente por el envejecimiento, con valores nulos para el resto de las amenazas. De igual manera, para los estanques del sistema de producción de agua, los sismos son la mayor amenaza, y en menor medida el envejecimiento, presentando indicadores de vulnerabilidad bajos o nulos para el resto de las amenazas consignadas. Por último, para la capacidad de las PEAC, al igual que las captaciones y aducciones, los tsunamis son la amenaza con mayor impacto dada la exposición y capacidad de la Planta Desaladora, mientras que el envejecimiento y los sismos impactan en menor medida sobre este componente y el resto de las amenazas poseen valores nulos.

Componentes	Amenazas										
	Sism.	Sísm. fallas	Tsun.	Rem. masa	Volc.	Inv. Altipl.	Camb. climát.	Golp. Arie.	Corte eléct.	Enve.	
Producción	Captaciones	0,337	0,347	0,633	0,317	0,020	0,367	0,137-	0,020	0,050	0,337
	Aducciones	0,308	0,308	0,692	0,133	-	-	0,240	0,133	-	0,133
	PTAP	0,541	-	0,459	-	-	-	-	-	0,454	0,270
	Estanques	0,549	0,032	0,028	-	-	-	-	-	-	0,392
	PEAC	0,141	0,078	0,686	-	-	-	-	-	-	0,292
Distr.	Conducciones	0,716	0,223	-	0,264	-	-	-	-	-	0,068
	Estanques	0,532	0,034	-	0,218	-	-	-	-	-	0,448
	PEAP	0,299	-	0,561	0,140	-	-	-	-	1	0,860

Tabla 55: Impacto de las amenazas al sistema de abastecimiento hídrico por componente

Fuente: Elaboración propia

Para los componentes de la etapa de distribución, en el caso de las conducciones de agua potable, los sismos son los con mayor impacto, mientras que los sismos por fallas y las remociones en masa lo hacen con indicadores muy inferiores, y la susceptibilidad al resto de amenazas es despreciable o nula. Igualmente, para los estanques de distribución, los sismos representan la mayor amenaza, seguidos por el envejecimiento de su infraestructura, y en menor medida por las remociones en masa, con valores muy bajos o nulos para las amenazas restantes. Por su parte, para las PEAP la mayor amenaza la constituye el envejecimiento de su infraestructura, y en menor medida la ocurrencia de tsunamis, que impacta en cerca de la mitad de la capacidad, mientras que los sismos y las remociones en masa poseen un grado bajo de impacto, y el resto de los factores de riesgo no representan una amenaza para este componente. Cabe destacar que la existencia de diferentes fuentes para el abastecimiento hídrico hace que el impacto de los factores de riesgo no sea absoluto, ya que las amenazas impactan de manera diferenciada según las distintas fuentes de agua.

9.2.3. Por sectores de distribución

Según los criterios especificados en la presente investigación para definir el impacto de las diferentes amenazas en cada uno de los sectores de distribución, y como se muestra en la Tabla 56, el Sector Alto Gran Vía es el que se expone al menor número de amenazas respecto al resto de los sectores, contando un total de 6, mientras que el resto oscila entre 7 y 8 amenazas con impacto en el suministro hídrico hacia sus respectivos habitantes. De esta manera, para la amenaza sísmica se identifica un impacto en todos los sectores de la ciudad, en su mayoría por sobre un 84% de su población y con impacto total en 6 de los 11 sectores de distribución. A su vez, en los sectores Centro y Alto Gran Vía, donde el impacto de esta amenaza es menor, se compensa con una mayor exposición a los sismos por fallas, que extienden sus alcances hasta la totalidad de la población de los sectores Independencia y Sur. Los tsunamis por su parte impactan únicamente en los sectores con suministro de agua de mar, siendo total para el Sector La Chimba, con abastecimiento de agua de mar, y parcial para los sectores con suministro de agua de mezcla, pudiendo complementar el abastecimiento con fuentes de cordillera, aunque la disminución de caudal seguiría impactando a todos los habitantes abastecidos con esta fuente. A su vez, la amenaza de remoción en masa impacta principalmente en los sectores del norte de la ciudad, afectando a la totalidad de los habitantes de Bonilla, Balmaceda y Prat, e impactando también, aunque en menor medida, sobre los sectores Alto Gran Vía, Centro y Amarillos, mientras que el resto de los sectores no se ven significativamente expuestos a este factor de riesgo. Con respecto al cambio climático, sus alcances

Sectores	Amenazas									
	Sismos	Sísmica de fallas	Tsunami	Remoc. en masa	Cambio climát.	Accid.	Cortes eléct.	Materi.	Envejec.	Rotu. Tuber.
La Chimba	100%	-	100%	1,4%	-	41%	100%	13,6%	100%	10,1%
Bonilla	100%	-	100%	100%	-	4,4%	100%	24%	22,1%	3,9%
Balmac.	100%	-	-	100%	100%	40,6%	-	64,4%	61,9%	12,3%
Prat	93,7%	-	-	100%	100%	12%	-	63,2%	66,7%	7,8%
El Salto	84,3%	-	-	4%	100%	14,2%	-	64,1%	74,1%	24,5%
Ancla	84,3%	-	100%	-	-	7,8%	100%	48%	56,4%	3,9%
Centro	55,7%	100%	-	15,9%	-	12,3%	-	71,6%	100%	4,8%
A. G. Vía	57%	100%	-	28,2%	100%	100%	-	-	-	92%
Amarillos	100%	-	100%	14,2%	-	24%	100%	41,2%	100%	14,9%
Independ.	100%	100%	-	4,7%	100%	91,4%	-	53,2%	64,3%	26,4%
Sur	100%	100%	-	10,1%	100%	25,3%	-	14,3%	14,5%	24,1%

Tabla 56: Impacto de las amenazas al sistema de abastecimiento hídrico en la población de los sectores de distribución
Fuente: Elaboración propia

se remiten únicamente a las fuentes de cordillera, impactando en la totalidad de los habitantes abastecidos con estas aguas, aunque parcialmente al reducir el caudal disponible.

Para el caso de los accidentes externos, su impacto promedio es diferente sobre los habitantes de cada sector, destacándose Alto Gran Vía con la totalidad de su población, e Independencia con más del 90% de sus habitantes, mientras que los sectores La Chimba, Balmaceda, Sur y Amarillos oscilan entre 24% y 41%, y el resto de los sectores posee en promedio menos del 13% de sus habitantes expuestos a cortes de suministro causados por esta amenaza. A su vez, al igual que los tsunamis, los cortes de energía eléctrica impactan únicamente en las fuentes de agua desalada, y aunque abarcan a la totalidad de población abastecida con fuentes de mar y de mezcla, para esta última su impacto es parcial, pudiendo complementar el suministro con fuentes de cordillera. Para la materialidad, considerando la presencia de asbesto cemento en la red de distribución de agua potable, el Sector Centro es el con mayor población impactada, por sobre el 70%, y los sectores Balmaceda, Prat y El Salto oscilan entre un 63% y 65% de población expuesta, mientras que en los sectores Independencia, Ancla y Amarillos el impacto se extiende hasta cerca de la mitad de la población, y en el Sector Bonilla alcanza el 24% de su población, aunque para el resto de los sectores de la ciudad sus alcances son menores al 14% de sus respectivos habitantes.

El envejecimiento de la infraestructura por su parte implica un impacto en la totalidad de la población de los sectores La Chimba, Centro y Amarillos, y en menor medida en el Sector El Salto con el 74% de su población expuesta. Por su parte, los sectores Prat, Independencia y Balmaceda superan el 60% de sus habitantes con exposición a esta amenaza, mientras que para el Sector Ancla los alcances superan a la mitad de su población. El impacto sobre el resto de los sectores es menor al 22% de sus respectivas poblaciones. Finalmente, las roturas y fallas de tuberías impactan en promedio a más del 90% de los habitantes del Sector Alto Gran Vía y a cerca de un cuarto de la población de los sectores El Salto, Independencia y Sur, mientras que, en los sectores Amarillos, Balmaceda y La Chimba, la población impactada ronda entre un 10% y 15%, y en el resto de los sectores impactan a menos del 8% de sus habitantes. Se destaca que las amenazas de origen natural impactan en mayor medida en los sectores ubicados en los extremos norte y sur de la ciudad respecto a los más céntricos y, por el contrario, a excepción de los cortes eléctricos, las amenazas

de tipo tecnológicas impactan mayormente a la población de estos últimos sectores al ser los más antiguos de la ciudad y, por lo tanto, los más susceptibles a estos factores de riesgo. Por lo tanto, mientras los alcances de las amenazas naturales responden a la localización de los sectores de la ciudad, las amenazas tecnológicas dependen de las condiciones operativas y de su antigüedad.

9.2.4. Evolución de la vulnerabilidad física

La exposición del sistema de abastecimiento hídrico de la ciudad de Antofagasta a los diferentes factores de riesgo abordados ha variado en función de los cambios e incorporaciones en su infraestructura. De esta manera, para el escenario previo, con abastecimiento únicamente con aguas de cordillera, los efectos del Invierno Altiplánico han representado un problema permanente, en especial las remociones en masa asociadas, impactando constantemente sobre la infraestructura de producción del sistema de producción de cordillera. A estas amenazas se les suman los sismos, todas con un impacto total sobre la capacidad de producción de fuentes de cordillera, mientras que las amenazas volcánicas, de cambio climático, golpe de ariete y envejecimiento de la infraestructura poseen un impacto parcial en la producción con esta fuente.

Los cambios de la infraestructura actual respecto al escenario previo se asocian completamente a la incorporación del agua desalada al suministro hídrico de la ciudad de Antofagasta, cuya implementación significó también la exposición a nuevas amenazas para el sistema de abastecimiento, como lo son los tsunamis y los cortes eléctricos, y que con el progresivo incremento de la capacidad de la Planta Desaladora, han ido aumentando hasta pasar a ser los factores de riesgo más importantes debido al predominio del agua desalada en el caudal suministrado a la ciudad. A su vez, a excepción de los sismos tsunamigénicos, la incorporación de la nueva fuente reduce la exposición del sistema de abastecimiento a las amenazas específicas al sistema de producción de cordillera, pasando a tener dos fuentes con factores de riesgo diferentes entre sí, de modo que las amenazas a una de las fuentes no comprometen la capacidad completa del sistema. Para un escenario futuro, con el suministro hídrico proveniente únicamente de la desalación, al prescindir del sistema de producción con fuentes de cordillera, sus amenazas asociadas dejan de tener efecto sobre la capacidad de producción de agua potable. Por otro lado, las amenazas específicas al proceso de desalación pasarían a tener un impacto total en el sistema de abastecimiento hídrico.

9.3. Manejo de emergencias y medidas de mitigación

El CEPIS (2000) plantea que el objetivo final de una evaluación de vulnerabilidad de los sistemas de abastecimiento hídrico consiste en la elaboración de planes de emergencia, a fin de considerar los aspectos que presentan mayor debilidad del sistema y ejecutar medidas que permitan enfrentar adecuadamente las emergencias suscitadas por las amenazas identificadas con potencial de afectar negativamente al sistema de abastecimiento hídrico de Antofagasta y su capacidad. La empresa Aguas Antofagasta (2015), mediante su Plan de Emergencias, realizó su propia evaluación de vulnerabilidad, y mediante el análisis de las acciones llevadas a cabo por la sanitaria, fue posible definir también su capacidad de respuesta y las medidas de mitigación propuestas para asegurar el suministro hídrico de la ciudad. A continuación, se presentan los principales aspectos de dicho Plan de Emergencias, y su contraste con los resultados obtenidos en la presente investigación, evidenciando las falencias identificadas y complementando ambas evaluaciones a fin de responder a la problemática de vulnerabilidad del sistema, además de anteponerse al escenario futuro de la ciudad abastecida únicamente con agua desalada mediante propuestas sugeridas para su inclusión en todas las etapas que comprende el manejo de emergencias.

9.3.1. Riesgo y Vulnerabilidad Local

Riesgo	Fuente				Antofagasta	
	Cordillera		Mar		Prod. AP	Dist. AP
	Capt.	Cond.	Capt.	Desal.		
Terremoto	Medio	Medio	Medio	Alto	Medio	Medio
Tsunami	N/A	N/A	N/A	Alto	N/A	Medio
Marejada	N/A	N/A	Medio	Medio	Medio	Medio
Aluvión	Medio	Medio	Bajo	N/A	Medio	Medio
Erupción	Bajo	Bajo	N/A	N/A	N/A	N/A
Temporal	Medio	Medio	Bajo	N/A	Medio	N/A
Químico	N/A	N/A	Bajo	Bajo	Bajo	N/A
Biológico	Bajo	N/A	Medio	Medio	Bajo	Bajo
Incen. Forestal	Bajo	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Incen. Estruct.	Medio	N/A	Medio	Medio	Medio	N/A
Delincuencia	Bajo	Bajo	Medio	Medio	Bajo	Bajo
Accid. tránsito	Alto	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo	Medio
Terrorismo	N/A	N/A	N/A	Medio	N/A	N/A

Tabla 57: Priorización de riesgo y vulnerabilidad local
Fuente: Aguas Antofagasta (2015)

Aguas Antofagasta (2015) aborda la vulnerabilidad física del sistema de abastecimiento según el factor de riesgo identificado y la vulnerabilidad local en sus componentes. De esta manera, mediante la elaboración de su Plan de Emergencias, la empresa sanitaria Aguas Antofagasta identifica 13 fuentes de riesgo con 4 niveles de impacto definidos para cada uno, diferenciándolos según su origen en naturales o antrópicos, los que se detallan en la Tabla 57. En el caso de los

primeros, al igual que en los resultados obtenidos en el presente estudio, se identifican los terremotos y tsunamis, remociones en masa, erupciones volcánicas y eventos de temporales, incorporándose además las marejadas como amenaza al sistema de abastecimiento de aguas. En el caso de la amenaza de terremotos y remociones en masa o aluviones, al igual que los resultados de la amplificación sísmica y de susceptibilidad obtenidos, se reconoce su presencia y la exposición de su infraestructura en diferentes niveles, predominando un grado medio en los elementos considerados, y destacándose un grado alto de riesgo sobre la Planta Desaladora para la primera de estas, contrastando con la aceleración y susceptibilidad obtenida en la presente investigación, en donde no se reconoce exposición a estas amenazas por parte de la infraestructura de producción con fuentes de agua de mar. Por su parte, los tsunamis y las marejadas representan un grado alto y medio respectivamente de amenaza para la Planta Desaladora, aunque se destaca que la primera de ellas no se considera para las captaciones de dicha infraestructura. Respecto a las erupciones volcánicas, se reconoce un nivel bajo de riesgo asociado únicamente a la infraestructura de cordillera, mientras que en el caso de los temporales el riesgo asciende a un nivel medio para la misma infraestructura, y se presenta con un nivel bajo respecto a las captaciones de agua de mar. Cabe señalar que, si bien se identifican las sequías como posible amenaza a los sistemas de abastecimiento de aguas, este criterio no aplica para el caso de Antofagasta en ninguno de sus componentes analizados debido a las condiciones hidroclimáticas locales.

Con respecto al riesgo con origen en amenazas antrópicas identificado por la empresa sanitaria, difieren radicalmente de las consideradas para la presente investigación, aunque se pueden establecer ciertas similitudes respecto a la contaminación de las fuentes trabajadas anteriormente con las fuentes de riesgo químico y biológico consignadas en el Plan de Emergencia de la empresa sanitaria (Aguas Antofagasta, 2015), y de la amenaza de accidentes producidos por terceros, específicamente los clasificados como choque de vehículo, con el riesgo de accidentes de tránsito

propuesto en el citado plan. En relación con los primeros, la amenaza química por acción industrial solo se registra en las fuentes de mar con un grado bajo, mientras que la amenaza sanitaria de fuente biológica asciende a un grado medio en las mismas fuentes, y tiene un grado bajo en las captaciones de agua de cordillera. Los accidentes de tránsito por su parte representan un grado alto de riesgo respecto a las captaciones de agua de cordillera, y es de grado bajo en el resto de los elementos considerados. A su vez, se reconocen dos tipos de incendios que ponen en riesgo el abastecimiento, como lo son los forestales y los de infraestructura, de los cuales se reconoce un grado bajo para los primeros en cuanto a las captaciones de cordillera, y un grado medio para los segundos en este mismo componente y en la infraestructura de fuentes de agua de mar. También se identifica como fuente de riesgo para el abastecimiento hídrico la delincuencia, con grados bajo en la infraestructura de cordillera y grado medio en la de mar, y finalmente se consigna el terrorismo como amenaza a la Planta Desaladora en un grado medio.

El Plan de Emergencias de Aguas Antofagasta (2015) también analiza la producción y distribución del recurso hídrico en términos generales respecto a cada fuente de riesgo consignada. En el caso de la producción de agua potable, las amenazas de terremoto, marejadas, aluviones, temporales e incendios estructurales se presentan con grados medios y las amenazas de origen químico, biológico, de delincuencia y accidentes de tránsito poseen grados bajos. Para el caso de la distribución de agua potable, aunque en general se asemeja a lo observado en la producción, difieren en las amenazas de origen natural al incorporar la amenaza de tsunami, también con grado medio, y suprimir la de temporal, mientras que en las de origen antrópico desaparecen las amenazas químicas y de incendios estructurales y se aumenta el grado de los accidentes de tránsito a medio. El resto de las fuentes de riesgo, según los criterios utilizados en la elaboración del Plan de Emergencias de la empresa sanitaria, no aplican ni en la producción ni en la distribución de agua potable. Cabe señalar además que, en el análisis global de la producción y distribución de agua potable, el citado plan no le atribuye un grado alto a ninguna de las fuentes de riesgo identificadas en la presente investigación para el sistema de abastecimiento hídrico de la ciudad de Antofagasta.

9.3.2. Vulnerabilidad administrativa y capacidad de respuesta

Tal como lo consigna la Guía Metodológica para la elaboración de planes de emergencia (SISS, 2011b), las empresas sanitarias son el actor principal en el manejo previo y posterior a la ocurrencia de eventos que impacten en el abastecimiento hídrico, siendo las responsables de cada una de las etapas desarrolladas. De esta manera, la capacidad de respuesta de la empresa para el manejo de emergencias es fundamental para asegurar el restablecimiento del suministro normal de agua potable tras un evento catastrófico. Para ello se encuentran distribuidos los roles dentro de la empresa atribuidos a diferentes cargos, como se muestra en la Tabla 58, entre los que se destaca el jefe del Departamento de Prevención de Riesgos como coordinador general de la emergencia, y la asignación de diferentes gerentes para labores en la emergencia dentro de sus áreas respectivas. Por su parte, a cargo de la seguridad en el desarrollo

Cargo	Rol en la Empresa
Coord. Emergencia	Jefe Depto. Prevencion De Riesgos
Operaciones	Gerente Servicios
Personas	Gerente Personas (I)
Finanzas	Gerente Finanzas
Ingeniería	Gerente De Planificación Y Calidad
Clientes	Gerente Clientes
Legal	Jefe Dirección Asuntos Legales
Seguridad	Supervisor Prevencion de Riesgos
Comunicaciones	Periodista

Tabla 58: Comité de emergencias de la empresa sanitaria
Fuente: Aguas Antofagasta (2015)

de la emergencia se encuentra el Supervisor de Prevención de Riesgos, directamente relacionado con el coordinador de la emergencia, y además se cuenta la existencia de un periodista encargado de las comunicaciones desde y hacia la empresa sanitaria. Respecto a esto último, los sistemas de comunicaciones identificados en el Plan de Emergencias (Aguas Antofagasta, 2015) son variados según su tipo y uso, la tecnología utilizada y su cobertura, registrándose como sistemas de comunicación los correos electrónicos, telefonía celular y mensajería, telefonía fija y satelital, y radiocomunicaciones, siendo esta última la única con alcance limitado a una cobertura regional, a diferencia del resto que posee coberturas adicionales a nivel nacional e internacional. A su vez, todos los sistemas utilizados son sustituibles entre sí a excepción de la telefonía satelital, siendo esta la última instancia de comunicación en caso de que el resto fallen. Adicionalmente, el mismo plan identifica las diferentes instituciones del sector público, organismos operativos y fuerzas armadas destinadas a la asistencia para el caso de emergencias, y en cuya labor complementarían el trabajo realizado por la empresa sanitaria a la hora de restablecer el servicio de agua potable a la normalidad. Los actores institucionales se pueden diferenciar según la escala de su jurisdicción, siendo comunales y provinciales las municipalidades y gobernaciones respectivas al área de estudio, y a escala regional se identifican la Intendencia y los Servicios Ministeriales. Con respecto a los organismos encargados de la parte operativa de las emergencias, se identifican como encargados la ONEMI y la SISS, ambas con jurisdicción regional, mientras que las principales ramas de las fuerzas armadas encargadas de apoyar y resguardar el orden en eventos de emergencia corresponden a las unidades policiales, ejército, fuerza aérea, y la Gobernación Marítima (Aguas Antofagasta, 2015).

El Plan de Emergencias elaborado por Aguas Antofagasta (2015) también define los usuarios prioritarios para el abastecimiento hídrico tras la ocurrencia de un evento catastrófico, señalando al Hospital Regional de Antofagasta como el principal de ellos, y aunque no se define el caudal requerido por este, se atribuye esta prioridad al servicio que presta a la comunidad. Por otra parte, también se establecen como usuarios prioritarios los albergues definidos por la ONEMI para recibir a los damnificados por eventos catastróficos, entre los que se cuentan principalmente instalaciones públicas como liceos y escuelas, gimnasios e infraestructura municipal, aunque estos no se especifican ya que dependerán de la distribución y magnitud del impacto registrado. Finalmente, la empresa sanitaria también indica las instalaciones prioritarias para la reposición de otros servicios, específicamente de energía eléctrica, que permitan asegurar el suministro hídrico hacia la ciudad de Antofagasta, dentro de las que se cuentan las plantas de tratamiento de agua potable, la planta elevadora de la Impulsión Bonilla y el Centro de Operaciones Regional de la empresa sanitaria, ubicado en sus oficinas centrales, siendo la Planta Desaladora la con mayor demanda energética y la prioridad para reponer sus funciones, debido a su capacidad para abastecer por sí misma a toda la ciudad de Antofagasta por medio del cambio en los flujos de las conducciones de agua potable.

Según lo anterior, y considerando los elementos propuestos por el CEPIS (2000) para la evaluación de la vulnerabilidad administrativa en sistemas de agua potable, la Tabla 59 presenta los principales elementos identificados para cada uno de los aspectos que componen este factor de riesgo. De esta manera, en cuanto a la organización institucional, fue posible constatar la existencia de programas y planes de emergencia en todos los niveles, como lo son el Plan Nacional de Protección Civil (ONEMI, 2002) y el Plan de Emergencias de Aguas Antofagasta (2015), cada uno con sus respectivos comités de emergencias. Estos planes contemplan además la coordinación entre todos los actores involucrados en la atención de emergencias, como lo son las instituciones públicas, fuerzas armadas,

Vulnerabilidad Administrativa	
Organización institucional	Existen programas y planes de emergencias en todos los niveles, con sus respectivos comités, actividades de capacitación y de simulacros.
	Se contempla la coordinación de todos los actores involucrados en la atención de emergencias mediante diversos medios de comunicación.
	Aunque la dispersión institucional produce descoordinación en el manejo de emergencias, los problemas registrados en la atención de eventos previos sirven como precedentes para enfrentar adecuadamente la ocurrencia de nuevos eventos.
	Hay deficiencias en los sistemas de información para la producción de cordillera.
Operación y mantenimiento	No fue posible identificar planes de operación y mantenimiento para todo el sistema, solo obras individuales enfocadas en los principales componentes del sistema de abastecimiento hídrico.
	Aunque no hay información disponible, se asume que el personal y los actores encargados de la atención de emergencias en todos sus niveles se encuentran debidamente capacitados.
	Los actores cuentan con directorios de proveedores y prestadores de servicios.
	La empresa sanitaria cuenta con camiones aljibe y repuestos para atender emergencias, además de medios de transporte. Todo para emergencias inmediatas, para el resto requiere privados.
	A nivel general existe una externalización de los servicios, requiriendo de la intervención de privados para la atención de emergencias y de servicios en general.
Apoyo admin	No fue posible identificar la disponibilidad y manejo de dinero para situaciones de emergencias.
	Existe apoyo logístico de personal y disponibilidad de contratación de empresas privadas para apoyar medidas de mitigación y rehabilitación en todos los niveles, sintetizados en los directorios de proveedores.
Capacidad de respuesta	La respuesta a emergencias de los organismos pertinentes dependerá del tipo de evento y las características de su ocurrencia, así como la magnitud y alcances de su impacto asociado, requiriendo de una evaluación específica que abarque a todos los involucrados para definir la respuesta.
	Los recursos disponibles propios de la empresa sanitaria permiten la atención de emergencias de baja magnitud, requiriendo de apoyo externo para la restauración del suministro en eventos mayores.
	La localización de la emergencia también define la capacidad de respuesta, siendo más eficiente a menor distancia de los principales centros urbanos.
	Para emergencias asociadas a la desalación, dados el énfasis otorgado y los recursos disponibles, se espera una respuesta rápida frente a eventos que puedan impactar el suministro hídrico.
	Basado en los cortes de suministro registrados en la ciudad, la capacidad de respuesta en general es deficiente y tardía, siendo resultado de la carencia de planes operativos, de mantención y mitigación.

Tabla 59: Evaluación de la vulnerabilidad administrativa en el abastecimiento hídrico de la ciudad de Antofagasta

Fuente: Elaboración propia

la empresa sanitaria y proveedores externos. El proceso de respuesta a emergencias que involucran sistemas sanitarios se detalla en el Anexo 7. Adicionalmente, debido a la gran cantidad de factores de riesgo existentes en la región y para el sistema de abastecimiento hídrico de la ciudad de Antofagasta, así como las emergencias y catástrofes registradas previamente, sirven como precedentes para una preparación eficaz que permita enfrentar adecuadamente la ocurrencia de nuevos eventos. En este contexto, se desarrollan diversas actividades de capacitación y simulacros en todos los niveles, colaborando con la preparación para responder a emergencias. Por otra parte, todos los organismos involucrados en la atención de emergencias cuentan con una amplia gama de medios de comunicación para la coordinación en la atención de emergencias, al igual que dentro de la empresa sanitaria, la que posee mecanismos de monitoreo en la mayor parte de su infraestructura, exceptuándose las captaciones de agua de cordillera, lo que dificulta su intervención en caso de ser requerida. Cabe señalar que no existe un plan de mitigación que contemple medidas específicas para el tratamiento de factores de riesgo, encontrándose dispersas en los diferentes documentos emanados por la empresa, como sus memorias anuales, proyectos desarrollados, entre otros.

Seguidamente, mediante el análisis de elementos vulnerables en la operación y mantenimiento del sistema de agua potable, al igual que con las medidas de mitigación, no se identificaron planes de operación y mantenimiento para todo el sistema de abastecimiento hídrico, únicamente obras y proyectos individuales. De igual manera, no fue posible acceder a información respecto a la capacidad del personal para la atención de emergencias, aunque se asume que todos los actores encargados de ello se encuentran debidamente capacitados para responder a la ocurrencia de eventos, especialmente con impacto sobre el abastecimiento hídrico. Por su parte, los principales responsables, como la ONEMI y la empresa sanitaria, cuentan con recursos propios para la atención inmediata de emergencias, como camiones aljibe, repuestos menores y medios de transporte, y aunque estos son escasos y efectivos solo para eventos de baja magnitud, por lo que dependen altamente de proveedores externos de bienes y servicios para responder a la mayor parte de eventos que susciten emergencias sanitarias. En concordancia con lo anterior, para el aspecto referido al apoyo administrativo, aunque existe apoyo logístico de personal para la atención de emergencias, en general se requiere de la contratación de empresas externas para la mitigación y rehabilitación en todos los niveles, tanto para eventos en el sistema de abastecimiento hídrico como emergencias de mayor magnitud. Esto se sintetiza en los directorios de proveedores de bienes y servicios que posee cada organismo en todos los niveles, y que abarcan prácticamente la totalidad de los aspectos de atención a emergencias y eventos de catástrofes en todas sus etapas.

Por último, en cuanto a la capacidad de respuesta frente a la ocurrencia de eventos, resultante de las evaluaciones de vulnerabilidad en los aspectos institucionales, de operación y mantenimiento, así como de apoyo administrativo (CEPIS, 2000), son varios los elementos a considerar. Primero es importante señalar que las características del evento o emergencia son las que condicionan la respuesta por parte de los organismos pertinentes, y que su impacto no es homogéneo en el territorio o en el sistema de abastecimiento hídrico, haciendo necesaria una evaluación específica de su impacto para definir las medidas a implementar. Para eventos de baja magnitud y sobre los cuales exista capacidad propia para su atención por parte de los organismos pertinentes, la respuesta será más eficaz que para eventos de mayor magnitud o que requieran de apoyo externo para su atención. De igual manera, la localización y la dificultad para acceder a la infraestructura impactada o al área que requiera atención de emergencia puede agilizar o problematizar su resolución. De esta manera, las emergencias suscitadas en las plantas de tratamiento de agua potable, especialmente en la Planta Desaladora, pueden responderse más fácilmente debido al énfasis puesto sobre ellas y a su cercanía a los principales centros urbanos regionales, por lo que se espera una respuesta rápida frente a la ocurrencia de eventos que comprometan el suministro hídrico. Sin embargo, considerando los cortes de suministro registrados en la ciudad de Antofagasta para el periodo 2011-2014 (SISS, 2015), es posible determinar que la carencia de planes de operaciones, mantenimiento y mitigación de la empresa sanitaria se traducen en una respuesta deficiente para emergencias sanitarias, con un gran número de cortes de suministro y de largas duraciones, e impactos extendidos sobre grandes grupos de habitantes de la ciudad.

9.3.3. Medidas de mitigación

Tal como se ha señalado, las medidas de mitigación contemplan el conjunto de acciones ejecutadas para la reducción de la vulnerabilidad, reduciendo el riesgo de fallas en condiciones normales de operación y corrigiendo las debilidades del sistema frente al impacto de las diferentes amenazas, y surgen como respuesta a la evaluación de la vulnerabilidad al formar parte de las decisiones de

planificación y desarrollo de estos sistemas, contemplando entonces la definición, priorización, asignación, programación y presupuesto de la implementación de medidas de mejoramiento y obras de reforzamiento estructural, a fin de incrementar la confiabilidad del sistema y sus componentes (OPS, 1998). Dentro de los documentos atribuidos a la empresa sanitaria, se identifican una serie de medidas implementadas para mitigar la vulnerabilidad del sistema de abastecimiento hídrico de la ciudad de Antofagasta resumidas en la Tabla 60, las cuales han sido clasificadas según sus componente operativos, físicos y administrativos de la vulnerabilidad del sistema, y complementadas con propuestas a partir de la evaluación de vulnerabilidad realizada en la presente investigación y de las medidas descritas en la bibliografía consultada, considerando además los cambios del sistema asociados a la implementación de las diferentes fuentes y las proyecciones de una ciudad abastecida únicamente con aguas provenientes de la desalación.

Medidas de mitigación identificadas	
Vulnerabilidad Operativa	La incorporación de nuevas fuentes e infraestructura para el abastecimiento hídrico de Antofagasta han contribuido al aumento en la capacidad del sistema de agua potable y a mejorar su continuidad.
	La implementación de plantas de tratamiento y sus sucesivas mejoras han contribuido a mejorar los parámetros de calidad del agua en general, ajustándose a la normativa vigente, en contraste con una percepción negativa en torno a la incorporación del agua desalada al abastecimiento hídrico de la ciudad.
Vulnerabilidad Física	Se identifican obras de mejoras y refuerzos del sistema de producción de agua potable ejecutadas por la empresa sanitaria de manera individual, identificadas en las principales captaciones de cordillera, en la VACA y NACA y en todas las PTAP.
	Las obras constan de la conservación o reemplazo de la infraestructura antigua, el revestimiento interior y exterior de las principales aducciones del sistema, la incorporación de nuevos componentes a la conducción de aguas, y la adquisición de equipos críticos de repuesto y equipos de monitoreo, especialmente en las PTAP. Para la distribución, las medidas son de mejoramiento y refuerzos de la red y los estanques, especialmente en sectores con agua de mar en su suministro hídrico.
	Implementación de sistemas de disipación de energía aluvional en las principales quebradas del escarpe costero de la ciudad de Antofagasta, mitigando los impactos de las remociones en masa en el sistema urbano. Aunque no se especifican las fuentes de riesgo a las que apuntan la mayoría de las medidas adoptadas por la empresa sanitaria, ni se contextualizan dentro de algún plan de operaciones o mantenimiento, su ejecución mejora en general la resistencia del sistema.
Vulnerabilidad Administrativa	Además de lo mencionado, la empresa ejecuta actividades de capacitación y simulacros, e implementación de mecanismos de vigilancia, aunque sin detallarse su consistencia, periodicidad y factores de riesgo a los que apuntan estas acciones.
	La empresa cuenta con repuestos para reparar infraestructura de cordillera dañada por efectos del Invierno Altiplánico, y con programas de mantención y operación para asegurar el funcionamiento de la desaladora frente a contaminantes.

Tabla 60: Medidas de mitigación identificadas para el sistema de abastecimiento hídrico de la ciudad de Antofagasta
Fuente: Elaboración propia en base a Aguas Antofagasta (2004; 2005; 2006; 2009; 2010; 2012; 2013b; 2014b; 2015; 2016), CEPIS (2000), Cerda (2012), ESSAN (1998; 1999; 2001b) y Maino & Recabarren (2011)

9.3.3.1. Vulnerabilidad operativa

Desde la definición de la vulnerabilidad operativa y los aspectos de capacidad, continuidad y calidad asociados a su evaluación (CEPIS, 2000), es posible identificar las medidas adoptadas para asegurar un correcto funcionamiento del servicio de agua potable para la ciudad de Antofagasta y que apuntan precisamente a dichos aspectos. Así, la capacidad del sistema de abastecimiento basado en la existencia de fuentes mixtas para el suministro hídrico de la ciudad, la inclusión de cada nueva fuente para el abastecimiento genera un incremento en la capacidad de suministro de aguas, ayudando a reducir su vulnerabilidad asociada. Pese a la superioridad de la capacidad del sistema de cordillera frente al de agua de mar, las limitantes de disponibilidad y derechos de caudal para captar, sumados a la cantidad de centros urbanos que, al igual que Antofagasta, dependen de esta fuente para su abastecimiento, hacen del suministro de aguas de cordillera el con mayor

vulnerabilidad en términos de capacidad, en contraste con el funcionamiento de la Planta Desaladora al máximo de su capacidad de diseño y que destina cerca del 95% del caudal producido para el abastecimiento de la ciudad de Antofagasta. En términos prácticos, la capacidad de producción de agua potable para abastecer la ciudad se traduce en un caudal medio suministrado levemente superior al recomendado por habitante al día, aunque con grandes variaciones entre los diferentes sectores de abastecimiento asociadas al origen de sus aguas. De esta manera, pese al incremento de la disponibilidad que ha contribuido a mejorar la situación de la ciudad en general, considerando además que el suministro continuo de aguas hacia la ciudad lleva cerca de 25 años, y la marcada escasez del recurso en la zona (Maino & Recabarren, 2011), y que actualmente se suministra un caudal cercano al recomendado para consumo urbano, este sigue siendo insuficiente en términos de capacidad para cerca del 65% de los habitantes de la ciudad de Antofagasta.

Con respecto a la histórica problemática de la calidad del agua suministrada hacia Antofagasta, las medidas adoptadas para mitigarla también se encuentran asociadas a la implementación de infraestructura, como lo son la Planta Desaladora con el agua de mar y las PFSC para las fuentes de cordillera. Esta última ha significado una mejora paulatina de la calidad del suministro mediante su adaptación a la legislación de calidad de agua potable vigente, ajustando sus procesos según los requerimientos de la normativa aplicable e incorporando nuevas tecnologías para el tratamiento del agua y el monitoreo de los procesos (Aguas Antofagasta, 2013b; Cerda, 2012; Maino & Recabarren, 2011). De esta manera, la empresa sanitaria declara que sus aguas cumplen con todas las características que exige la normativa, y aunque del proceso de desalación suministra aguas con gran nivel de pureza y altos estándares de calidad, la evaluación de la calidad del agua suministrada a la ciudad permanece deficiente y ha disminuido a medida que aumenta la influencia de la Planta Desaladora sobre el abastecimiento de la ciudad, provocando que las medidas de mitigación adoptadas para la calidad de las aguas no se reflejen en su evaluación tras la distribución de estas. En cuanto a la continuidad del servicio de agua potable, aunque en la producción se ha basado en el mismo principio que la disponibilidad hídrica al aumentarla mediante la incorporación de nuevas fuentes, se asocia también con la vulnerabilidad física y administrativa del sistema, haciendo que la continuidad dependa también de las medidas de mitigación aplicadas en dichos aspectos de la vulnerabilidad del sistema y, por lo tanto, de otros factores además de la disponibilidad hídrica.

9.3.3.2. Vulnerabilidad física

La empresa Aguas Antofagasta se encuentra constantemente invirtiendo recursos para mejorar el sistema y asegurar la continuidad del suministro hídrico a sus clientes abastecidos, y aunque no se especifican medidas de mitigación específicas para las diferentes fuentes de riesgo consideradas por la empresa sanitaria, la priorización y grado de éstas entregan una idea de la dirección de los esfuerzos para reducir la vulnerabilidad del sistema de abastecimiento. Para las fuentes de cordillera, además de la amenaza asociada al Invierno Altiplánico, son relevantes las amenazas sísmicas y de incendio de su infraestructura, ambas con el mismo grado de riesgo, mientras que los accidentes de tránsito, al poseer un grado alto de riesgo sobre las captaciones, son también una prioridad a la hora de generar medidas de mitigación (Aguas Antofagasta, 2015). Estas mismas fuentes de riesgo se identifican sobre la infraestructura de fuentes de agua de mar, aunque en el caso de la amenaza sísmica aumenta su grado de riesgo a alto, e incorpora además las amenazas de tsunami con el mismo grado, y otras como marejadas, riesgo biológico, delincuencia y terrorismo, todas ellas referidas principalmente a la Planta Desaladora y su infraestructura asociada.

En este sentido, entre las principales obras se encuentran el mejoramiento de las captaciones Toconce, Lequena y Quinchamale para minimizar el impacto del Invierno Altiplánico (ESSAN, 2001b), sumado a obras en la primera de estas para evitar la acumulación de arena en la captación (Aguas Antofagasta, 2004). Sin embargo, el resto de las medidas apuntan a asegurar la capacidad operativa del sistema mediante obras de mejoramiento, como la conservación o reemplazo de la infraestructura antigua, el revestimiento interior y exterior de las principales tuberías, la incorporación de nuevos componentes a la conducción de agua, y la adquisición de equipos críticos de repuesto y de equipos de monitoreo (Aguas Antofagasta, 2014b; 2015), especialmente aplicado en las PTAP. De esta manera, los componentes intervenidos detallados en las memorias anuales revisadas, además de las captaciones mencionadas, son las aducciones VACA (ESSAN, 1998) y NACA (ESSAN, 1999; Aguas Antofagasta, 2016), y las tres PTAP, tanto las PFSC (Aguas Antofagasta, 2014b; 2015) como la Planta Desaladora (Aguas Antofagasta, 2015), además de los Estanques Caracoles (Aguas Antofagasta, 2010) que almacenan y distribuyen el agua tratada por estas plantas.

Respecto a la distribución de agua potable, las medidas de mitigación adoptadas por la empresa sanitaria consisten en el mejoramiento y refuerzo de la red de distribución y los estanques, aunque focalizado para el Sector Bonilla en el caso de la red, identificándose únicamente mejoras en dicho sector entre las obras detalladas en las memorias anuales (ESSAN, 1999; Aguas Antofagasta, 2005; 2006). En cuanto a los estanques de distribución, solo se identifican obras en los estanques Ancla (Aguas Antofagasta, 2010) y Amarillos (Aguas Antofagasta, 2009; 2014b), por lo que se observa que los esfuerzos de mitigación de la empresa sanitaria se han enfocado en la vulnerabilidad operativa de la infraestructura y sectores abastecidos con fuentes mixtas, adaptándose según el aumento en la disponibilidad de agua derivada de la incorporación de fuentes de agua de mar. Pese a que las fuentes de riesgo identificadas por Aguas Antofagasta (2015) fueron calificadas, como máximo, con un grado medio, se desconoce la incorporación de medidas de mitigación específicas para enfrentar cada una de estas amenazas, aunque si es posible señalar que las obras de mitigación ejecutadas sirven para mejorar la resistencia del sistema en términos generales. Adicionalmente, la empresa sanitaria también considera como factor de riesgo el aumento explosivo de habitantes en campamentos ilegales y tomas de terreno no autorizadas cerca de la red de agua potable, específicamente de la Alimentadora Norte (Aguas Antofagasta, 2012), pudiendo comprometer la continuidad del suministro para los sectores abastecidos por esta fuente.

Complementario a las medidas adoptadas por la empresa sanitaria, y teniendo en cuenta los antecedentes de eventos de remociones en masa registrados en la ciudad de Antofagasta, en especial el ocurrido en 1991 (SERNAGEOMIN, 2015), la Dirección de Obras Hidráulicas (1999) del MOP realizó un estudio para el diseño de sistemas de disipación de energía aluvional en las principales quebradas del escarpe costero de la ciudad, considerando para ello la intervención de 8 quebradas en la ciudad, de las cuales se han ejecutado 6 obras hasta la fecha y cuya localización se muestra en la Cartografía 18. Estas obras de mitigación constan de disipadores de energía, piscinas decantadoras y muros contenedores, reduciendo la vulnerabilidad del Sector Prat y de la Alimentadora Norte y la Aducción Cerro Moreno en el caso de las obras en la Quebrada Farellones, incluyendo además los sectores abastecidos por estas conducciones, mientras que los sistemas de disipación construidos en las quebradas El Ancla, Baquedano, Uribe y Cadena influyen en la vulnerabilidad de la Alimentadora Sur y sus respectivos sectores suministrados, reduciendo además la vulnerabilidad del Sector El Salto para esta última quebrada intervenida y del Sector Centro para

las otras tres, incluyendo además su estanque asociado. Por último, las obras de mitigación realizadas en la Quebrada del Carmen, además de ser las de mayor magnitud registradas, reducen la vulnerabilidad de los Estanques Caracoles y de todas las conducciones derivadas de ellos, además de influir especialmente sobre los sectores El Salto y Prat.

Cabe señalar que el grado de susceptibilidad a remociones en masa propuesto por el SERNAGEOMIN (2014) y considerado también para la presente investigación, incorpora la existencia de obras de mitigación en su zonificación, pero debido a que las obras en las quebradas Uribe y Farellones fueron ejecutadas posterior a la realización del citado estudio es que no fueron incorporadas en este y, por lo tanto, tampoco en la presente investigación. De igual manera, tampoco se han considerado las obras en las quebradas El Toro y Jardines del Sur, ambas incluidas dentro del plan de sistemas de disipación de energía aluvional, pero actualmente sin una fecha de implementación definida, y cuyos efectos se traducirían en una reducción de la vulnerabilidad de la Alimentadora Sur y del Sector Centro para la primera de ellas, mientras que una intervención sobre la segunda impactaría sobre una parte del Sector Sur, aunque no abarca infraestructura crítica para el abastecimiento hídrico. Finalmente, es importante destacar que los sistemas de disipación de energía aluvional identificados solo intervienen en la etapa de distribución de agua potable, y no se encontraron obras similares que reduzcan la vulnerabilidad del sistema de producción frente a remociones en masa.

9.3.3.3. Vulnerabilidad administrativa

Etapa	Mejora Infraes.	Activ. Capac.	Simu-lacros	Mecan. Vigilancia
Captac. Cordillera	X			X
Planta Desaladora	X	X	X	X

Tabla 61: Actividades de mitigación realizadas por Aguas Antofagasta

Fuente: Aguas Antofagasta (2015)

Como parte del tratamiento de los riesgos considerados para el abastecimiento hídrico de la ciudad de Antofagasta, el Plan de Emergencias (Aguas Antofagasta, 2015) plantea diferentes acciones para hacer frente a la ocurrencia de eventos que comprometan el suministro de aguas, como lo son las

mejoras en infraestructura, actividades de capacitación y simulacros, y la implementación de mecanismos de vigilancia. Las actividades, detalladas en la Tabla 61, están dirigidas específicamente a las captaciones de agua de cordillera y a la Planta Desaladora, aplicándose a esta última todas las actividades consideradas, mientras que en el sistema de cordillera solo se registran mejoras en la infraestructura y la incorporación de mecanismos de vigilancia. Cabe señalar que el plan de emergencias de Aguas Antofagasta (2015) no detalla las medidas de mitigación aplicadas para cada etapa considerada ni las asigna a alguna de las fuentes de riesgo identificadas para el sistema de abastecimiento hídrico, haciendo necesario la complementación con documentos de la empresa que especifican algunas de estas medidas, aunque esto tampoco asegura necesariamente una correlación directa entre las acciones para el tratamiento de riesgos y su inclusión dentro de los planes de emergencia y medidas de mitigación.

Tras la revisión de las memorias anuales (Aguas Antofagasta, 2012; 2015), es posible consignar que las dos principales amenazas al sistema de abastecimiento hídrico de Antofagasta también se enmarcan en las diferentes fuentes de producción de agua potable, siendo el Invierno Altiplánico asociado a la producción de agua de cordillera y considerado como un desafío anual en términos operativos, pese a la existencia de planes y medidas de contingencia, debido al impacto en la infraestructura derivado de procesos de remociones en masa y aluviones, además del exceso de turbiedad de las aguas captadas. En segunda instancia, para las fuentes de agua de mar

representadas en la Planta Desaladora de Antofagasta, las amenazas se centran en la presencia de elementos contaminantes y que puedan significar un riesgo, tanto en términos operacionales como en la salud de la población abastecida, como lo son un alto porcentaje de medusas y la marea roja, entre otros (Aguas Antofagasta, 2012; 2015). Es por esto que la empresa sanitaria cuenta con un amplio stock de repuestos críticos para la reparación de infraestructura de cordillera dañada por los efectos del Invierno Altiplánico (Aguas Antofagasta, 2014b; 2015), y posee programas de mantención y operación para hacer frente a la aparición de elementos que puedan comprometer la capacidad de abastecimiento para la ciudad, esto con el fin de generar una respuesta adecuada a la ocurrencia de los eventos señalados (Cerdeira, 2012).

9.3.3.4. Propuestas para la mitigación

A partir del impacto identificado por cada amenaza al sistema de abastecimiento hídrico de la ciudad de Antofagasta, así como de las deficiencias identificadas en las medidas de mitigación implementadas para el sistema en cuestión, y considerando que el fin último de una evaluación de vulnerabilidad para sistemas de agua potable es generar propuestas y medidas que permitan mejorar la seguridad en el abastecimiento (CEPIS, 2000), a continuación, se recogen las principales propuestas obtenidas a partir del desarrollo de la presente investigación, tomando como antecedentes los resultados de vulnerabilidad del sistema de abastecimiento frente a los diferentes factores de riesgo analizados y las propuestas realizadas por la OPS (1998) para la seguridad en redes de agua potable. Dichas medidas, diferenciadas según los diferentes componentes de vulnerabilidad abarcados en la investigación, como lo son el operativo, físico y administrativo, se resumen en la Tabla 62. En lo que respecta a los aspectos operativos de la vulnerabilidad del sistema de abastecimiento hídrico de la ciudad de Antofagasta, en primera instancia, es necesario asegurar la capacidad actual de abastecimiento que posee la empresa sanitaria, mitigando la vulnerabilidad del sistema de agua potable respecto a los diferentes factores de riesgo que pudieran comprometer su capacidad de suministro, y cuyas medidas específicas se detallan más adelante. Esto también se relaciona con una gestión integrada de las aguas urbanas, haciendo necesario un cambio de enfoque respecto al uso del recurso hídrico por parte de la ciudad y los hábitos de consumo de sus habitantes. Adicionalmente, es preciso incrementar la capacidad de abastecimiento hídrico de la ciudad, tanto por el incremento en la demanda hídrica producto del crecimiento urbano como por las deficiencias que presenta en el caudal. De igual manera, considerando la contraposición entre una ciudad abastecida con un caudal medio suficiente para el consumo urbano respecto a las diferencias de cantidad suministrada entre los sectores, que se traduce en un caudal deficiente para más del 65% de la población de la ciudad de Antofagasta, también es necesario revisar y redistribuir los flujos de agua potable en la ciudad, a fin de suministrar un caudal óptimo a todos los habitantes de la ciudad.

En cuanto a la continuidad del suministro hídrico, en base a la exposición del sistema a diferentes factores de riesgo, y a las características que presentan los cortes de agua registrados en la ciudad (SISS, 2015), así como las medidas identificadas para atender este aspecto de vulnerabilidad operativa, se propone contar con repuestos para reparar la infraestructura en caso de ser dañada, situación que en general se encuentra cubierta por parte de la empresa sanitaria para la producción de cordillera al disponer de repuestos críticos para asistir emergencias en la infraestructura de dicha fuente (Aguas Antofagasta, 2014b; 2015), y pese a que no fue posible encontrar referencias sobre la disponibilidad de repuestos para otros componentes del sistema, es necesario contar con stock de repuestos para asistir emergencias en las diversas etapas del abastecimiento hídrico de manera

Medidas de mitigación propuestas	
Vulnerabilidad Operativa	Contar con planes de operación y mantenimiento integrales que abarquen todo el sistema de abastecimiento, así como mantener un catastro actualizado de las actividades realizadas y un calendario de ejecución de nuevas actividades, priorizadas según su urgencia e importancia para el suministro hídrico de la ciudad.
	Reparar o reemplazar equipos con funcionamiento defectuoso, monitoreando permanentemente las operaciones de cada componente del sistema de abastecimiento.
	Contar con un stock permanente de repuestos y con medios propios que permitan atender emergencias importantes de forma inmediata en todo el sistema de abastecimiento, reduciendo la dependencia de proveedores externos.
	Implementar equipos generadores de emergencia en la infraestructura que lo requiera y que sea viable.
	Reemplazar la totalidad de tuberías de asbesto cemento existente en el sistema de abastecimiento hídrico de Antofagasta, mejorando la calidad del agua conducida y la resistencia de las redes de agua.
	Ajustar los procesos para la potabilización de agua en ambas fuentes de abastecimiento a fin de mejorar la calidad del suministro hídrico, mejorando el monitoreo de los parámetros de calidad de agua potable y trabajando directamente con los afectados por los persistentes problemas de calidad del agua.
Vulnerabilidad Física	Redistribuir el caudal de agua potable suministrado a la ciudad de Antofagasta, mejorando las condiciones de los sectores con abastecimiento deficiente.
	Reforzar la infraestructura de abastecimiento hídrico, enfocado en las zonas con alta exposición a las principales amenazas identificadas para el sistema.
	Implementar amortiguadores de golpes de ariete en las principales conducciones de agua potable de la ciudad.
	Ejecutar mantenencias periódicas a la infraestructura pronta a finalizar su vida útil y reemplazar la infraestructura envejecida, priorizando según su antigüedad.
Vulnerabilidad Administrativa	Capacitar y evaluar permanentemente al personal para la atención de emergencias, involucrando además a la población en la preparación para la ocurrencia de eventos que impacten el suministro hídrico de la ciudad.
	Complementar los planes de operación y mantenimiento con una corrección del plan de emergencias de la empresa sanitaria, contemplando un mayor detalle de los alcances de los diferentes factores de riesgo del sistema de abastecimiento hídrico y mejorar la disponibilidad en su acceso, incorporando además medidas de mitigación multiescalares y multitemporales.
	Reducir la dependencia de privados para la atención de emergencias, aumentando la cobertura de los recursos y repuestos disponibles a todo el sistema de abastecimiento hídrico.
	Implementar un enfoque sustentable para el desarrollo de la empresa sanitaria, que considere un acceso equitativo y adecuado al agua potable para sus clientes, una mejora en las prácticas de uso del agua en la ciudad y la dependencia de energías renovables para el abastecimiento hídrico.

*Tabla 62: Medidas de mitigación propuestas para el sistema de abastecimiento hídrico de la ciudad de Antofagasta
Fuente: Elaboración propia*

más efectiva. De igual manera, complementario a los mecanismos de vigilancia existentes, es necesaria la implementación de estos en toda la infraestructura de abastecimiento, a fin de monitorear permanentemente el estado y funcionamiento de los diferentes componentes, permitiendo una mejor intervención en caso de presentar funcionamiento defectuoso o nulo para su reparación o reemplazo respectivamente. Estas medidas, así como las específicas a cada factor de riesgo considerado en la presente investigación, permitirían reducir los alcances de los cortes de suministro hídrico para la ciudad de Antofagasta.

Por último, respecto al componente de calidad contenido en la vulnerabilidad operativa, y basado en las evaluaciones de calidad de servicio de agua potable (SISS, s/f b) que califican a la empresa de forma deficiente, y en la percepción negativa de la calidad del suministro por parte de los habitantes de la ciudad de Antofagasta (Monsalve, 2018), es prioritaria la implementación de medidas que permitan asegurar un suministro de calidad hacia la ciudad, como mejoras en los mecanismos de fiscalización de los parámetros de calidad del agua suministrada, o la implementación de nuevas tecnologías que contribuyan a mejorar estos parámetros dadas las condiciones del agua en sus fuentes, aunque estos se abordan de forma más específica a continuación. Cabe destacar que gran parte de los problemas identificados en los aspectos operativos del sistema de abastecimiento

responden a la ausencia de planes de operación y mantenimiento, así como del manejo de catastros de obras y proyectos de mejoras a desarrollar, claramente descritos y planeados, y que en conjunto contribuyan en mejorar las condiciones del sistema en general, mediante una planificación y gestión integral de estas medidas en todas las escalas y niveles. Así, es imperativa la implementación de estos planes para mejorar las condiciones del abastecimiento por parte de la empresa sanitaria.

Con respecto a las medidas propuestas para mitigar la vulnerabilidad física del sistema de abastecimiento hídrico de la ciudad de Antofagasta, basado en las obras y medidas de mitigación identificadas y en las recomendaciones generales de la OPS (1998) para reducir la vulnerabilidad física de sus componentes, para mitigar el impacto asociado a la ocurrencia de sismos y terremotos, aplicado tanto a los interplaca como a los de fallas, las principales medidas apuntan al reforzamiento estructural de los elementos en general y su relocalización, aunque en especial medida aquellos localizados en zonas de amplificación sísmica, así como también la infraestructura dañada o construida en materiales de mala calidad y las tuberías rígidas, como ocurre por ejemplo con el uso de asbesto cemento (OPS, 1998). De esta manera, el reforzamiento y relocalización de los componentes como medida de mitigación abarcaría todo el sistema de producción de cordillera, al igual que gran parte de la infraestructura de distribución, especialmente considerando la alta presencia del asbesto cemento en la red de distribución de agua potable. Otras de las medidas propuestas guardan relación con eventos provocados a partir de la ocurrencia de un sismo, como lo son las remociones en masa, evaluadas más adelante. En el caso de los tsunamis, casi cualquier tipo de defensa que se pueda implementar para mitigar su impacto resulta ineficaz a la hora de disminuir realmente el riesgo asociado a estos eventos, por lo que las medidas pasan por el desarrollo de actividades que permitan preparar a los actores responsables del manejo de catástrofes, al personal y a la población en general, para enfrentar apropiadamente los impactos de un tsunami, como capacitaciones, simulacros, entre otros. Algunas de estas medidas se contemplan en el Plan de Emergencias de Aguas Antofagasta (2015), aunque sin especificar la amenaza en la que se enfocan.

Entre las medidas para hacer frente a la amenaza de remociones en masa identificada en el caso de estudio, todas asociadas también los efectos del Invierno Altiplánico y de los sismos como factores detonantes de este tipo de eventos, se cuentan únicamente los sistemas de disipación de energía aluvional construidos en las principales quebradas que representan una amenaza para la ocurrencia de este tipo de eventos en la ciudad de Antofagasta (Dirección de Obras Hidráulicas, 1999), aunque aún resta implementar estos sistemas en dos quebradas de las consideradas dentro del proyecto para reducir el impacto de aluviones en la ciudad. Estas obras influyen solo en parte de la distribución de aguas, específicamente en las aducciones de cordillera y en algunos estanques y sectores, por lo que según las recomendaciones de la OPS (1998), este tipo de obras también deben implementarse para el resto de quebradas y cuencas que representen una amenaza para el sistema de abastecimiento, que para el caso de Antofagasta aplica principalmente a gran parte de su capacidad de captación de aguas de cordillera, cuyas aducciones se encuentran expuestas a este tipo de fenómenos. También se sugiere la implementación de zanjas drenantes que redirijan el flujo del aluvión hacia zonas con menor impacto. Las otras medidas propuestas guardan relación con el reemplazo de las tuberías rígidas por otras flexibles y con una distribución de forma sinuosa a lo largo de su trazado, además de enterrar las tuberías en roca firme en caso de encontrarse en laderas muy inclinadas o con poco suelo de cobertura, y de ser posible, relocalizarlas hacia zonas menos expuestas (OPS, 1998). Considerando que todas las aducciones del sistema de cordillera son

superficiales o se encuentran semienterradas, estas últimas medidas propuestas implicarían una transformación completa de este sistema, mientras que, para la Planta Desaladora, la mayor parte de su infraestructura se encuentra enterrada y fuera del área amenazada por remociones en masa. Por último, se propone la forestación y mantención de cobertura vegetal como medida de mitigación, aunque esta medida no sería aplicable en el contexto de aridez de la región.

De las medidas propuestas por la OPS (1998) para mitigar el impacto de las erupciones volcánicas sobre sistemas de abastecimiento, que sugieren reubicar la infraestructura expuesta o implementar obras de protección de estas, como la cobertura permanente de estanques y desarenadores, y la construcción de muros de protección y obras similares a las de control aluvional, ninguna fue identificada en el área de estudio, aunque considerando el bajo impacto que tendría un evento de este tipo sobre el abastecimiento hídrico de Antofagasta, la ejecución de estas medidas no es prioritaria para asegurar el suministro de aguas hacia la ciudad. Por su parte, el cambio climático corresponde a un fenómeno con alcances globales, por lo que las medidas locales que se puedan adoptar para mitigar sus efectos tienen poca incidencia por sí mismas, ya que para el abastecimiento hídrico supondría una disminución en el caudal captado en la cordillera sin muchas posibilidades para revertir la situación (Percy & Oyoo, 2016). De esta manera, la construcción de una nueva planta desaladora que reemplace el abastecimiento de cordillera eliminaría los problemas asociados a la disponibilidad en las captaciones, pero debido al impacto ambiental asociado al proceso y a la generación de la energía que lo abastece, contribuye al peor escenario de cambio climático y genera una relación inversa entre ambas fuentes, por lo que el aumento de la disponibilidad de agua de mar significaría reducir la disponibilidad de agua dulce, no solo en Antofagasta, sino a nivel global. Las medidas propuestas en este sentido apuntan al uso de energías renovables para la producción de agua potable, aunque también extendiendo su uso hacia todos los procesos que requieran de electricidad a escala global, reduciendo el impacto actual que tienen las emisiones asociadas a la producción de energía eléctrica y mejorando las condiciones para una mayor disponibilidad hídrica.

Para la contaminación de las fuentes de abastecimiento hídrico, considerando que los elementos contaminantes de origen natural impactan de manera continua en el abastecimiento hídrico y que, pese a todas las mejoras implementadas, persiste la percepción negativa sobre la calidad del agua suministrada (Monsalve, 2018) y una evaluación deficiente de la calidad de servicio de la empresa sanitaria (SISS, s/f b). Sumado a ello, el impacto de la acción humana mediante la disposición de residuos en los cursos de agua y los eventos de derrames de sustancias contaminantes en las diferentes fuentes de abastecimiento actúan como agravantes para decaer en los parámetros de calidad del agua. Como parte de las medidas propuestas para mitigar la vulnerabilidad del sistema de abastecimiento hídrico de la ciudad de Antofagasta, es necesario implementar mejoras en la infraestructura y operaciones para asegurar un suministro hídrico que cumpla de manera efectiva con los parámetros de calidad necesarios para entregar un buen servicio de agua potable. Por otra parte, aunque las emergencias y eventos provocados por la acción humana que pueden contaminar las fuentes de abastecimiento hídrico son imprevisibles y su causa recae en las empresas responsables de la emisión, la empresa sanitaria también debe contar con planes de contención para atender la ocurrencia de estos eventos de forma eficaz. En la misma línea de las amenazas de origen antrópico, considerando que los accidentes provocados por terceros también son imprevisibles por su naturaleza, se hace compleja su prevención, aunque como medidas de mitigación, además de la relocalización y reforzamiento generales propuestos, se propone

complementar con barreras de contención en la red vial que se encuentre cercana a la infraestructura de abastecimiento de la ciudad. En cuanto al factor de riesgo que representa el elemento geopolítico analizado para el caso de estudio, considerando la escala de sus alcances, las medidas deben apuntar hacia una mejora en las relaciones internacionales, especialmente en la que involucra a Chile y Bolivia, países con una pugna histórica por el control del territorio, la que deriva finalmente en las demandas internacionales recientes y en curso con el país vecino.

Pasando a las amenazas clasificadas como tecnológicas, para el caso de los cortes eléctricos que pudieran afectar el abastecimiento hídrico en la ciudad de Antofagasta, complementario a la implementación de equipos generadores de emergencia en las plantas elevadoras de agua, y dada la imposibilidad de contar con estos equipos para satisfacer la alta demanda energética de la desalación, se recomienda un refuerzo general de toda la infraestructura encargada de producir y suministrar energía eléctrica para la desalación, a fin de reducir su exposición a la ocurrencia de cortes eléctricos por problemas en el sistema energético. En cuanto al envejecimiento de la infraestructura, es necesario reparar los equipos con funcionamiento defectuoso y reemplazarlos si no funcionan, si son inadecuados o se encuentran en mal estado de conservación (OPS, 1998), siendo aplicable a toda la infraestructura envejecida que podría presentar problemas de funcionamiento y que no se haya encontrado registro de obras en ellas, como lo son las captaciones San Pedro y Puente Negro para la producción, y para 9 de los 11 sectores de distribución con su red de distribución envejecida y sin aparentes mejoras, al igual que los estanques de 7 sectores. Por su parte, la infraestructura defectuosa que ya ha sido intervenida o que se encuentra en estado regular de conservación requiere del monitoreo permanente de sus condiciones operativas, como ocurre con el resto de la infraestructura de producción considerada como envejecida, así como con los estanques Ancla y Amarillos, y la red de distribución del Sector Bonilla al ser largamente intervenida.

En el caso de la materialidad, se sugiere el reemplazo de toda la red de distribución construida con asbesto cemento, ya que su uso impacta directamente en la calidad del agua y la salud de las personas (Sadler et al., 1984), además de ser el material más frágil de los identificados en el abastecimiento hídrico (CONAGUA, 2015). El uso del asbesto cemento es el material predominante y se encuentra muy extendido en la distribución, alcanzando más del 40% de la red y con predominio en casi todos los sectores, por lo que su reemplazo implicaría la ejecución de extensas obras en la ciudad. De esta manera, dada la dificultad de realizar esta mejora, se sugiere un plan a largo plazo que considere la antigüedad de las tuberías para su priorización en el reemplazo, y que tenga como fin la completa erradicación de este material en la red de distribución. Con respecto a los golpes de ariete, pueden mitigarse con la implementación de dispositivos amortiguadores, como lo son las válvulas controladas automáticamente, cámaras de aire y estanques de oscilación o reguladores de presión, que permiten mejorar la respuesta de las tuberías frente al incremento repentino de presión en su interior. Este tipo de dispositivos se identificaron en la etapa de producción, pero no así en la distribución, siendo imperativo su inclusión en las conducciones de agua potable de la ciudad para reducir la vulnerabilidad a este tipo de eventos.

La implementación de las diferentes medidas de mitigación, tanto de las identificadas como las propuestas, permiten reforzar el sistema de abastecimiento hídrico en general. De esta manera, considerando que las roturas y fallas en tuberías y equipos surgen como consecuencia de otros factores de riesgo, todas las medidas adoptadas que mejoren la seguridad del sistema de agua potable frente a cada uno de ellos contribuyen a reducir la vulnerabilidad general a la ocurrencia de

las roturas y fallas mencionadas. De igual manera, la evolución de la vulnerabilidad va también asociada a la evolución de sus fuentes de abastecimiento, ya que a las amenazas existentes para el sistema de cordillera vinieron a sumarse nuevas amenazas con la Planta Desaladora de Antofagasta, y un escenario futuro con abastecimiento únicamente con agua desalada supondría una desaparición de la vulnerabilidad asociada con el sistema de cordillera, así como también un incremento en la exposición a las amenazas que afectan a este sistema. De esta manera, además de mitigar la vulnerabilidad actual del sistema, se debe poner énfasis en asegurar la capacidad de abastecimiento de la actual Planta Desaladora, e incluir todas las recomendaciones y medidas de mitigación aplicables al momento de planificar y construir una nueva planta desaladora para completar el suministro futuro, resultando en una prevención de los impactos basada en la experiencia de la desaladora previa.

Finalmente, entre las medidas propuestas para reducir la vulnerabilidad de los aspectos administrativos del sistema de abastecimiento hídrico de la ciudad, además de la implementación de los planes de operación y mantenimiento, así como la elaboración de catastros con las obras y medidas implementadas en el sistema, es necesaria una revisión del Plan de Emergencias de la empresa sanitaria a fin de corregir y mejorar sus resultados, reevaluando la exposición del sistema de abastecimiento a las diferentes amenazas consignadas en la investigación y profundizando en detalle el impacto potencial de estos factores de riesgo. De igual manera, los planes deben incorporar claramente las medidas de mitigación efectuadas y propuestas para los componentes del sistema de abastecimiento, así como según las fuentes de agua, detallando también los factores de riesgo a los que se encuentran dirigidas. Estas medidas deben ser multiescalares, en cuanto a abarcar el sistema de abastecimiento hídrico en todas sus escalas y componentes, así como multitemporales al abarcar las diferentes etapas del evento, contemplando una preparación previa a la ocurrencia del evento, así como planes de acción frente a la ocurrencia de la emergencia, y las medidas contempladas para la etapa posterior a su ocurrencia, buscando la recuperación del sistema de abastecimiento. Resulta idóneo que estos planes y catastros sean accesibles a toda la población y promovidos por la misma empresa sanitaria, dado que es información crucial a la hora de mitigar los efectos de la ocurrencia de algún evento que impacte sobre el suministro hídrico.

Otra de las propuestas consta en la reducción de la dependencia de proveedores externos de bienes y servicios para la atención de emergencias, dado que es menos eficiente al enfrentar emergencias que requieren atención inmediata, mejorando la capacidad de respuesta a la ocurrencia de las amenazas consignadas. Para ello es preciso contar con equipos y recursos propios para atender emergencias sobre cualquiera de los componentes del abastecimiento hídrico, con prioridad en la infraestructura con mayor capacidad e influencia en el suministro de aguas para la ciudad. Por último, es necesaria la implementación de un enfoque sustentable en las operaciones de la empresa, abarcando para ello todas sus etapas y procesos, viéndose reflejado en los planes y medidas propuestos y ejecutados. Se debe garantizar el acceso óptimo y equitativo de agua potable para los habitantes de la ciudad de Antofagasta, así como mejorar las prácticas de consumo urbano en relación con su contexto de aridez y disponibilidad hídrica. A su vez, se debe promover el uso de energías renovables para el abastecimiento hídrico a largo plazo, minimizando el impacto asociado a la producción de agua con la intervención de sus fuentes de energía, y siendo el eje para el desarrollo hídrico para la ciudad en un futuro que contempla una alta dependencia energética para producir agua desalada y abastecer toda la ciudad de Antofagasta con esta fuente.

IV. Discusiones y conclusiones

10. Discusiones

A continuación, se analizan los resultados obtenidos en la presente investigación mediante su interpretación desde el marco de referencias propuesto. Aunque la magnitud del sistema de abastecimiento complejiza su análisis, fue posible evaluar su vulnerabilidad de forma integral, incorporando todos los aspectos operativos, físicos y administrativos asociados al manejo del riesgo. De igual manera, se revisa el impacto que ha tenido la incorporación de cada nueva fuente en los parámetros evaluados, realizando una proyección hacia un escenario con suministro hídrico realizado completamente a partir de agua desalada. También se reconocen las limitantes metodológicas que obstaculizaron la realización del estudio, así como los principales aportes obtenidos y recomendaciones para mejorar las condiciones de vulnerabilidad presentes en el abastecimiento hídrico analizado.

10.1. Vulnerabilidad del abastecimiento hídrico de Antofagasta

De la capacidad de producción de 1.850L/s de agua potable que posee el sistema de abastecimiento, definido a partir del caudal de diseño de las PTAP, solo se suministran 1.338L/s a la ciudad de Antofagasta, equivalente al 72% de la capacidad del sistema de abastecimiento, y aunque las fuentes de cordillera poseen mayor capacidad e infraestructura de producción, el 85% del caudal suministrado al sistema urbano proviene de la Planta Desaladora. Para la etapa de distribución, las aguas provenientes de fuentes de mezcla son las predominantes, abarcando el 70% de la capacidad de almacenamiento y el 57% del caudal suministrado, abasteciendo a cerca del 58% de la población de la ciudad, mientras que las aguas de cordillera y de mar representan cerca del 36% y 6% de la distribución de agua potable respectivamente. Pese a que el caudal medio suministrado a la ciudad de Antofagasta se encuentra dentro de lo recomendado para consumo urbano, cerca del 65% de la población recibe un caudal insuficiente, elevándose a un 85% para las fuentes de cordillera, mientras que en otros sectores triplican la media de la ciudad, denotando gran desigualdad en la distribución del suministro hídrico. A su vez, la diferencia en el caudal suministrado por habitante guarda relación con la densidad de población en el sector de distribución, ya que los sectores con mayor densidad son también los con un caudal inferior a la media urbana, por lo que la capacidad del sistema de abastecimiento hídrico de la ciudad no se condice con la demanda hídrica de sus habitantes. Según lo anterior, se establece que la Planta Desaladora puede cubrir sin problemas el caudal suministrado por todas las fuentes de abastecimiento hídrico, mientras que las fuentes de cordillera, además del suministro a sus sectores, puede cubrir poco más del 60% del caudal de agua de mezcla.

Con respecto a los indicadores operativos de continuidad del servicio y calidad del agua potable consignados en el presente estudio, pese a las diferencias entre sus magnitudes, en general todos están mal evaluados. A escala de los sectores de distribución, según los cortes de suministro registrados, la mayor continuidad la registran aquellos abastecidos por aguas de mezcla, mientras que la encuesta entrega un indicador mayor para las aguas de cordillera respecto a las otras fuentes. Lo mismo ocurre con la percepción de calidad del agua, con una mejor evaluación a las fuentes de cordillera. Las diferencias entre los indicadores obtenidos a partir de las evaluaciones de la SISS (s/f b) y de los cortes de suministro respecto a los que evalúan la percepción de los habitantes de Antofagasta pueden explicarse por el carácter subjetivo de esta última fuente de información

respecto a la representación cuantitativa realizada en las otras dos. Por su parte, las diferencias entre las citadas evaluaciones respecto a lo declarado por la empresa sanitaria para los indicadores operativos pueden darse por tres motivos. El primero sería que la empresa sanitaria esté en lo correcto acerca de la calidad del agua producida, relegando el problema a la etapa de distribución del recurso que alteraría sus características. Un segundo motivo sería que la información entregada por la empresa sanitaria sea errónea, denotando deficiencias en los sistemas fiscalización, mientras que un tercer motivo sería a partir de la conjunción de las dos causas anteriores, configurando el peor escenario y denotando los problemas de gestión a nivel de Aguas Antofagasta y de la institucionalidad hídrica. De esta manera, y considerando los parámetros operativos del abastecimiento hídrico de la ciudad de Antofagasta, es posible establecer un grado bajo de vulnerabilidad asociado a la capacidad del sistema de agua potable, y un grado alto asociado a la continuidad del servicio y la calidad del agua potable suministrada.

Respecto a los resultados obtenidos a partir de la evaluación de la vulnerabilidad física del sistema de abastecimiento hídrico de la ciudad de Antofagasta, el impacto y los alcances de las 17 diferentes amenazas analizadas dependen de su naturaleza y características de su ocurrencia, así como de la exposición del sistema a estos factores de riesgo. Además, existen amenazas que se encuentran relacionadas entre sí, tanto como factor detonante como de susceptibilidad del mismo sistema. De esta manera, la mayor amenaza al sistema de abastecimiento hídrico la constituyen los sismos tsunamigénicos, con un impacto total en la capacidad de producción de agua potable debido a la exposición del sistema de cordillera y de mar a terremotos y tsunamis respectivamente. Basado en el periodo de recurrencia y probabilidad de ocurrencia para cada uno de estos factores de riesgo (Tapia et al., 2000), estos eventos se alternarían entre terremotos normales y tsunamigénicos cada 120 años aproximadamente. Seguidamente, la exposición del sistema de abastecimiento hídrico al envejecimiento de su infraestructura constituye la segunda mayor amenaza al suministro de aguas de Antofagasta, y aunque su exposición se remite solo a las fuentes de cordillera en un 66,8% de su respectiva capacidad de producción, su impacto en la distribución se extiende sobre el 77% del caudal suministrado, con alcances en prácticamente la totalidad de la población de la ciudad. El envejecimiento, al constituir un factor de riesgo interno asociado a la resistencia de la infraestructura, impacta también en la vulnerabilidad del sistema al impacto de amenazas físicas, como las remociones en masa. Esta última amenaza, asociada al Invierno Altiplánico, es la tercera en importancia al impactar en la totalidad de la capacidad de producción de las fuentes de agua de cordillera, así como en el 33% del caudal suministrado a la ciudad, con alcances sobre el 64% de los habitantes de Antofagasta, especialmente en los sectores con abastecidos con esta fuente.

Como último factor de riesgo relevante para el sistema de abastecimiento analizado se encuentran los cortes eléctricos dado su impacto en la totalidad de la capacidad de producción de agua desalada, con un impacto mínimo esperado sobre el 45% del caudal total suministrado a la ciudad y sobre el 64% de la población urbana. Cabe destacar que este factor de riesgo, al depender de un sistema externo para el suministro de energía eléctrica, se encuentra condicionado por la exposición de este a sus propias amenazas, así como a la capacidad de sus generadores eléctricos de emergencia. De esta forma, el aspecto físico del abastecimiento hídrico de Antofagasta es altamente vulnerable a los efectos de la ocurrencia de estos cuatro factores de riesgo, consignados como los principales. Al comparar los resultados obtenidos mediante la evaluación de la vulnerabilidad física del sistema de abastecimiento hídrico analizado con lo expuesto en el Plan de Emergencias de Aguas

Antofagasta (2015), aunque existe coincidencia en cuanto a los terremotos, tsunamis y remociones en masa como algunos de los principales factores de riesgo que afectan el suministro de aguas, la empresa sanitaria le asigna grados menores de vulnerabilidad respecto a los identificados para el presente estudio. Además, el citado plan no contempla el impacto de algunas principales amenazas evaluadas en la presente investigación, como los cortes de suministro eléctricos y el envejecimiento de la infraestructura, al mismo tiempo que considera como factores de riesgo descontextualizados, como los incendios forestales y terrorismo.

Respecto a los parámetros administrativos analizados en la evaluación de vulnerabilidad, lo más destacado se refiere a la deficiencia del plan de emergencias y a la ausencia de planes de mantenimiento y operaciones, así como de catastros de las obras ejecutadas. Este problema repercute en todos los niveles, ya que el plan de emergencias es muy general y no cuenta con medidas de mitigación, mientras que el resto de los elementos se encuentran dispersos en la bibliografía consultada. Dado que la empresa sanitaria figura como el actor principal para el manejo de emergencias sanitarias en todas sus etapas, los problemas administrativos derivan en la vulnerabilidad del sistema de abastecimiento hídrico y en la capacidad de manejo de las amenazas y emergencias asociadas. De esta manera, la capacidad de respuesta de la empresa sanitaria para la atención de emergencias va a depender de las características del evento y de la magnitud y distribución del impacto, haciendo necesaria una evaluación específica para cada factor de riesgo consignado, a fin de tomar las acciones pertinentes para su óptima atención. Adicionalmente, la poca disponibilidad de recursos propios, complementado con la externalización para la mayor parte de medidas adoptadas para el manejo de emergencias, hacen que la empresa sanitaria solo sea capaz de manejar eficientemente y por sí misma la ocurrencia de eventos de baja magnitud, por lo que mientras mayor sea el impacto sobre el sistema de abastecimiento, su capacidad de respuesta será menor, haciendo que la vulnerabilidad administrativa sea directamente proporcional a la magnitud del evento. Considerando las características que presenta la continuidad del suministro de agua potable en la ciudad de Antofagasta, la capacidad de respuesta de la empresa para enfrentar emergencias sanitarias es deficiente, y surge como consecuencia de todos los parámetros evaluados previamente. De esta manera, es posible establecer la vulnerabilidad de los aspectos administrativos del abastecimiento hídrico con una magnitud alta, debido principalmente a las carencias en sus planes, la dependencia de proveedores externos y las características del servicio de agua potable suministrado a los habitantes de la ciudad de Antofagasta.

Como parte del tratamiento de riesgos previo a la ocurrencia del evento, la mayor parte de las medidas de mitigación identificadas constan de obras de mejoras y refuerzos en distintos componentes de la infraestructura de producción de cordillera, así como en la red y estanques de distribución en los sectores abastecidos con agua desalada y de mezcla. A su vez, las obras de disipación de energía aluvional implementadas por el MOP mitigan el impacto de los eventos de remociones en masa para la ciudad de Antofagasta y reducen la exposición de su sistema de abastecimiento hídrico. Adicionalmente, se identificaron actividades de capacitación y simulacros que sirven como preparación para enfrentar emergencias, aunque acotados solo a la Planta Desaladora, así como también la existencia de repuestos y recursos para la atención de emergencias de baja magnitud, requiriendo principalmente de proveedores externos de bienes y servicios para atender la mayor parte de emergencias en el sistema de abastecimiento hídrico. Cabe señalar que

las medidas se identificaron individualmente, y no como parte del Plan de Emergencias, pudiendo escaparse algunas obras y medidas que no hayan podido ser constatadas para el presente estudio.

De esta manera, como parte de las propuestas para mitigar la vulnerabilidad del sistema de abastecimiento hídrico de la ciudad de Antofagasta, se plantea una ampliación de la cobertura de las diferentes medidas identificadas y detalladas anteriormente hacia todo el sistema de abastecimiento hídrico, poniendo énfasis en la infraestructura mayormente expuesta a los principales factores de riesgo analizados, así como en los mecanismos de vigilancia y las actividades de capacitaciones y simulacros, complementado con la implementación de equipos y tecnologías que mitiguen la vulnerabilidad de determinados aspectos y componentes, como amortiguadores de golpes de ariete y equipos generadores de energía de emergencia en la infraestructura que lo requiera y sea viable, además de ajustar las operaciones para garantizar un suministro hídrico de buena calidad para la población abastecida. Sumado a lo anterior, se sugiere el reemplazo de la infraestructura que pueda comprometer la capacidad de abastecimiento del sistema, tanto por su antigüedad y estado de conservación como por su materialidad, este último con énfasis sobre el uso de asbesto cemento en las tuberías y conducciones. Igualmente, es necesaria la relocalización o soterramiento de infraestructura que se encuentre expuesta a amenazas naturales, así como una redistribución del caudal suministrado hacia la ciudad de Antofagasta, haciéndolo más equitativo para los habitantes de la ciudad, y mejorando la seguridad del abastecimiento hídrico de la ciudad.

Sin embargo, una de las principales medidas para la mitigación de la vulnerabilidad en el abastecimiento hídrico de Antofagasta corresponde a la elaboración de un plan de emergencias integral, que identifique de manera detallada el grado de exposición de sus componentes a diferentes factores de riesgo, al mismo tiempo que incluya medidas de mitigación para la vulnerabilidad en todos sus componentes, escalas y etapas. Gran parte de las deficiencias identificadas en el abastecimiento hídrico analizado surgen como consecuencia de un plan de emergencias que no logra atender correctamente la ocurrencia de eventos con impacto en el suministro hídrico, derivando en una mala preparación para hacer frente a los factores de riesgo involucrados. Tomando esto como base, el plan de emergencias integral debe ser capaz de llenar los vacíos y solucionar los problemas identificados en la atención de emergencias actual, buscando asegurar el suministro hídrico hacia los habitantes de la ciudad.

Tras la ocurrencia del evento que impacte sobre el abastecimiento hídrico de la ciudad de Antofagasta, inicia el proceso de respuesta a emergencias sanitarias según lo propuesto por la SISS (2011b), en donde Aguas Antofagasta, mediante sus mecanismos de vigilancia, debe evaluar las causas, efectos e impacto del evento, y si sus alcances para el abastecimiento hídrico son considerables, se activa el Plan de Emergencias (Aguas Antofagasta, 2015), informando del evento a la SISS y entre ambos lo hacen al comité de operaciones y emergencias del gobierno, siendo este y la empresa sanitaria los encargados de generar la respuesta a la ocurrencia de la amenaza, conformándose para ello el Comité de Emergencias de la empresa. A su vez, la SISS se encarga de informar a los medios masivos y a los clientes de la empresa sanitaria, así como de decretar el cierre de la emergencia en curso. De esta manera, una óptima preparación previa a la ocurrencia de los eventos catastróficos generaría una respuesta operativa y administrativa más eficaz, tanto durante como posterior a la emergencia. Sin embargo, tras el análisis del manejo de emergencias por la empresa sanitaria, y considerando las deficiencias en su Plan de Emergencias, cabe señalar que los mecanismos de vigilancia no abarcan todo el sistema de abastecimiento hídrico, así como el Plan de

Emergencias no detalla las acciones específicas a ejecutar tras la ocurrencia de alguno de los eventos analizados con impacto sobre el sistema de abastecimiento hídrico, salvo en lo que respecta a la contaminación de las fuentes de agua de mar y los efectos del Invierno Altiplánico sobre la producción de agua potable, por lo que las medidas frente a otras amenazas deben decidirse en el momento tras la conformación del Comité de Emergencias en lugar de ejecutar medidas premeditadas, retrasando la capacidad de respuesta al evento y sus alcances en el suministro hídrico. A su vez, la dependencia de proveedores externos supone otro factor que puede retrasar la capacidad de respuesta a los diferentes eventos, al requerir de apoyo externo para su atención.

Lo mismo ocurre con las medidas adoptadas posteriormente a las emergencias en el abastecimiento hídrico, en donde solo se identificaron medidas de reparación que son de carácter reactivas más que planificadas, requiriendo una evaluación del impacto y los daños para generar la respuesta para restaurar el servicio de agua potable. De esta manera, las medidas adoptadas durante y posterior a la emergencia van a depender de las características del evento, su impacto y la disponibilidad de recursos propios y de contratación de externos para su atención, por lo que las propuestas relacionadas con la elaboración del Plan Integral de Emergencias radican en contar con medidas previas a la ocurrencia del evento para su ejecución inmediata tras la ocurrencia de este, principalmente mediante repuestos y recursos propios de la empresa sanitaria, a fin de mejorar la capacidad de respuesta frente al impacto de los diferentes factores de riesgo revisados.

10.2. Evolución y proyecciones

El desarrollo y la evolución del sistema de abastecimiento hídrico de la ciudad de Antofagasta no ha sido uniforme a lo largo del tiempo, relacionándose directamente con el crecimiento urbano y su consecuente aumento en la demanda hídrica, y con la incorporación de nuevas fuentes de abastecimiento. De esta manera, la construcción de la Planta Desaladora de Antofagasta constituye el hito que define las etapas previas a su existencia, con abastecimiento únicamente proveniente de aguas de cordillera, y el actual con fuentes mixtas de abastecimiento. El primero de estos escenarios se caracterizaba por una capacidad del sistema limitada por la disponibilidad hídrica y los derechos de agua pertenecientes a la empresa sanitaria, sumado a la cantidad de centros urbanos dependientes de este sistema de producción y entre los cuales se reparte el caudal suministrado. Por su parte, las condiciones de extrema aridez predominantes en la zona y la escasa disponibilidad hídrica llevaban al racionamiento del suministro de agua potable durante la mayor parte de la historia de la ciudad de Antofagasta, contando con un suministro continuo desde la década de 1990 (Maino & Recabarren, 2011). A su vez, la calidad del suministro se encontraba marcada por las altas concentraciones de arsénico inorgánico en las fuentes de captación de agua, así como de contaminantes producto de la actividad minera desarrollada extensivamente en la región (Maino & Recabarren, 2011). En términos de su vulnerabilidad física, la gran extensión del sistema de producción de cordillera lo hacen altamente expuesto al impacto de los diferentes factores de riesgo identificados para este, siendo especialmente susceptible a los efectos del Invierno Altiplánico como amenaza permanente con recurrencia anual. Cabe señalar que en el periodo que abarca este escenario ocurrió la mayor parte de la evolución institucional y administrativa, pasando de una dependencia estatal para los servicios sanitarios durante la mayor parte del siglo pasado, hacia su privatización a finales de este, así como la externalización de todo lo referente al abastecimiento hídrico de la ciudad (Miranda, 2015). De igual manera, se destaca la ausencia de un plan de emergencias, ya que la Ley de Servicios Sanitarios no la exigía a la fecha.

Para el escenario actual, con un abastecimiento hídrico proveniente de fuentes mixtas de suministro, y el cual es el principal analizado en la presente investigación, desde que la Planta Desaladora inició sus operaciones hasta la actualidad, la capacidad de producción del sistema de agua potable de la ciudad de Antofagasta se ha incrementado en un 85%, mismo porcentaje que se estima que representa el agua desalada en el caudal suministrado para abastecer la demanda hídrica urbana, siendo entonces la principal fuente de aguas para la ciudad. A su vez, toda la nueva infraestructura construida durante el escenario actual para el abastecimiento de agua potable está destinada al suministro total o parcial de agua desalada, sin registrarse incorporaciones importantes para las fuentes de agua de cordillera. Cabe destacar que cerca del 25% de la capacidad de almacenamiento y de la red de distribución de agua potable que existe actualmente en la ciudad fueron construidas durante los últimos 15 años marcados por la desalación de agua para el suministro hídrico, siendo el mayor incremento de infraestructura registrado en la ciudad respecto a periodos similares. De igual manera, la implementación y ampliación de la Planta Desaladora han permitido incrementar el caudal diario por habitante en cerca de un 29% respecto al escenario previo de abastecimiento únicamente con aguas de cordillera. El fuerte crecimiento de la capacidad de suministro hídrico registrado para el escenario actual respecto al abastecimiento a partir de fuentes de cordillera se condice con la privatización del sector sanitario y el incremento en tarifas e inversión para los servicios de agua potable (Maino & Recabarren, 2011; Donoso & Hantke, 2007).

Pese a que este incremento en la capacidad podría suponer una mejora en la continuidad del servicio de agua potable, los indicadores muestran la tendencia contraria. Lo mismo ocurre con los parámetros de calidad del agua suministrada, ya que mientras la mezcla de ambas fuentes contribuye a reducir las concentraciones de elementos contaminantes asociados a las aguas de cordillera, los indicadores muestran una tendencia negativa asociada al agua desalada. Adicionalmente, la incorporación de esta nueva fuente para el abastecimiento hídrico de la ciudad de Antofagasta supuso la exposición del sistema a nuevos factores de riesgo específicos para el agua de mar, como su contaminación y los cortes eléctricos, a la vez que se reducen los alcances de las amenazas a la producción con aguas de cordillera respecto a la capacidad total del sistema. En términos administrativos, pese a que los Planes de Emergencia son requeridos desde el 2005 y representan un aporte significativo para el tratamiento de riesgos, las deficiencias del plan de Aguas Antofagasta y su manejo de emergencias abordado previamente ponen en disputa la relevancia y eficacia que ha tenido su implementación respecto a los parámetros de vulnerabilidad evaluados.

Considerando que la implementación de cada nueva infraestructura para la producción de agua potable implica un impacto positivo en la disponibilidad hídrica para el abastecimiento de la ciudad de Antofagasta, y que el sistema de producción de agua de cordillera se encuentra expuesto una mayor recurrencia y magnitud de factores de riesgo, haciéndolo más vulnerable que la Planta Desaladora y el sistema de producción con agua de mar, la construcción de una nueva planta desaladora considerada para el escenario futuro de abastecimiento hídrico de la ciudad contribuiría al incremento del caudal disponible, y al reemplazar al sistema de producción de cordillera y superarlo en capacidad, la ciudad se dependería únicamente de la producción de ambas desaladoras, liberando el caudal producido a partir de las fuentes de cordillera para el abastecimiento del resto de localidades dependientes de él. Sin embargo, en cuanto a los parámetros de continuidad del servicio y calidad del agua potable, en caso de seguir la tendencia deficiente registrada actualmente para el agua desalada en ambos indicadores, el cambio hacia un

suministro total con agua desalada podría suponer una acentuación de la mala evaluación y percepción que existe sobre estos parámetros, haciendo necesaria la implementación de medidas que permitan mejorar esta condición, especialmente a partir de la gestión del recurso y de la implementación de tecnologías que puedan asegurar parámetros operativos óptimos.

En cuanto a los aspectos físicos del sistema de abastecimiento hídrico, considerando que la construcción de una nueva planta desaladora y la dependencia de esta única fuente también modificaría la exposición del sistema de abastecimiento hídrico de la ciudad, ya que mientras las amenazas asociadas específicamente a las fuentes de cordillera ya no comprometerían el suministro de aguas hacia Antofagasta, las amenazas que afectan a ambas fuentes en la actualidad reducirían su impacto, mientras que las amenazas específicas al agua desalada se verían acentuadas para todo el suministro hídrico. Sin embargo, debido a que no existe claridad sobre la localización de la nueva infraestructura asociada a una futura planta desaladora, no es posible definir las amenazas específicas y el grado de exposición a ellas que tendría esta nueva fuente, pero dadas las similitudes con la actual Planta Desaladora en cuanto a sus operaciones, se sabe que se expondría a algunas de las mismas amenazas que la planta existente por su naturaleza en común, como lo son la marea roja y contaminación del mar, tsunamis y cortes eléctricos. De este modo, algunas de las consideraciones para una nueva planta desaladora en la ciudad de Antofagasta son la construcción de la mayor parte de su infraestructura fuera del área de inundación por tsunamis, especialmente el proceso de filtrado y potabilización, reduciendo al mínimo su exposición únicamente con sus tuberías de captación y descarga. Además, considerando que el elevado consumo de energía requerido por el proceso de desalación requiere de infraestructura específica para su generación y transmisión hasta la planta, es que sería prioritario una evaluación exhaustiva que permita reducir la vulnerabilidad del suministro eléctrico al mínimo posible, buscando con ello asegurar la capacidad de abastecer la demanda energética de la planta desaladora y la continuidad de sus operaciones. Por su parte, la presencia natural y antrópica de contaminantes requiere de evaluación específica, ya que, aunque actualmente existe la capacidad para hacer frente a eventos de marea roja, no es posible definir los alcances que tendrían eventos como los derrames de petróleo para la producción de agua desalada, salvo los ya abordados para la actual planta desaladora.

Es difícil definir el curso que tomará el abastecimiento hídrico en términos administrativos, ya que las decisiones corresponden a la empresa sanitaria bajo el marco normativo institucional vigente. Sin embargo, es posible proponer algunas recomendaciones considerables para el futuro del abastecimiento, especialmente en el contexto de una transformación del suministro hídrico a fuentes exclusivamente de mar. Lo primero y más importante es realizar mejoras en el Plan de Emergencias de la empresa sanitaria, analizando en profundidad y con mayor nivel de detalle el impacto de los diferentes factores de riesgo sobre los componentes del sistema y el abastecimiento en general. Este a su vez debe complementarse con nuevos planes de mantención y operaciones, así como planes de mitigación para cada una de las etapas de la emergencia, previniendo los impactos y definiendo las directrices para actuar frente a la ocurrencia de la emergencia y posterior a ella. También es importante contar con un catastro actualizado de las medidas implementadas, a fin de evaluar la incorporación de nuevas medidas en función de la exposición y vulnerabilidad de la infraestructura intervenida, tornando más eficiente el tratamiento de riesgos. Sin embargo, uno de los puntos más importantes lo constituye la adopción de un enfoque sustentable para las

operaciones de la empresa sanitaria, orientado a otorgar un suministro continuo y de calidad a los habitantes, así como también la incorporación de energías alternativas y procesos ecológicos.

10.3. Limitantes metodológicas, recomendaciones y aportes

La realización de la presente investigación no estuvo exenta de limitaciones que complejizaron profundamente su desarrollo y coartaron la precisión y confiabilidad de los resultados obtenidos. De esta manera, se identificaron dos grandes limitantes para el presente estudio. La primera fue el acceso y disponibilidad de información, dado que gran parte de los datos del sistema de abastecimiento hídrico de la ciudad que no estaban disponibles para su consulta inmediata, debieron ser solicitados para su acceso mediante Ley de Transparencia, siendo estos en su mayoría deficientes o se encontraban incompletos, incluso con presencia de información errónea, debiendo repetir el proceso varias veces para corroborar la situación y realizando correcciones o completando la información faltante mediante la consulta de fuentes complementarias, además de notificar los problemas en los datos a las instituciones encargadas. En esta misma línea, cabe señalar los problemas suscitados por la ausencia de información demográfica detallada desde el año 2002 ya que, dada la ilegalidad del Censo 2012 y la disponibilidad de datos del Censo 2017 a escala comunal como máximo a la fecha de término de la investigación, la mayor parte de la información debió ser complementada a partir de fuentes secundarias, impactando en negativamente la representatividad de las características demográficas incorporadas en la investigación.

La segunda gran limitante consiste en la escasa disponibilidad de recursos en relación con la magnitud y escala de la evaluación y análisis efectuados, ya que el contexto académico de pregrado en el que se desarrolla la presente investigación no permitió obtener en todos los casos información de fuentes primarias ni la realización de levantamientos exhaustivos en terreno, precisando el uso de fuentes secundarias o la adaptación de algunas metodologías al contexto de la investigación. A modo de ejemplo, el estudio de geología para el ordenamiento territorial en la zona de Antofagasta realizado por el SERNAGEOMIN (2014) que analiza el componente físico y sus peligros asociados a una escala levemente superior al área urbana de la ciudad, fue financiado por un organismo que depende del Ministerio de Minería, uno de los más importantes para el país y la región dada la trascendencia de la actividad minera en la economía local y nacional, y ejecutado por un equipo multidisciplinar de 11 investigadores, sin contar el equipo de edición y publicación del documento, contraponiéndose radicalmente con el contexto de la presente investigación.

Como parte de las recomendaciones surgidas a partir de la evaluación de vulnerabilidad realizada, un eje fundamental lo constituye la transformación hacia un enfoque integral y sustentable por parte de la empresa sanitaria, que tenga como prioridad entregar a los habitantes de la ciudad de Antofagasta un suministro óptimo de agua potable en todos sus parámetros. Este enfoque se traduce en cambios en la gestión de las aguas urbanas, así como en los aspectos operativos del suministro hídrico y en los hábitos de consumo asociados, incluyendo también una reconversión al uso de energías renovables y al manejo sustentable del proceso de producción y distribución del agua, garantizando un acceso equitativo, suficiente y de calidad para la población de la ciudad de Antofagasta. Asimismo, se debe abogar por mejorar la seguridad del abastecimiento hídrico en un sentido amplio mediante la mitigación de su vulnerabilidad y exposición a las diferentes amenazas identificada, considerando además el carácter dinámico de los factores de riesgo a fin de ajustar permanentemente los procesos y los planes de emergencia, así como las actividades previas, durante y posteriores a la ocurrencia del evento.

Es importante destacar que, a pesar de las deficiencias y problemas identificados a partir de la evaluación de vulnerabilidad efectuada, los servicios sanitarios entregados por Aguas Antofagasta cumplen las normativas vigentes y no generan mayores reparos por parte de la SISA, organismo encargado de su fiscalización, por lo que en una escala mayor de análisis, los problemas detectados recaen finalmente en la incapacidad de la institucionalidad y normativa vigente para asegurar la seguridad en el abastecimiento hídrico, haciendo necesario un cambio en la visión de los servicios sanitarios en todos los niveles y escalas, otorgándole un enfoque que considere su importancia para el desarrollo urbano y que busquen mejorar la seguridad en el suministro hídrico para las personas.

Para el futuro del suministro hídrico de la ciudad de Antofagasta, existen dos factores importantes a considerar. En primera instancia, el cambio climático implica irreversiblemente una reducción del caudal disponible en las fuentes de cordillera, y la magnitud de su impacto se encuentra directamente relacionada con la acción humana, entre las que la producción de agua desalada contribuye a magnificar la reducción del caudal. Por otra parte, es importante destacar que las medidas de mitigación propuestas para el sistema de producción de cordillera son muy costosas e incluso inviables en ciertos casos, por lo que sumado al contexto de aridez del área de estudio, y que el fin de la mitigación es mejorar la seguridad hídrica de la ciudad de Antofagasta, puede resultar más conveniente la implementación de una nueva planta desaladora de agua, aumentando la capacidad del sistema de abastecimiento y conservando la infraestructura de cordillera como respaldo. Sin embargo, es recomendable que esta nueva implementación se integre con una mejora en la gestión del recurso hídrico, a la vez que adopte un enfoque sustentable en sus operaciones.

Entre los principales aportes de la presente investigación, cabe destacar el enfoque holístico con el que fue abordada la vulnerabilidad del abastecimiento hídrico de Antofagasta, conjugando múltiples metodologías, fuentes de información y datos para la evaluación, y buscando abarcar todos los aspectos propuestos por el CEPIS (2000) aplicados al caso de estudio. Igualmente, el análisis de vulnerabilidad sirve como base para la elaboración de planes para la atención de emergencias al identificar y caracterizar las amenazas a las que se expone el sistema de abastecimiento hídrico, así como las debilidades físicas de sus componentes, de los sistemas de apoyo de la empresa sanitaria y de los parámetros operativos del suministro. De igual manera, estos tienen como objetivos centrales la definición de medidas de mitigación que reduzcan el impacto de los factores de riesgo identificados, así como los procedimientos y acciones necesarias para atender la emergencia de forma eficaz con los recursos existentes. Aunque la presente investigación se centra en la vulnerabilidad del sistema de abastecimiento hídrico de Antofagasta, no pretende limitarse solo a señalar las debilidades y problemas asociados al suministro hídrico de la ciudad, sino también generar propuestas para mitigar los efectos de los factores de riesgo analizados y mejorar la seguridad del suministro hídrico hacia la población abastecida, sirviendo como base para una profundización en el tema y para la elaboración de un nuevo plan de emergencias según las directrices propuestas previamente, mediante la superación de las limitantes presentadas en la presente investigación a fin de obtener resultados más representativos. De igual manera, cabe señalar que al margen de las evaluaciones de vulnerabilidad asociadas a la elaboración de los planes de emergencia de las empresas sanitarias que exige la SISA, no fue posible identificar estudios similares a nivel nacional ni en el contexto de zonas áridas, por lo que la presente investigación puede servir como referencia metodológica para su replicación en otros casos de estudio similares.

Desde una perspectiva de la transversalidad de la geografía, considerando que la investigación comprendió una cuantificación de los factores de riesgo, así como de su impacto y probabilidad de ocurrencia, mediante la aplicación de modelos que permiten cuantificar los daños y generar medidas de mitigación, incorporando además la evaluación de la percepción de la población respecto a aspectos de vulnerabilidad, fueron abarcados e integrados todos los aspectos que debieran considerarse en una investigación holística e integral. De esta manera, los principales aportes desde la geografía surgen de la incorporación conjunta de las visiones objetivistas asociadas a las ciencias naturales e ingenieriles, referidas a la dimensión física de los impactos, y a las ciencias económicas mediante la revisión de la inversión, ambas complementadas con la visión cualitativa que suma la incorporación de las ciencias sociales mediante la evaluación de la percepción de la población. No es posible analizar por separado aspectos que se encuentran indisolublemente unidos, ya que no contemplar todos los factores involucrados produce una visión parcial en el análisis del fenómeno, y sus resultados no serían totalmente representativos para entender el panorama completo, por lo que la visión geográfica sobre el territorio es esencial para analizar los fenómenos que involucren la relación de la humanidad con su entorno.

11. Conclusiones

El abastecimiento hídrico en la ciudad de Antofagasta siempre ha estado condicionado por la escasa disponibilidad de agua en el desierto y las condiciones de aridez de la zona, mejorando paulatinamente tras la incorporación de nuevas fuentes e infraestructura, cada una con mayor capacidad que la anterior, siendo la incorporación de la Captación Toconce, la construcción de la NACA y de las PTAP del Salar del Carmen y la Planta Desaladora los hitos más importantes para el abastecimiento hídrico. Así, aunque la capacidad actual de producción de agua potable para la ciudad de Antofagasta asciende a 1.850L/s, concentrado principalmente en las fuentes de cordillera, la disponibilidad hídrica y los derechos de captación de agua en esta fuente hacen que el sistema opere al 72% de su capacidad total, suministrando mayormente agua desalada hacia la ciudad, con presencia en el 85% del caudal. Para la etapa de distribución, el caudal medio suministrado a la ciudad supera levemente los 200L diarios por habitante recomendados para consumo urbano, pero su distribución desigual hace que el 65% de la población reciba un caudal insuficiente, especialmente en los sectores abastecidos con agua de cordillera donde la escasez abarca el 85% de sus habitantes, quienes reciben en promedio cerca de 15L menos del caudal diario sugerido, alcanzando incluso un 60% de dicho caudal en los sectores más críticos. En contraste, la población abastecida por aguas de mezcla recibe un caudal similar a la media urbana, mientras que el sector La Chimba, único abastecido con agua desalada, supera ampliamente el caudal recomendado. A su vez, existe una relación inversa entre la densidad de población en los diferentes sectores y el caudal suministrado por habitante, dado que los sectores que presentan mayor densidad poblacional son también los que menos caudal reciben, por lo que el suministro hídrico hacia la ciudad de Antofagasta no se condice con la demanda hídrica producida por la concentración demográfica en los diferentes sectores de distribución de agua potable. Todos los parámetros de continuidad del servicio y calidad del agua potable para el caso de estudio se encuentran en general mal evaluados, con una tendencia negativa asociada a la presencia total o parcial de agua desalada en el suministro.

Se identificaron 17 amenazas, cada una con diferentes impactos y alcances, algunas de ellas interrelacionadas entre sí, y diferenciadas según la fuente de agua en la que impactan. Así, el sistema de producción de cordillera se encuentra expuesto a la ocurrencia de terremotos y los efectos asociados al Invierno Altiplánico, mientras que la producción de agua desalada está condicionada por el impacto de tsunamis y de cortes en el suministro eléctrico, todos con impacto en la totalidad de las respectivas fuentes. De esta manera, los sismos tsunamigénicos corresponde al mayor factor de riesgo físico al que se expone el sistema de abastecimiento, cuya ocurrencia impactaría transversalmente en la capacidad de producción y distribución de agua potable. Otro factor de riesgo relevante lo constituye el envejecimiento de la infraestructura, presente en gran parte de los componentes del sistema de abastecimiento hídrico de la ciudad, y que disminuye la resistencia de estos al impacto de algunas de las amenazas consignadas. De igual manera, considerando la predominancia del agua desalada en el caudal suministrado a la ciudad de Antofagasta, los efectos derivados de la ocurrencia de alguna de las amenazas para esta fuente impactarían en mayor medida sobre el suministro hídrico que los factores de riesgo para las fuentes de cordillera.

Al comparar los resultados obtenidos con lo expuesto en el Plan de Emergencias de Aguas Antofagasta, pese a que hay concordancia en reconocer los terremotos, tsunamis, remociones en masa, erupciones volcánicas e Invierno Altiplánico como factores de riesgo al sistema de abastecimiento hídrico de la ciudad de Antofagasta, existen diferencias en el grado de amenaza que

representan, magnificando el impacto de algunas y reduciendo el de otras respecto a lo identificado en la presente investigación. Siguiendo esta línea, en términos administrativos, el citado plan presenta la evaluación del riesgo de forma muy general, sin detallar el impacto de las amenazas sobre los componentes del sistema de abastecimiento hídrico ni medidas de mitigación específicas. Además, la escasa disponibilidad de recursos propios y la dependencia de proveedores externos de bienes y servicios para la atención de emergencias en el servicio de agua potable contribuyen a reducir la capacidad de respuesta de la empresa sanitaria, manifestado en los indicadores de continuidad deficientes obtenidos en la investigación. Cabe señalar que las medidas de mitigación para el sistema de abastecimiento hídrico realizadas por Aguas Antofagasta fueron identificadas individualmente, y se enfocan en el reemplazo y mejoras para el sistema de producción de cordillera y en la incorporación de tecnologías para monitorear y reducir la exposición de la infraestructura, sumadas a actividades de capacitación del personal de la empresa para la atención de emergencias y la realización de simulacros, y a las obras de disipación de energía aluvional ejecutadas por el MOP para mitigar la exposición de la ciudad a la ocurrencia de estos eventos.

Las medidas de mitigación propuestas en la investigación, en términos físicos, siguen una línea similar a las medidas identificadas, buscando reforzar la infraestructura en general, reparar aquellas con funcionamiento defectuoso, reemplazar las inoperativas o envejecidas junto a todas las tuberías de asbesto cemento, relocalizar componentes con alta exposición a amenazas naturales, implementar infraestructura de monitoreo y de apoyo en los componentes que lo requieran. Algunas de estas medidas también abarcan aspectos operativos del abastecimiento, pero deben complementarse con un ajuste en los procesos de potabilización a fin de mejorar la calidad del suministro hídrico, así como mejorar la capacidad de respuesta frente a la ocurrencia de eventos con impacto sobre la continuidad del abastecimiento hídrico. Para este último punto, es necesario también ampliar la disponibilidad de recursos y el stock de repuestos para la reparación de la infraestructura y la atención de emergencias en general. Las medidas propuestas deben enmarcarse en un nuevo plan de emergencias que incorpore las observaciones surgidas en la presente investigación, complementado con planes de operaciones y mantenimiento a escala de la empresa, al igual que planes de mitigación que contemplen medidas para cada etapa de las emergencias.

De esta manera, la vulnerabilidad del sistema de abastecimiento hídrico actual de la ciudad de Antofagasta se caracteriza en sus aspectos operativos por una capacidad de suministro equivalente al caudal recomendado para consumo urbano, mientras que la continuidad del servicio y la calidad del agua potable se encuentran transversalmente y de forma permanente mal evaluados. En cuanto a los aspectos físicos de la vulnerabilidad, el sistema se expone a un impacto total tras la ocurrencia de terremotos tsunamigénicos, mientras que los cortes eléctricos y los efectos del Invierno Altiplánico también son significativas, al igual que el envejecimiento de la infraestructura como factor debilitante de los componentes del sistema de abastecimiento. Para el componente administrativo de la vulnerabilidad evaluada, se destacan principalmente la deficiencia en el Plan de Emergencias de la empresa sanitaria, así como la ausencia de planes de operaciones y de mitigación, sumado a la poca disponibilidad de recursos propios debido a la externalización de la atención de emergencias, se traducen en una atención deficiente de las emergencias suscitadas para el suministro hídrico de la ciudad de Antofagasta.

Desde la incorporación de la desalación de agua de mar al suministro hídrico de Antofagasta, el caudal destinado a la ciudad se ha visto incrementado en un 85%, incrementando en un 29% el

suministro diario por habitante, lo que sumado a un incremento en el 25% de la infraestructura de distribución, representa el mayor crecimiento registrado en la historia del abastecimiento hídrico en comparación con periodos similares, implementando únicamente infraestructura para el suministro total o parcial con agua desalada. Sin embargo, considerando la evaluación asociada a esta fuente, su incorporación ha impactado negativamente en la continuidad y calidad del suministro hídrico. A su vez, aunque ayudó a reducir la exposición del sistema completo a las amenazas específicas para las fuentes de cordillera, la desalación también introdujo los nuevos factores de riesgo de cortes eléctricos, tsunamis y contaminación del mar, asociados a las características propias de esta nueva fuente, a la vez que incrementó el costo de la producción de agua potable para la ciudad por el elevado consumo energético de esta fuente. En términos administrativos, la elaboración de planes de emergencia inició posterior a la puesta en marcha de la Planta Desaladora, y considerando su importancia para el abastecimiento hídrico, la mayor parte de los estudios y medidas adoptadas se enfocan en asegurar las operaciones de esta fuente.

Basado en la proyección realizada a partir de la construcción de una nueva planta desaladora con 1.000L/s de capacidad, su incorporación al sistema de abastecimiento hídrico incrementaría en un 35% el caudal diario por habitante, reemplazando la totalidad de la capacidad de producción con fuentes de cordillera y liberándola para el abastecimiento del resto de localidades de la región. Sin embargo, el elevado costo energético de la desalación incrementaría en más del 60% el consumo de electricidad respecto al escenario actual. Pese a la tendencia negativa de los indicadores operativos del abastecimiento hídrico asociados al agua desalada, considerando el significativo incremento esperado en el caudal, se estima que la continuidad del servicio mejorará a largo plazo, mientras que la calidad del agua potable seguiría siendo deficiente. En cualquier caso, ambas variables son mejorables a partir de acciones que pueda ejecutar la empresa sanitaria para mitigar la vulnerabilidad operativa del suministro hídrico de la ciudad. Con respecto a la vulnerabilidad física del sistema de abastecimiento, desaparecería la exposición a las amenazas asociadas a las fuentes de cordillera, a la vez que los factores de riesgo identificados para la desalación impactarían la totalidad del abastecimiento hídrico. A su vez, para los aspectos administrativos analizados en la evaluación de vulnerabilidad, es difícil definir las acciones que se puedan tomar al respecto ya que dependen directamente de las decisiones adoptadas por la empresa sanitaria y de la normativa e institucionalidad vigentes, por lo que solo se pueden sugerir lineamientos en torno a mejorar el Plan de Emergencias actual e implementar planes en las distintas áreas que se requiera, especialmente referido a planes de mitigación para todos los factores de riesgo en cada una de sus etapas.

En base a lo anterior, considerando el elevado costo e inviabilidad de algunas recomendaciones para la mitigación de la vulnerabilidad en el sistema de producción de cordillera, y que se pretende aumentar la seguridad del suministro hídrico, la construcción de una nueva planta desaladora para abastecer Antofagasta se presenta como una alternativa más factible al incrementar el caudal suministrado a la ciudad y sus habitantes, siempre que su implementación sea bajo un enfoque sustentable, utilizando procesos ecológicos y fuentes de energía renovables, y se complemente con una mejora en la gestión del recurso hídrico urbano, asegurando el acceso por parte de la población a un suministro continuo y de calidad, así como la optimización en sus hábitos de consumo. Considerando el carácter dinámico de la vulnerabilidad, el abastecimiento hídrico debe ser capaz de adaptarse a sus cambios e influir en ellos mediante su mitigación.

V. Bibliografía

- Aguas Antofagasta (2004). *Memoria Anual 2004*.
- Aguas Antofagasta (2005). *Memoria Anual 2005*.
- Aguas Antofagasta (2006). *Memoria Anual 2006*.
- Aguas Antofagasta (2007). *Memoria Anual 2007*.
- Aguas Antofagasta (2008). *Memoria Anual 2008*.
- Aguas Antofagasta (2009). *Memoria Anual 2009*.
- Aguas Antofagasta (2010). *Memoria Anual 2010*.
- Aguas Antofagasta (2011a). *Actualización plan de desarrollo Antofagasta y Calama*.
- Aguas Antofagasta (2011b). *Memoria Anual 2011*.
- Aguas Antofagasta (2011c). *Planta Desaladora Sur Antofagasta*. Declaración de Impacto Ambiental.
- Aguas Antofagasta (2012). *Memoria Anual 2012*.
- Aguas Antofagasta (2013a). *Ampliación y actualización Planta Desaladora La Chimba*. Declaración de Impacto Ambiental.
- Aguas Antofagasta (2013b). *Memoria Anual 2013*.
- Aguas Antofagasta (2014a). *Ficha de antecedentes técnicos*.
- Aguas Antofagasta (2014b). *Memoria Anual 2014*.
- Aguas Antofagasta (2015). *Memoria Anual 2015*.
- Aguas Antofagasta (2017). *Información de zonas de facturación, clientes, consumo, producción y distribución de agua potable*.
- AIM (2013). *Informe actualización grupos socioeconómicos*.
- Alonso, C. (2008). *Programación óptima de la renovación de tuberías en un sistema de abastecimiento urbano: Análisis de los factores de influencia*. Tesis de Máster en Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente, Universidad Politécnica de Valencia.
- Álvarez, R. (03-07-2017). *La Haya: Chile presenta memoria de demanda contra Bolivia por Río Silala*. Diario La Tercera. Santiago, Chile.
- Amaya, C. (2005). *El ecosistema urbano: simbiosis espacial entre lo natural y lo artificial*. Revista Forestal Latinoamericana N°37, enero-junio de 2005, pp. 1-16. Mérida, Venezuela.
- Antequera, J. (2005). *El potencial de sostenibilidad de los asentamientos humanos*. Recuperado de <http://www.eumed.net/libros/2005/ja-sost/>
- Arce, I. (1930). *Narraciones históricas de Antofagasta*. Reedición de 1997, Ilustre Municipalidad de Antofagasta.
- Ariztía, R. & Fontaine, J. (27-03-2018). *En 60 días estará borrador de indicaciones a la reforma del Código de Aguas*. Diario Estrategia. Santiago, Chile.
- Astaburuaga, R. (2004). *El agua en las zonas áridas de Chile*. Revista ARQ N°57, julio de 2004, pp. 68-73. Santiago, Chile.
- Ávila, P. (2008). *Vulnerabilidad socioambiental, seguridad hídrica y escenarios de crisis por el agua*. Revista Ciencias N°90, abril-junio 2008, pp. 46-57. Universidad Nacional Autónoma de México, México DF.
- Banco Central (2012). *Boletín Mensual septiembre 2012*.
- Banco Mundial (2015). *World Development Indicators: Urbanization*. Recuperado de <http://wdi.worldbank.org/table/3.12/>

- Bermúdez, O. (1966). *Orígenes históricos de Antofagasta*. Editorial Universitaria. Santiago, Chile.
- Bhave, P. (1991). *Analysis of flow in water distribution networks*. Technomic Publishing Company Inc. Pensilvania, Estados Unidos.
- BID (2002). *Amenaza, vulnerabilidad, riesgo, desastre, mitigación, prevención: Primer acercamiento a conceptos, características y metodologías de análisis y evaluación*. Programa de Información e Indicadores de Gestión de Riesgos, Banco Interamericano de Desarrollo-CEPAL-Universidad Nacional de Colombia.
- BID (2003). *Chile: Planta Desalinizadora de Antofagasta*. Informe de Impacto Ambiental y Social.
- Bloch, R. (2004). *El Valor Del Agua Dulce en la Supervivencia de la Humanidad*. Agenda Internacional N°5, junio-agosto de 2005.
- Boon, G. (1977). *Consideraciones sobre la dependencia tecnológica*. Demografía y Economía N°1, pp. 37-53. Ciudad de México, México.
- BPIN (2002). *Marco teórico del Bando de Indicadores Sectoriales*. Departamento Nacional de Planeación, República de Colombia.
- Cardona, O. (2001). *Estimación holística del riesgo sísmico utilizando sistemas dinámicos complejos*. Universitat Politècnica de Catalunya, España.
- Carreño, M. et al. (2005). *Sistema de indicadores para la evaluación de riesgos*. Centre Internacional de Mètodes Numèrics en Enginyeria. Barcelona, España.
- Centro Mario Molina (2013). *Sistemas urbanos en zonas de extrema aridez: Propuestas para el manejo sustentable de agua*. Centro Mario Molina para Estudios Estratégicos sobre Energía y Medio Ambiente. Ciudad de México, México.
- CEPIS (2000). *Guías para el análisis de vulnerabilidad de sistemas de abastecimiento de agua potable y alcantarillado sanitario*. CEPIS-OPS-OMS. Lima, Perú.
- Cerda, W. (2012). *Evento de marea roja en operación de una planta desaladora*. 3° Seminario Internacional de Desalación Aladyr 2012. Antofagasta, octubre de 2012.
- CESC (2002). *Observación general N°15: el derecho al agua*. En ONU (2004). *Instrumentos Internacionales de Derechos Humanos: Recopilación de las observaciones generales y recomendaciones generales adoptadas por órganos creados en virtud de tratados de derechos humanos*. Organización de las Naciones Unidas.
- Chardon, A. (2008). *Amenaza, vulnerabilidad y sociedades urbanas: Una visión desde la dimensión institucional*. Revista Gestión y Medio Ambiente N°2, pp. 123-136. Universidad Nacional de Colombia.
- Comte, D. & Mora, C. (2009). *Antofagasta 1995, Tocopilla 2007*. Departamento de Geofísica, Universidad de Chile.
- CONAGUA (2015). *Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento*. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Gobierno de México.
- Cooley, H. et al. (2006). *Desalination, with a grain of Salt. A California perspective*. Pacific Institute, junio de 2006. Oakland, Estados Unidos.
- Cooperativa (15-02-2016). *El agua potable de 14 comunas de Chile no cumple con la norma sanitaria*. Radio Cooperativa. Recuperado de <http://www.cooperativa.cl/noticias/pais/servicios-basicos/agua/el-agua-potable-de-14-comunas-de-chile-no-cumple-con-la-norma-sanitaria/2016-02-15/070858.html/>

- Coy, M. (2010). *Los estudios del riesgo y desde la vulnerabilidad desde la geografía humana: Su relevancia para América Latina*. Revista Población & Sociedad N°17, pp. 9-28. Santa Rosa, Argentina.
- Cuéllar, R. (2012). *Geopolítica: Origen del concepto y su evolución*. Revista de Relaciones Internacionales N°113, mayo-agosto de 2012, pp. 59-80. Universidad Nacional Autónoma de México.
- De Mets, C. et al. (1994). *Effects of recent revisions to the geomagnetic reversal time scale on estimates of current plate motions*. Geophysical Research Letters N°20, pp. 2191-2194. American Geophysical Union, Washington DC, Estados Unidos.
- Delgado, L. et al. (2015). *Estrategia de adaptación local al cambio climático para el acceso equitativo al agua en zonas rurales de Chile*. Revista América Latina Hoy N°69, pp. 113-137. Universidad de Salamanca, España.
- DGA (1991). *Precipitaciones máximas en 1, 2 y 3 días*. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas. Santiago, Chile.
- DGA (2014). *Análisis integrado Río Loa, Región de Antofagasta*. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas. Santiago, Chile.
- Diario Oficial de la Unión Europea (15-04-2003). *Directiva que modifica el Consejo sobre la protección de los trabajadores contra los riesgos relacionados con la exposición al amianto durante el trabajo*. Recuperado de <https://www.boe.es/doue/2003/097/L00048-00052.pdf/>
- Díaz, C. (2014). *Metabolismo urbano: herramientas para la sustentabilidad de las ciudades*. Revista Interdisciplina N°2, pp. 51-70. Universidad Nacional Autónoma de México
- Diersing, N. (2009). *Phytoplankton Blooms: The Basics*. Florida Keys National Marine Sanctuary, Estados Unidos.
- Dirección de Obras Hidráulicas (1999). *Diseño definitivo de los sistemas de disipación de energía aluvional y vías aluvionales en la ciudad de Antofagasta*. Ministerio de Obras Públicas. Santiago, Chile.
- Donoso, F. & Hantke, M. (2007). *Desarrollo de la política chilena sobre agua potable y saneamiento*. Serie Estudios Socio/Económicos N °39. Corporación de Estudios para Latinoamérica. Santiago, Chile.
- Echarri, L. (2007). *El ecosistema*. Universidad de Navarra, Departamento de Zoología y Ecología.
- El Mercurio de Antofagasta (04-03-2011). *200 mil personas afectadas por crisis del agua*. Antofagasta, Chile.
- El Nortero (02-07-2014). *Arica, Iquique y Antofagasta sin electricidad por falla en sistema interconectado*. Recuperado de <http://www.elnortero.cl/noticia/arica-iquique-y-antofagasta-sin-electricidad-por-falla-en-sistema-interconectado/>
- El Nortero (04-05-2014). *SISS fiscalizó Planta de Tratamiento de Agua Potable Salar del Carmen en Antofagasta*. Recuperado de <http://www.elnortero.cl/noticia/sociedad/siss-fiscalizo-planta-de-tratamiento-de-agua-potable-salar-del-carmen-en-antofagasta/>
- ESSAN (1998). *Memoria Anual 1998*.
- ESSAN (1999). *Memoria Anual 1999*.
- ESSAN (2000). *Memoria Anual 2000*.
- ESSAN (2001a). *Proyecto Planta Desaladora de agua de mar para Antofagasta*. Declaración de Impacto Ambiental.
- ESSAN (2001b). *Memoria Anual 2001*.

- ESSAN (2002). *Memoria Anual 2002*.
- ESSAN (2003). *Memoria Anual 2003*.
- Fundación Nueva Cultura del Agua (s/f). *El agua en el medio urbano*. Recuperado de <http://www.fnca.eu/guia-nueva-cultura-del-agua/el-agua-en-el-medio-urbano/>
- Garcés, N. (27-04-2012). *Derrame de petróleo afecta costas de Antofagasta*. Radio Bio Bio. Recuperado de <https://www.biobiochile.cl/noticias/2012/04/27/derrame-de-petroleo-afecta-costas-de-antofagasta.shtml/>
- Garreaud, R. & Rutllant, J. (1996). *Análisis meteorológico de los aluviones de Antofagasta y Santiago de Chile en el período 1991-1993*. Revista *Atmósfera* N°9, pp. 251-271. Universidad Autónoma Nacional de México.
- Gentes, I. (2006). *El status jurídico y el debate entre derechos individuales y colectivos de aguas: Análisis de legislación, políticas hídricas y jurisprudencia sobre derechos de agua y gestión ciudadana en Chile*. Programa WALIR, CEPAL-ONU.
- Gironás, J. (2013). *Hacia un diseño urbano sensible al agua*. Revista AIDIS N°45, octubre de 2013, pp. 32-37. Santiago, Chile.
- Gobierno de Chile (10-10-2017). *La reforma al Código de Aguas en fiscalización y sanciones fue aprobada para ser ley*. Recuperado de <https://www.gob.cl/noticias/la-reforma-al-codigo-de-aguas-en-fiscalizacion-y-sanciones-fue-aprobada-para-ser-ley/>
- González, M. (2010). *Desalación para suministro de agua potable en el norte de Chile: Caso de Aguas de Antofagasta S.A.* 3° Seminario Internacional de Desalación Aladyr 2012. Antofagasta, octubre de 2012.
- González-Ferrán, O. (1995). *Volcanes de Chile*. Instituto Geográfico Militar. Santiago, Chile.
- GRAVITY (2001). *Fensibility Study Report on Global risk and vulnerability index-Trends per year*. United Nations Development Programme.
- GS INIMA (s/f). *IDAM de Antofagasta*. Madrid, España. Recuperado de http://www.inima.es/es/idam_antofagasta_chile/
- Gutiérrez, M. (24-04-2015). *Compra de sanitaria a Luksic se convierte en la mayor inversión de Colombia en Chile*. Economía y Negocios, Diario El Mercurio.
- GWP (2013). *Aumentar la seguridad hídrica: un imperativo para el desarrollo*. Recuperado de http://www.gwp.org/Global/GWP-SAM_Files/Publicaciones/Del-TEC/Aumentar-la-Seguridad-Hidrica.pdf/
- Higuera, E. (2009). *El reto de la ciudad habitable y sostenible*. Editorial DAPP. Pamplona, España.
- IDE (2017). *Catálogo Nacional de Datos Geoespaciales*. Recuperado de <http://www.geoportal.cl/geoportal/catalog/main/home.page/>
- INE (2013). *Actualización de población 2012-2020 y proyecciones 2013-2020*. Recuperado de http://historico.ine.cl/canales/chile_estadistico/familias/demograficas_vitales.php/
- INE (s/f). *Censos de población históricos*. Recuperado de http://historico.ine.cl/canales/usuarios/censos_digitalizados.php
- Kennedy, C., Cuddihy, J. & Engel-Yan, J. (2007). *The changing metabolism of cities*. Journal of Industrial Ecology N°2, pp. 43-59. Yale University. New Haven, Estados Unidos.
- La Nación (04-07-2010). *Cómo es vivir tomando el agua más cara de Chile*. Recuperado de <http://www.chilesustentable.net/como-es-vivir-tomando-el-agua-mas-cara-de-chile/>

- La Tercera (27-02-2016). *ONEMI: "Invierno Boliviano" deja 271 personas aisladas en el norte del país*. Recuperado de <http://www.latercera.com/noticia/nacional/2016/02/680-670084-9-onemi-invierno-boliviano-deja-271-personas-aisladas-en-el-norte-del-pais.shtml/>
- Lara, M. (2007). *Metodología para la evaluación y zonificación de peligro de remociones en masa con aplicación en quebrada San Ramón, Santiago Oriente, Región Metropolitana*. Tesis de Magíster. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Geología. Santiago, Chile.
- Larraín, S. (2006). *El agua en Chile: entre los derechos humanos y las reglas del mercado*. Revista Polis N°14, pp. 1-17. CEDER, Universidad de Los Lagos. Osorno, Chile.
- Lavell, A. (1996). *Degradación Ambiental, Riesgo y Desastre Urbano: Problemas y Conceptos*. En Fernández, M. (1996). *Ciudades en Riesgo*. Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina. Lima, Perú.
- Madariaga, R. (1998). *Sismicidad de Chile*. Université Denis Diderot, Département de Sismologie. Paris, Francia.
- Maino, V. & Recabarren, F. (2011). *Historia del agua en el desierto más árido del mundo*. Matte Editores. Santiago, Chile.
- Manns, P. et al. (2013). *Las batallas por el agua*. Ediciones Monde Diplomatique. Santiago, Chile.
- Martins, A. (22-03-2017). *¿Puede la desalinización ser la solución para la crisis mundial del agua?*. BBC Mundo. Recuperado de <http://www.bbc.com/mundo/noticias-39332148/>
- Michael, Z. (2009). *Golpe de Ariete*. National Environmental Services Center, West Virginia University. Recuperado de http://www.nesc.wvu.edu/pdf/dw/publications/ontap/2009_tb/spanish/water_hammer_DWF_SOM141.pdf/
- Miranda, M. (2015). *Gobernanza hídrica y gestión sanitaria: El modelo sanitario chileno y su desarrollo en la II Región de Antofagasta*. Universität Heidelberg, Master Governance of Risks and Resources. Heidelberg, Alemania.
- Miranda, O. (20-05-2016). *El irregular proceso de privatización de empresas estatales durante la dictadura*. Diario UChile. Recuperado de <http://radio.uchile.cl/2016/05/20/el-turbio-proceso-de-privatizacion-de-empresas-estatales-durante-la-dictadura/>
- Monjo, R. (2010). *El índice n de la precipitación intensa*. Departament de Física de la Terra i Termodinàmica, Universitat de Valencia, España.
- Monsalve, T. (2018). *(In)Seguridad hídrica a nivel doméstico: Análisis multidimensional en el caso de la ciudad de Antofagasta*. Memoria de Título. Universidad de Chile, Facultad de Arquitectura y Urbanismo.
- MOP (2012). *Plan Regional de Infraestructura y Gestión del Recurso Hídrico al 2021, Región de Antofagasta*. Ministerio de Obras Públicas, Dirección Regional de Planeamiento. Antofagasta Chile.
- Mora, S. (03-07-2017). *Los tres objetivos que busca Chile con la demanda a Bolivia por el río Silala*. 24 horas, Televisión Nacional de Chile. Recuperado de <http://www.24horas.cl/nacional/los-tres-objetivos-que-busca-chile-con-la-demanda-a-bolivia-por-el-rio-silala-2436684/>
- Morales, Y. (2000). *Análisis de vulnerabilidad de sistemas de abastecimiento de aguas*. Revista Científica de Ingeniería Hidráulica y Ambiental N°4, octubre del 2000, pp. 46-50. Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Facultad de Ingeniería Civil. La Habana, Cuba.

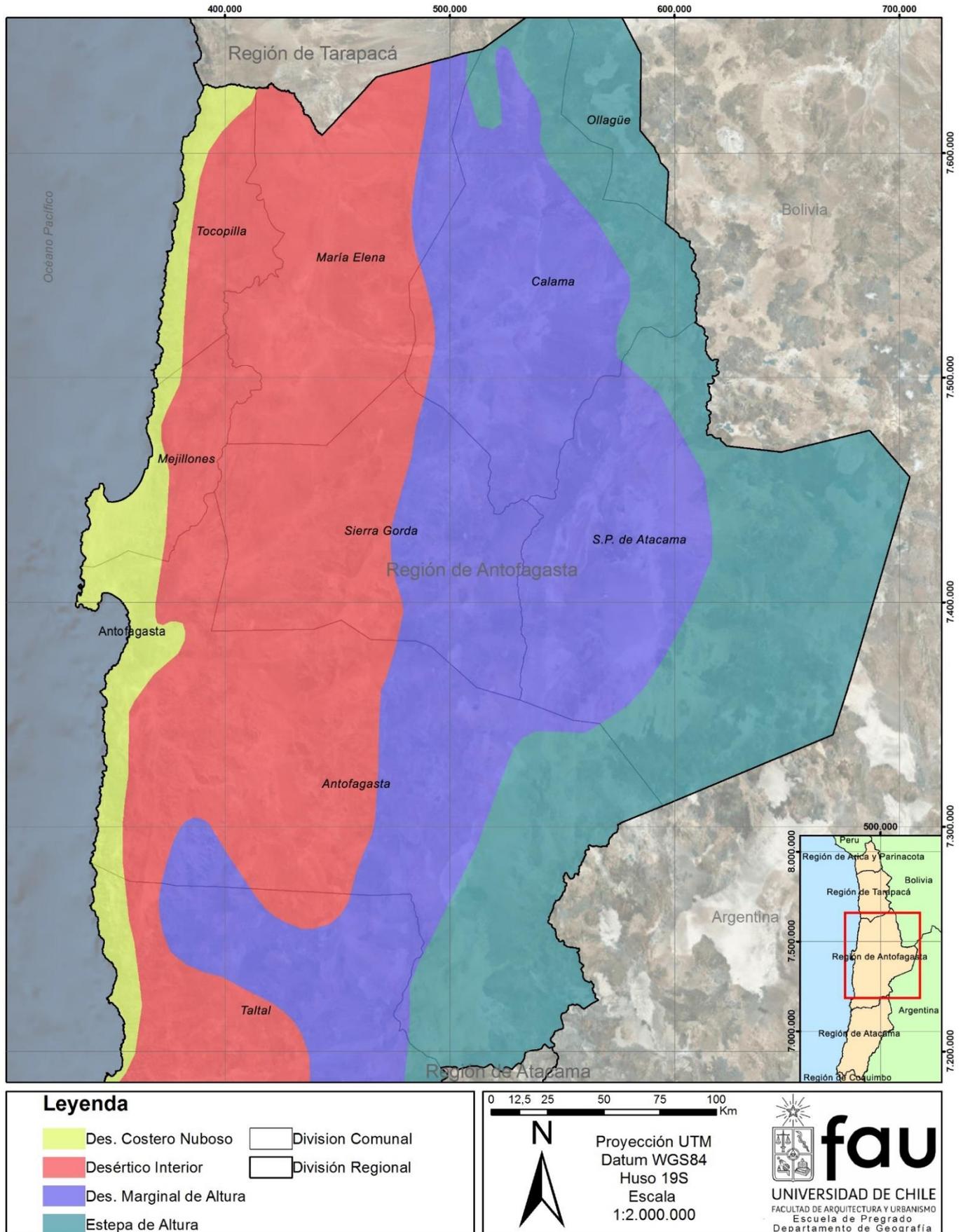
- Morandé, F. & Doña, J. (1997). *Los servicios de agua potable en Chile: condicionantes, institucionalidad y aspectos de economía política*. Banco Interamericano de Desarrollo.
- Morin, E. (1995). *Sociología*. Editorial Tecnos. Madrid, España.
- Mpodozis, C. & Ramos, V. (1989). *The Andes of Chile and Argentina*. Earth Science Series, Circum-Pacific Council for Energy and Mineral Resources N°11, pp. 59-90. Huston, Estados Unidos.
- Mundaca, R. (17-02-2012). *La privatización de las aguas en Chile viola los derechos humanos*. CIPER, Centro de Investigación Periodística. Recuperado de <http://ciperchile.cl/2012/02/17/la-privatizacion-de-las-aguas-en-chile-viola-los-derechos-humanos/>
- Muñoz, M. & Rauld, R. (2010). *Diagnóstico de Peligros Naturales en la zona Intercomunal Oasis Andinos, II Región de Antofagasta*. Habiterra Consultores. Santiago, Chile.
- Najjar, K. & Collier, R. (2011). *Integrated Water Resources Management: Bringing It All Together*. Water Resources Impact N°3, mayo del 2011, pp. 3-8. AWWA, Estados Unidos.
- NEHRP (2009). *NEHRP Recommended seismic provisions for new buildings and other structures*. National Institute of Building Sciences. Washington D.C., Estados Unidos.
- Nogales, M. (07-01-2013). *Más de 30 mil afectados por corte de agua*. 24 horas, Televisión Nacional de Chile. Recuperado de <http://www.24horas.cl/regiones/antofagasta/mas-de-30-mil-afectados-por-corte-de-agua-460763/>
- OMC (1994). *Acuerdo General sobre Aranceles Aduaneros y Comercio de 1994*. Recuperado de https://www.wto.org/spanish/docs_s/legal_s/gatt47.pdf/
- ONEMI (2012). *Mapa de riesgo regional: peligro volcánico y tsunami, Región de Antofagasta*. Repositorio Digital ONEMI, Ministerio del Interior y Seguridad Pública. Recuperado de <http://repositoriodigitalonemi.cl/web/handle/2012/375/>
- ONU (2010). *El derecho al agua*. Folleto Informativo N°35. OACDH-ONU HABITAT-OMS. Ginebra, Suiza.
- OPS (1998). *Mitigación de desastres en sistemas de agua potable y alcantarillado sanitario: Guías para el análisis de vulnerabilidad*. OPS-OMS. Washington DC, Estados Unidos.
- Ovalle, C. (04-03-2011). *Entrevista*. En La Nación (04-03-2011). *Aguas Antofagasta no se responsabiliza por los cortes en el suministro*. Recuperado de <http://lanacion.cl/2011/03/04/aguas-antofagasta-no-se-responsabiliza-por-los-cortes-en-el-suministro/>
- Peña, H. et al. (2004). *Mercados (de derechos) de agua: Experiencias y propuestas en América del Sur*. CEPAL-ONU. Santiago, Chile.
- Percy, F. & Oyoo, P. (2016) *Adaptation Good Practice Checklist*. Adaptation Learning Programme for Africa. CARE International. Londres, Inglaterra.
- Pereira, L. (26-03-2015). *Inédita evacuación de 50 mil personas por temor a aluviones*. La Estrella de Antofagasta. Recuperado de <http://www.estrellaantofagasta.cl/imprensa/2015/03/26/full/cuerpo-principal/3/>
- Pizarro, R. (1999). *Análisis de la gestión del agua en zonas áridas y semiáridas: una propuesta de actuación*. Revista CIDOB d'Afers Internacionals N°45-46, abril de 1999, pp. 11-33. Barcelona, España.
- Programa de las Naciones Unidas para el Medioambiente (2007). *Vulnerabilidad y resistencia hidropolíticas en aguas internacionales para América Latina y el Caribe*. Oregon State University-Universidad Nacional de Costa Rica. Estados Unidos.

- Ramírez, J. (27-12-2016). *Falla eléctrica evidenció serias vulnerabilidades en la desaladora*. El Mercurio de Antofagasta. Chile.
- Rivera, D. (2011). *Subsistencia y ajuste de antiguos derechos en base al uso efectivo de las aguas: El especial caso del reconocimiento de usos consuetudinarios*. Tesis doctoral, Pontificia Universidad Católica de Chile, Facultad de Derecho. Santiago, Chile.
- Rojas, M. (2012). *Consultoría para la elaboración de un estudio sobre estado del arte de modelos para la investigación del calentamiento global*. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.
- RTM (2016). *Antofagasta: Ampliación de desaladora dejó 85% de la ciudad abastecida con agua de mar*. Revista Técnicos Mineros. Recuperado de <http://www.revistatecnicosmineros.com/2016/11/antofagasta-ampliacion-de-desaladora-dejo-85-de-la-ciudad-abastecida-con-agua-de-mar/>
- Sadler, T. et al. (1984). *The use of asbestos-cement pipe for public water supply and the incidence of cancer in selected communities in Utah*. Journal of Community Health N°4, junio de 1984, pp. 285-293.
- Sánchez, J. & Sanhueza, R. (2000). *Autonomía y regulación en el sector sanitario chileno*. Revista Estudios públicos N°77, pp. 165-185. Centro de Estudios Públicos. Santiago, Chile.
- Saurí, D. (1995). *Geografía y riesgos tecnológicos*. Universitat Autònoma de Barcelona, Departament de Geografia. Barcelona, España.
- SEP (2003). *Memoria Anual 2003*.
- SERNAGEOMIN (2003). *Mapa geológico de Chile: Versión digital*.
- SERNAGEOMIN (2014). *Geología para el ordenamiento territorial: Área de Antofagasta*. Carta Geológica de Chile, Serie Geología Ambiental N°19. Santiago, Chile.
- SERNAGEOMIN (2015). *Registro de los principales desastres de origen geológico en Chile y efectos sobre la población y bienes públicos y privados entre 1980 y 2015*. Oficina de Comunicaciones- Unidad de Peligros Geológicos, SERNAGEOMIN. Santiago, Chile.
- SII (2002). *Tabla de vida útil de los bienes físicos del activo inmovilizado*. Recuperado de http://www.sii.cl/pagina/valores/bienes/bienes_f.htm/
- SISS (2006). *Estudio tarifario concesiones de servicios sanitarios de la Segunda Región de Antofagasta, periodo 2006-2011: Informe Final*.
- SISS (2011a). *Manual del consumo responsable para el hogar*. Serie del Consumo Responsable. Santiago, Chile.
- SISS (2011b). *Guía metodológica para la elaboración de planes de emergencia de empresas sanitarias*. Santiago, Chile.
- SISS (2011c). *Determinación de fórmulas tarifarias de concesiones de servicios sanitarios de la Segunda Región de Antofagasta: Informe Final*.
- SISS (2011d). *Indicadores de calidad de servicio: Fórmulas de cálculo*.
- SISS (2015). *Catastro de cortes de agua potable en Antofagasta*. Solicitud de información por Ley de Transparencia, abril de 2015.
- SISS (2016). *Informe de coberturas sanitarias*.
- SISS (2017). *Catastro de infraestructura de abastecimiento hídrico de Antofagasta*. Solicitud de información por Ley de Transparencia, enero de 2017.
- SISS (s/f a). *Historia del sector sanitario en Chile*. Recuperado de <http://www.siss.gob.cl/577/w3-article-3681.html/>

- SISS (s/f b). *Indicadores de calidad de Servicio*. <http://www.siss.gob.cl/577/w3-propertyvalue-3450.html/>
- Sola, J. (28-10-2012). *Los contaminantes del agua en Antofagasta*. Diario El Ciudadano. Santiago, Chile.
- Soto, C. (2014). *Administración y distribución de las aguas en Chile, organizaciones de usuarios del agua y rol de las juntas de vigilancia*. Recuperado de <http://www.cnr.gob.cl/Conozcanos/Chile%20Riega/Cristian%20Soto.pdf>
- Srinivas, H. (2009). *Urban Water Resources Management: An Integrated Urban Water Strategy*. Global Development Research Center. Recuperado de <http://www.gdrc.org/uem/water/urban-water.html/>
- Sustainable Solutions (2017). *Análisis del ciclo de vida de las tuberías de agua y alcantarillado de PVC y análisis comparativo de la sustentabilidad de los materiales de las tuberías*. [https://www.uni-bell.org/application/files/7715/0525/8559/Analisis del Ciclo de Vida de las Tuberias de Agua y Alcantarillado de PVC y Analisis Comparativo de la Sustentabilidad de los Material es de las Tuberias.pdf](https://www.uni-bell.org/application/files/7715/0525/8559/Analisis%20del%20Ciclo%20de%20Vida%20de%20las%20Tuberias%20de%20Agua%20y%20Alcantarillado%20de%20PVC%20y%20Analisis%20Comparativo%20de%20la%20Sustentabilidad%20de%20los%20Material%20es%20de%20las%20Tuberias.pdf)
- Tapia, P. et al. (2000). *Proyecto RADIUS: Herramientas de evaluación para el diagnóstico de zonas urbanas ante desastres sísmicos*. Universidad Católica del Norte. Antofagasta, Chile.
- Thornthwaite, C. (1948). *An approach towards a rational classification of climate*. Geographical Review N°38, enero de 1948, pp. 55-94. American Geographical Society. Nueva York, Estados Unidos.
- Timeline Antofagasta (16-02-2016). *Agua potable de Antofagasta retrocede en índices de calidad según informe de SISS*. Recuperado de <https://www.timeline.cl/2016/02/agua-potable-de-antofagasta-retrocede-en-indices-de-calidad-segun-informe-de-siss/>
- Torres, E. (2016). *Determinación de curvas IDF en la Región de Antofagasta, Chile*. Memoria de Título. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.
- Tucci, C. (2010). *Integrated urban water management in the humid tropics*. En Parkinson, J., Goldenfum, J., & Tucci, C. (2010). *Integrated Urban Water Management: Humid Tropics*. UNESCO-IHP, Urban Water Series. Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura.
- Van der Steen, P. (2006). *Integrated Urban Water Management: Towards Sustainability*. Primera Reunión Científica SWITCH 2006. University of Birmingham, Inglaterra.
- Vargas, G. (1996). *Evidencias de cambios climáticos ocurridos durante el Cuaternario en la zona de Antofagasta, II Región*. Departamento de Geología, Universidad de Chile.
- Vargas, G. et al. (2000). *Aluviones históricos en Antofagasta, Chile, y su relación con eventos El Niño/Oscilación del Sur*. Revista Geológica de Chile N°2, pp.157-176. Santiago, Chile.
- Vergara, A. (1991). *La Codificación del Derecho de Aguas en Chile (1875-1951)*. Revista de estudios histórico-jurídicos N°16, pp. 159-191. Ediciones Universitarias. Valparaíso, Chile.
- Vergara, A. (2014). *El acceso al agua potable y al saneamiento ante el derecho chileno*. Agua y derecho, retos para el siglo XXI: Reflexiones y estudios a partir del WaterLaw, pp. 199-228. Congreso Internacional de Derecho de Agua, octubre 2014. Universidad de Alicante, España.
- Villegas, P. (2016). *Mercantilización del agua urbana en el desierto: análisis comparativo de eficiencia en la distribución de agua entre la gestión pública y privada en la ciudad de Antofagasta*. Memoria de Título. Universidad de Chile, Facultad de Arquitectura y Urbanismo.

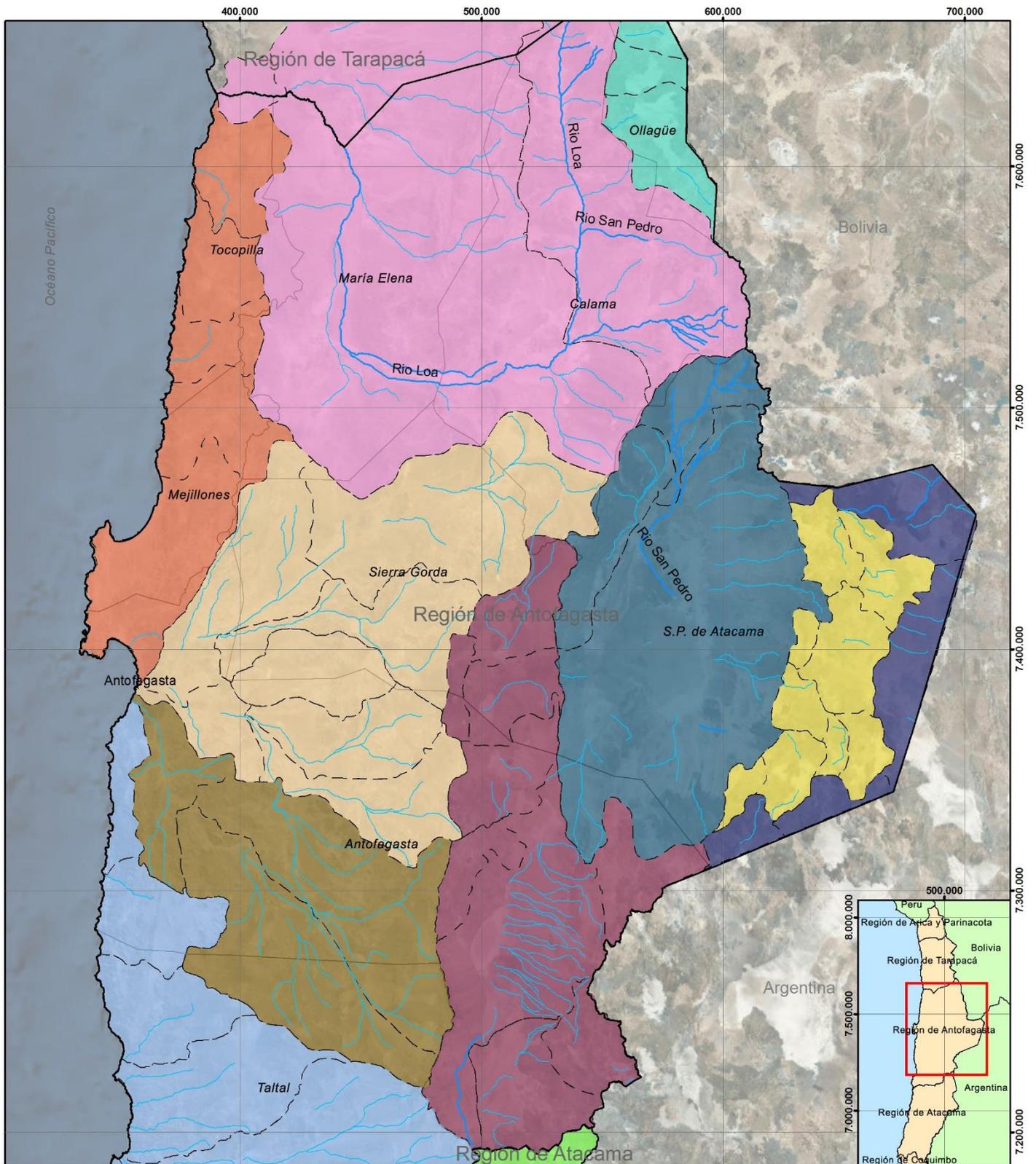
VI. Anexos

Anexo 1: Zonas climáticas de la Región de Antofagasta según Köppen-Geiger



Fuente: Regionalización climática de Chile continental (Sarricolea et al., 2017)

Anexo 2: Mapa hidrográfico de cuencas y subcuencas de la Región de Antofagasta



Leyenda

Cursos secundarios	Fronteriza-S. Atacama	Quebrada Caracoles
Ríos	S. Atacama-Vert. Pacífico	Quebrada la Negra
Subcuencas	Frontera-Vert. del Pacífico	Río Loa
Cuencas	S. Michincha-R.Loa	Salar de Atacama
R. Loa-Q. Caracoles	S. Atacama-S. Socompa	
Q. La Negra-Q. Pan de Azúcar		

0 12,5 25 50 75 100 Km

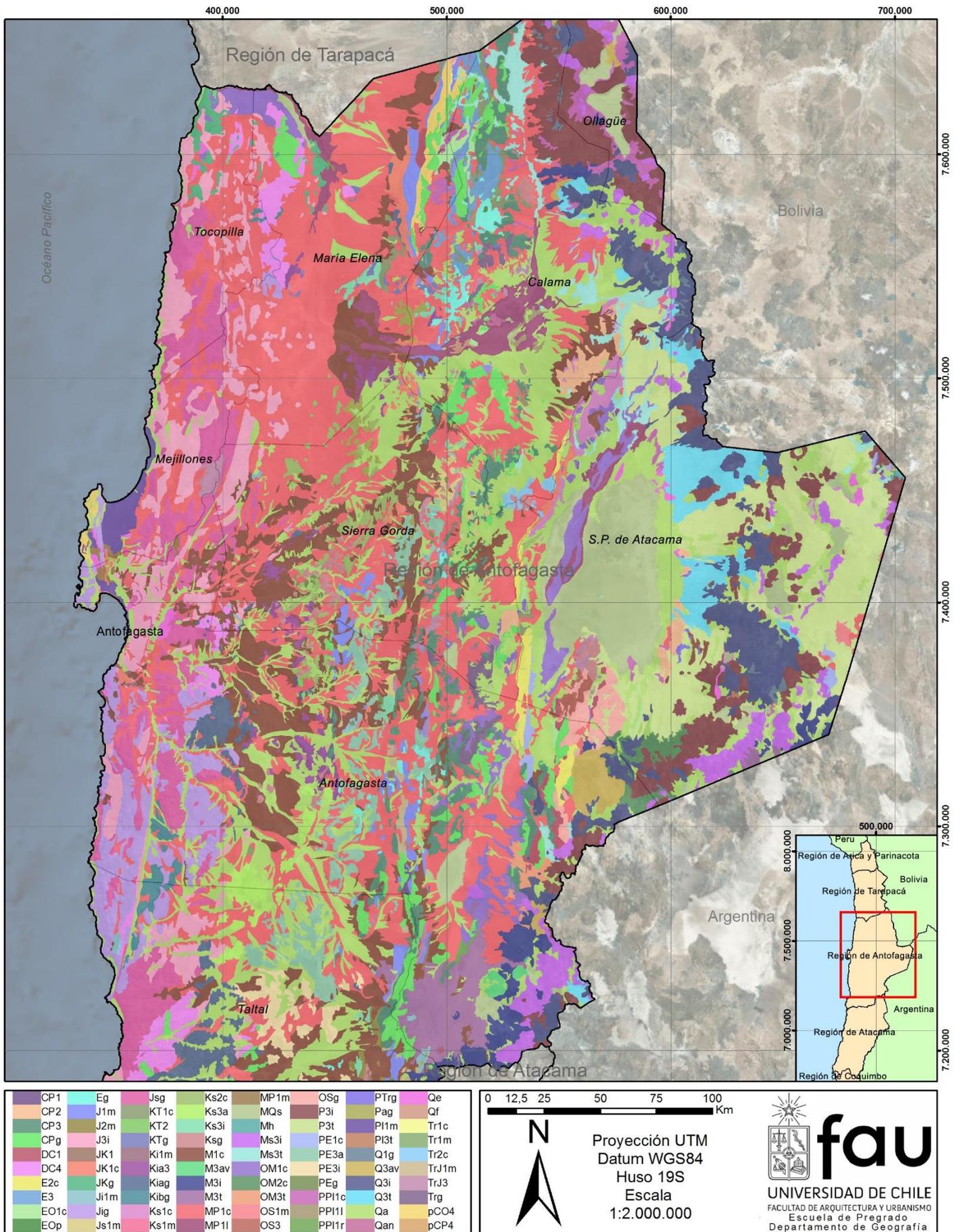
N

Proyección UTM
Datum WGS84
Huso 19S
Escala
1:2.000.000

fau
UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE ARQUITECTURA Y URBANISMO
Escuela de Pregrado
Departamento de Geografía

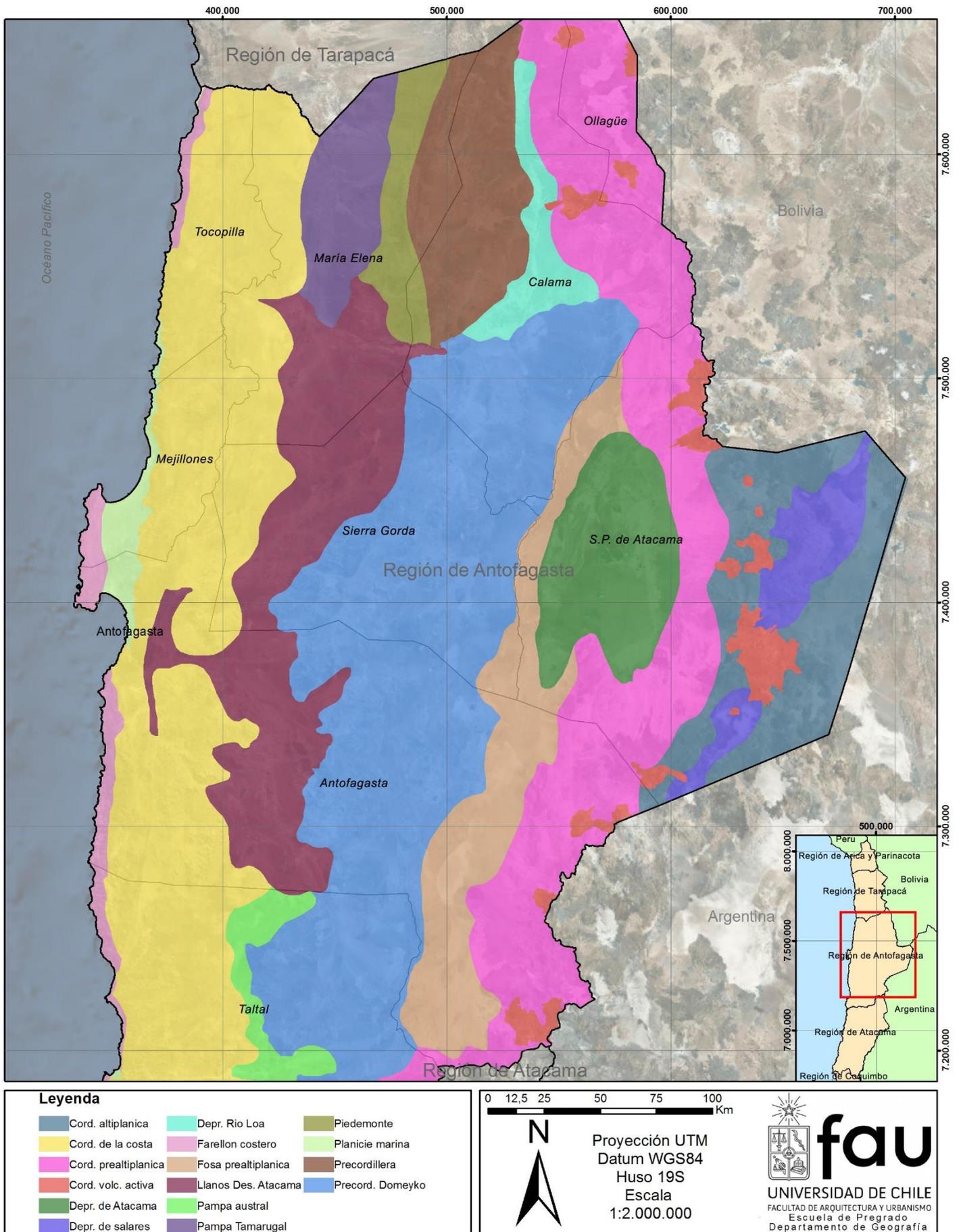
Fuente: Mapa hidrográfico de Chile (IDE, 2017)

Anexo 3: Unidades geológicas de la Región de Antofagasta



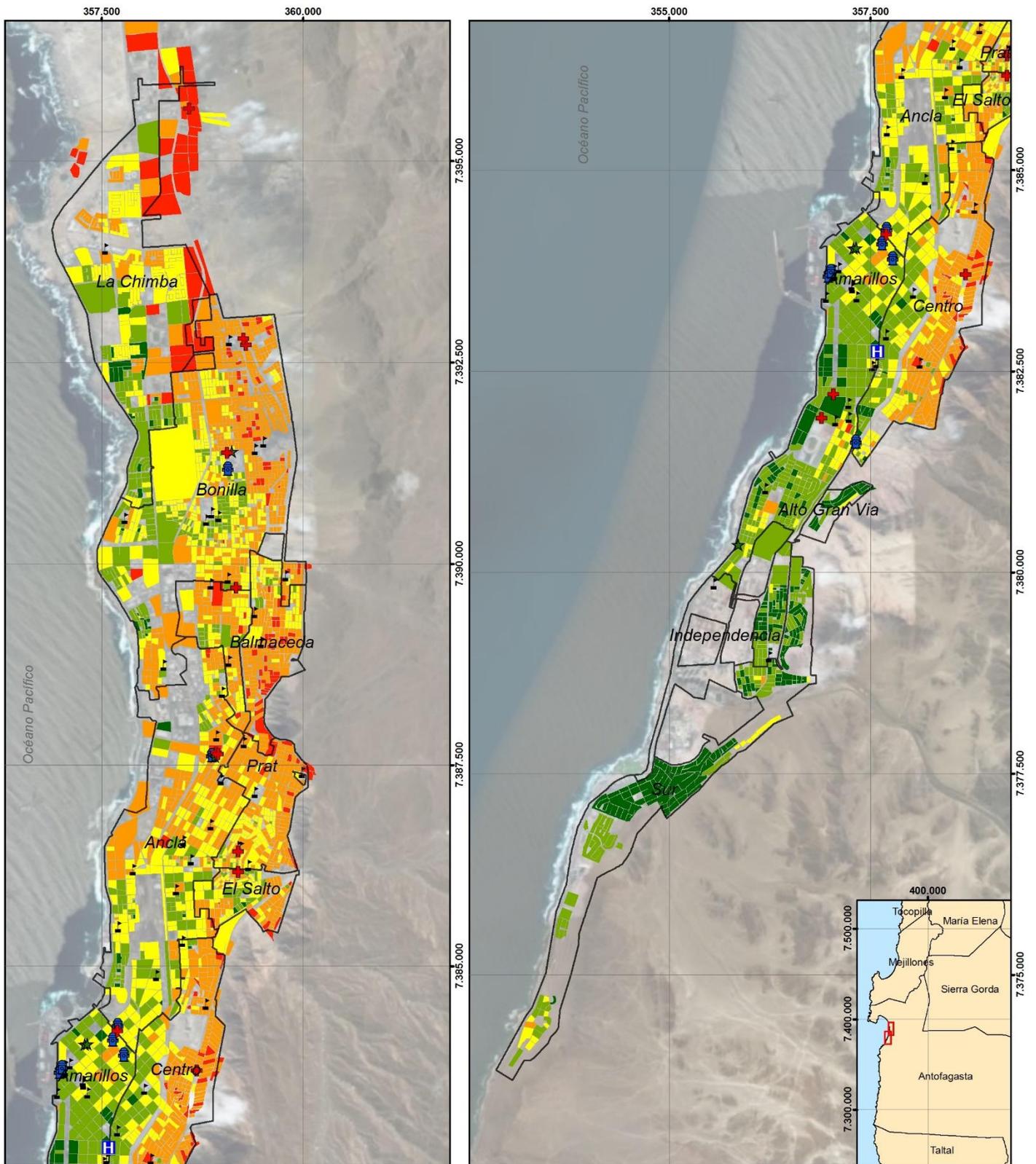
Fuente: Mapa Geológico de Chile (SERNAGEOMIN, 2003)

Anexo 4: Macroformas de la Región de Antofagasta



Fuente: Unidades geomorfológicas de Chile (Rulamahue, 2015)

Anexo 5: Grupos Socioeconómicos e infraestructura urbana prioritaria por sectores de distribución



Leyenda			
Hospital Reg.	Bomberos	NSE	C3
Cent. de Salud	Est. Educac.	ABC1	D
Carabineros	Zonas de Distr.	C2	E

0 0,5 1 2 3 Km

Proyección UTM
Datum WGS84
Huso 19S
Escala
1:60.000

fau
UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE ARQUITECTURA Y URBANISMO
Escuela de Pregrado
Departamento de Geografía

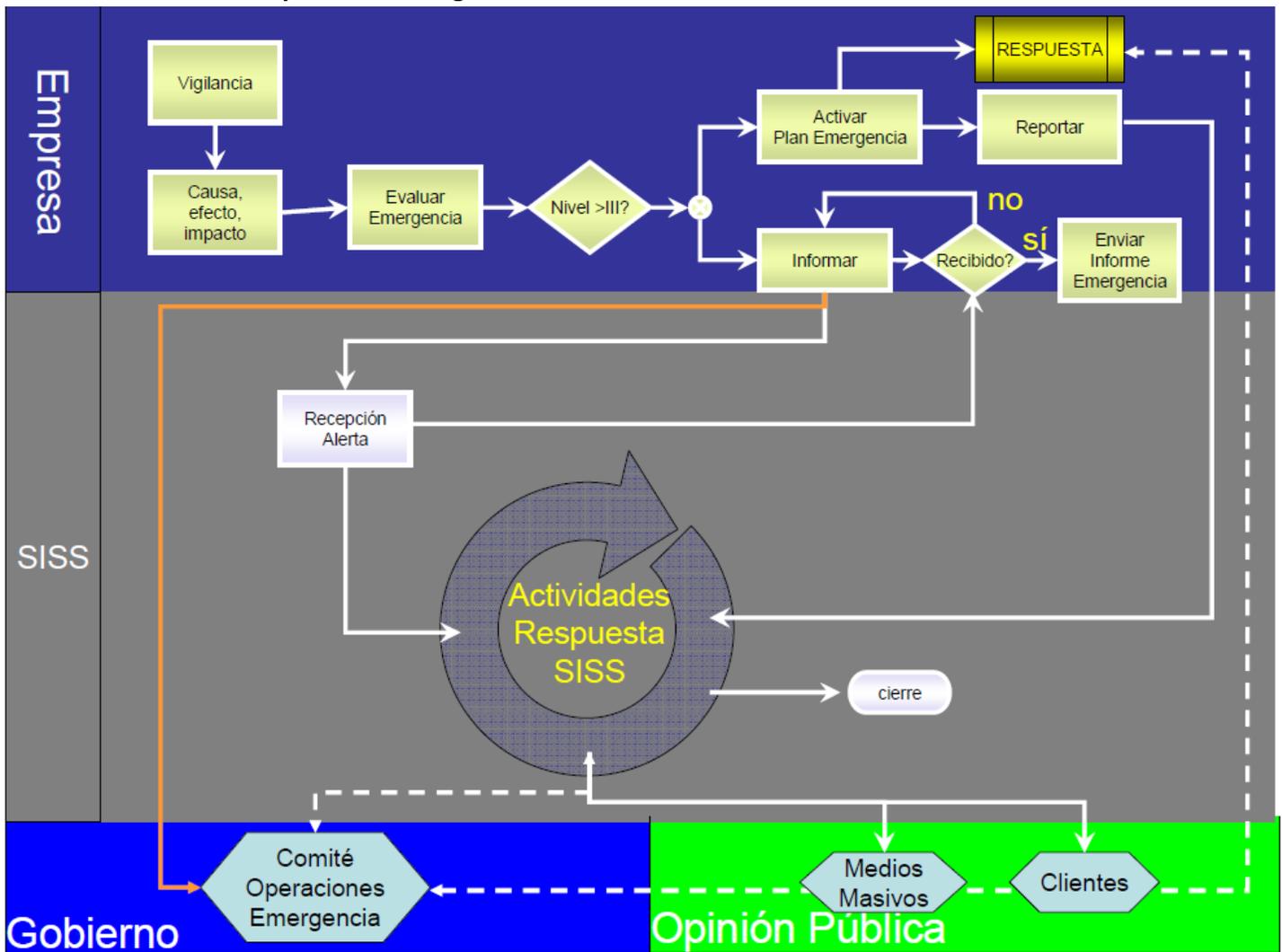
Fuente: Elaboración propia en base a Aguas Antofagasta (2011a), AIM (2013) e IDE (2017)

Anexo 6: Matriz de asignación de responsabilidades (Matriz RACI)

Actores y recursos		Actividades pre-evento				
		Establecer contexto	Identificar fuente de riesgo	Priorizar riesgo	Tratamiento	
Prestadores	Empresas Sanitarias	Responsable (R)				
	Proveedores Industria	Asiste (A)				
Organismos de Gobierno	SISS	Consultado (C)/Informado (I)				
	ONEMI					
	Ministerios					
	Intendencias	Consultado/Asiste/Informado				
	Municipios					
Medios de comunicac.	Radiodifusión sonora	No participa		Informado		
	Televisión					
	Prensa escrita					
	Radioaficionados					
Clientes y Usuarios		Consultado/Informado				
Organizaciones Sociales y Juntas de Vecinos						
Actividades post-evento		Identificar evento/impacto	Comunicar emergencia	Caracterizar emergencia	Coordinar acciones	Monitorear e informar
Prestadores	Empresas Sanitarias	Responsable				
	Proveedores Industria	Informado		Consultado/Asiste		
Organismos de Gobierno	SISS	Consultado/Informado		Consultado/ Informado	Asiste/ Informado	Responsable
	ONEMI	(C)/(I)	(R)			
	Ministerios	Asiste/Informado		Consultado/ Asiste/ Informado		Asiste/ Informado
	Intendencias					
	Municipios					
Medios de comunicac.	Radiodifusión sonora	No participa	Asiste	Informado	Asiste	
	Televisión					
	Prensa escrita					
	Radioaficionados					
Clientes y Usuarios		Asiste	Informado	Informado		
Organizaciones Sociales y Juntas de Vecinos						

Fuente: Guía metodológica para la elaboración de planes de emergencia de empresas sanitarias (SISS, 2011b)

Anexo 7: Proceso de respuesta a emergencias sanitarias



Fuente: Guía metodológica para la elaboración de planes de emergencia de empresas sanitarias (SISS, 2011b)

Anexo 8: Captaciones de agua de cordillera de Aguas Antofagasta

Captación	Año Constr.	Cota (msnm)	Desarenador	Material de Barrera	Long. Barrera (m)	Altura Barrera (m)	Capac. Operativa (L/s)
Toconce	1958	3335	Si	Hormigón	22,1	1,55	500
Hojalar	1962	4115	No	Hormigón	9	0,6	140
Lequena	1972	3245	Si	Albañilería de piedra	20	4,3	550
Quinchamale	1989	3056	Si	Hormigón	54	3	300
Puente Negro	1996	2284	No	Hormigón	10	1,2	150
San Pedro	1998	3290	No	Hormigón	1,2	0,76	100

Fuente: Catastro de infraestructura de abastecimiento hídrico de Antofagasta (SISS, 2017)

Anexo 9: Caudal medio anual captado en fuentes de cordillera en el periodo 2003-2015

Producción por Sistema	2003		2004		2005		2006	
	Prod. Total (m ³ /año)	Q Medio (L/s)	Prod. Total (m ³ /año)	Q Medio (L/s)	Prod. Total (m ³ /año)	Q Medio (L/s)	Prod. Total (m ³ /año)	Q Medio (L/s)
Toconce	14.713.920	466,58	14.496.990,97	459,70	14.560.037,36	461,70	14.427.345,02	457,49
Lequena	16.265.145,6	515,76	16.542.748,8	524,57	16.946.582,4	537,37	16.774.223,04	531,91
Quinchamale	9.853.920	312,47	9.902.476,8	314,01	9.525.407,73	302,05	9.060.263,42	287,30
Puente Negro	937.267,2	29,72	1.019.779,2	32,34	1.651.284,58	52,36	1.398.822,05	44,36
Totales	41.770.252,8	1.324,53	41.961.995,77	1.330,61	42.683.312,06	1.353,48	41.660.653,54	1.321,05
Producción por Sistema	2007		2008		2009		2010	
	Prod. Total (m ³ /año)	Q Medio (L/s)	Prod. Total (m ³ /año)	Q Medio (L/s)	Prod. Total (m ³ /año)	Q Medio (L/s)	Prod. Total (m ³ /año)	Q Medio (L/s)
Toconce	14.229.789,7	451,22	13.865.815,44	439,68	14.032.555,71	444,97	13.978.222,37	443,25
Lequena	16.500.847,39	523,24	14.850.540,71	470,91	14.991.977,68	475,39	14.667.853,7	465,11
Quinchamale	9.336.855,74	296,07	9.055.550,77	287,15	9.199.587,38	291,72	9.160.186,74	290,47
Puente Negro	1.247.244,48	39,55	1.197.194,17	37,96	1.441.611,53	45,71	1.641.044,78	52,04
San Pedro	2.734.990	86,73	2.631.566,03	83,45	3.432.189,61	108,83	3.392.902,18	107,59
Totales	44.049.727,31	1.396,81	41.600.667,13	1.319,15	43.097.921,91	1.366,63	42.840.209,76	1.358,45
Producción por Sistema	2011		2012		2013		2014	
	Prod. Total (m ³ /año)	Q Medio (L/s)	Prod. Total (m ³ /año)	Q Medio (L/s)	Prod. Total (m ³ /año)	Q Medio (L/s)	Prod. Total (m ³ /año)	Q Medio (L/s)
Toconce	14.109.147,65	447,40	14.218.907,62	450,88	14.284.521,50	452,96	14.156.310,95	448,89
Lequena	15.223.944,38	482,75	15.563.309,76	493,51	15.159.116,74	480,69	14.936.456,38	473,63
Quinchamale	9.097.341,12	288,47	9.271.045,73	293,98	9.360.880,99	296,83	9.351.972,81	296,55
Puente Negro	1.364.114,3	43,26	1.578.721,54	50,06	1.676.979,07	53,18	1.678.372,23	53,22
San Pedro	3.171.962,9	100,58	3.256.431,84	103,26	3.211.155,36	101,83	2.690.067,38	85,30
Totales	42.966.510,35	1.362,46	43.888.416,48	1.391,69	43.692.653,66	1.385,48	42.813.179,75	1.357,60
Producción por Sistema	2015		Promedio periodo 2003-2015					
	Prod. Total (m ³ /año)	Q Medio (L/s)	Prod. Total (m ³ /año)			Q Medio (L/s)		
Toconce	14.334.744,34	454,55	14.262.177,59			452,25		
Lequena	14.335.195,97	454,57	15.596.764,81			494,57		
Quinchamale	9.310.638,49	295,24	9.345.086,75			296,33		
Puente Negro	1.673.184,02	53,06	1.423.509,17			45,14		
San Pedro	1.020.299,46	32,35	2.837.951,64			89,99		
Totales	40.674.062,28	1.289,77	42.592.274,06			1.350,59		

Fuente: Información de zonas de facturación, clientes, consumo, producción y distribución de agua potable (Aguas Antofagasta, 2017)

Anexo 10: Caudal medio mensual captado en fuentes de cordillera en el periodo 2003-2015

Sistema		Toconce		Lequena		Quinchamale	
Mes	Q Medio (L/s)	Prod. Media (m ³ /mes)	Q Medio (L/s)	Prod. Media (m ³ /mes)	Q Medio (L/s)	Prod. Media (m ³ /mes)	
Enero	435,78	1.167.190,24	479,19	1.283.458,06	293,97	787.378,63	
Febrero	448,59	1.085.230,74	487,33	1.178.950,94	295,37	714.554,67	
Marzo	452,61	1.212.269,09	486,43	1.302.858,54	294,41	788.534,53	
Abril	456,65	1.183.643,64	488,46	1.266.082,81	298,70	774.220,97	
Mayo	458,49	1.228.032,31	507,08	1.358.166,75	294,76	789.492,38	
Junio	460,31	1.193.112,05	518,53	1.344.033,39	299,45	776.183,51	
Julio	460,15	1.232.463,77	524,01	1.403.502,47	296,74	794.796,32	
Agosto	459,03	1.229.457,50	517,82	1.386.917,00	295,74	792.113,08	
Septiembre	461,83	1.197.054,01	509,39	1.320.329,95	297,28	770.540,90	
Octubre	451,74	1.209.927,71	487,83	1.306.614,79	296,01	792.829,17	
Noviembre	442,19	1.146.159,14	464,94	1.205.130,89	297,77	771.818,69	
Diciembre	439,68	1.177.637,38	463,23	1.240.719,21	295,93	792.623,90	
Mes	Puente Negro		San Pedro		Total		
	Q Medio (L/s)	Prod. Media (m ³ /mes)	Q Medio (L/s)	Prod. Media (m ³ /mes)	Q Medio (L/s)	Prod. Media (m ³ /mes)	
Enero	67,67	181.238,47	92,87	248.753,74	1.369,48	3.668.019,14	
Febrero	57,12	138.178,68	95,61	231.307,58	1.384,02	3.348.222,62	
Marzo	51,51	137.951,64	94,56	253.259,30	1.379,51	3.694.873,10	
Abril	34,24	88.752,50	92,87	240.706,86	1.370,91	3.553.406,78	
Mayo	27,03	72.400,30	88,21	236.261,56	1.375,58	3.684.353,29	
Junio	19,43	50.362,42	92,58	239.970,43	1.390,30	3.603.661,80	
Julio	20,35	54.502,71	90,13	241.393,40	1.391,37	3.726.658,69	
Agosto	29,61	79.320,52	91,19	244.249,05	1.393,39	3.732.057,14	
Septiembre	35,93	93.137,70	89,41	231.745,46	1.393,83	3.612.808,02	
Octubre	57,55	154.144,31	86,24	230.987,27	1.379,37	3.694.503,25	
Noviembre	67,14	174.028,67	84,73	219.616,04	1.356,77	3.516.753,42	
Diciembre	74,48	199.491,25	82,03	219.700,97	1.355,35	3.630.172,71	

Fuente: Información de zonas de facturación, clientes, consumo, producción y distribución de agua potable (Aguas Antofagasta, 2017)

Anexo 11: Aducciones por tramo del sistema de producción de agua potable de Antofagasta

	Aducción	Longitud Total	Presión Máxima (mca)	Tramo	Longitud (m)	Diámetro (mm)	Año de Construcción	Material	% de Aducción
Sistema de captación	Toconce	90.715	210	T 1	4.568	645	1959	Acero Negro	5,04%
				T 2	18.432	493	1959	Acero Negro	20,32%
				T 3-1	428	493	1959	Acero Negro	0,47%
				T 3-2	572	544	1959	Acero Negro	0,63%
				T 4-1	16.371	493	1959	Acero Negro	18,05%
				T 4-2	4.885	500	1959	Hierro dúctil	5,38%
				T 4-3	3.888	544	1959	Acero Negro	4,29%
				T 4-4	36.893	594	1959	Acero Negro	40,67%
				T 4-5	4.678	600	1959	Hierro dúctil	5,16%
	Hojalar	3.584	100	T 1	514	300	1959	Asbesto Cemento	14,34%
				T 2	3.070	450	1959	Hormigón Armado	85,66%
	Lequena	102.965	165	T 1	2.000	500	1995	Hierro dúctil	1,94%
				T 2	19.966	500	1970	Acero Negro	19,39%
				T 3	39.669	550	1995	Acero Negro	38,53%
				T 4	2.000	550	1970	Hierro dúctil	1,94%
				T 5	224	700	1970	Acero Negro	0,22%
				T 6	39.106	800	1970	Acero Revestido	37,98%
	Quinchamale	74.734	250	T 1	1.492	450	1989	Acero Negro	2%
				T 2	56.465	450	1989	Acero Negro	75,55%
				T 3	16.777	700	1989	Acero Negro	22,45%
	Puente Negro	1.728	68	T 1	1.728	350	1997	Hierro dúctil	100%
San Pedro	17.324	110	T 1	1.282	250	2002	Acero Negro	7,4%	
			T 2	15.748	300	1989	Acero Negro	90,9%	
			T 3	294	400	1989	Acero Negro	1,7%	
Aducciones Calama - Antofagasta	VACA	211.940	250	T 1	4.038	457	1959	Acero Revestido	1,91%
				T 2	9.988	450	2004	Hierro dúctil	4,71%
				T 3	9.762	460	1959	Acero Revestido	4,61%
				T 4	38.031	521	1959	Acero Revestido	17,94%
				T 5	43.346	572	1959	Acero Revestido	20,45%
				T 6	1.086	600	2004	Hierro dúctil	0,51%
				T 7	3.043	609	2004	Hierro dúctil	1,44%
				T 8	55.618	611	1959	Acero Revestido	26,24%
				T 9	36.962	622	1959	Acero Revestido	17,44%
				T 10	10.066	648	1959	Acero Revestido	4,75%
	NACA	211.057	250	T 1	4.440	500	1981	Hierro dúctil	2,1%
				T 2	142.371	600	1981	Hierro dúctil	67,46%
				T 3	64.246	700	1981	Hierro dúctil	30,44%
	VACA Salar - Caracoles	6.572	230	T 1	6.494	550	1959	Acero Negro	98,81%
				T 2	78	800	1959	Acero Negro	1,19%
	NACA Salar - Caracoles	6.121	230	T 1	4.446	500	1981	Hierro dúctil	72,64%
				T 2	1.675	600	1981	Hierro dúctil	27,36%

Fuente: Catastro de infraestructura de abastecimiento hídrico de Antofagasta (SISS, 2017)

Anexo 12: Mecanismos reguladores y reductoras de presión del sistema de producción de agua potable

Aducción	Ubicación (m)	Caudal (L/s)	Diámetro Conducción (mm)	Diámetro Válvula (mm)
Toconce	11.000	443	458	400
	23.220	443	458	400
	33.000	443	428	400
	43.000	443	428	400
	82.700	443	525	400
Lequena	32.450	445	460	400
Quinchamale	26.250	1.315,7	685	600
	38.460	1.315,7	685	600
	57.980	1.315,7	730	600
San Pedro	8.047	762	549	500
NACA	30.000	878	856	600
	56.000	878	550	600
	75.000	878	655	600
	106.773	878	716	600
	136.213	835	583	600
	160.013	835	625	600
	181.000	717	671	600
	207.037	717	340	600

Fuente: Catastro de infraestructura de abastecimiento hídrico de Antofagasta (SISS, 2017)

Anexo 13: Proceso de potabilización de las plantas de tratamiento del sistema de abastecimiento hídrico

Planta de Tratamiento de Agua Potable	Descripción del proceso
Plantas de Filtros Salar del Carmen	Ambas plantas están compuestas por una cámara de ingreso de 462m ³ cada una, donde se realiza la precloración y agregado de coagulantes utilizando cloruro férrico, y se deriva a las unidades de coagulación y decantación. Cada planta tiene 3 decantadores, de 19m de diámetro y 4,2m de alto. Adicionalmente, el agua tratada pasa por un proceso de prefiltración, a través de 8 filtros por planta, de lecho y de material grueso, de 3,16m ² de superficie cada uno y diseñados para producir 180m ³ /m ² /día de agua, pudiendo procesar hasta 9.100m ³ diariamente. El último conjunto está compuesto por 12 filtros de lecho mixto por planta, de material granular y de 30,16m ² de superficie cada uno, y luego de un segundo proceso de cloración, se entrega agua potable que cumple las normas de calidad, ya que sus niveles de arsénico no superan las 0,04ppm, con una turbiedad menor a 1NTU (SISS, 2006). Cabe destacar que cada una de las plantas funcionan con una potencia eléctrica de 150KVA abastecida desde el SING, y cuentan con equipos generadores de emergencia capaces de abastecer su demanda energética completamente.
Planta Desaladora de Antofagasta	Las aguas ingresan al sistema de pretratamiento, en donde se aplican procesos de oxidación, acidificación, coagulación, floculación, filtración por arena, dosificación de antiincrustante y metabisulfito de sodio, y filtración por cartuchos, para luego pasar al tratamiento de osmosis inversa. En este proceso se invierte el fenómeno de osmosis natural al aplicar, a la solución con mayor concentración de sales, una presión mayor a la osmótica, forzando un caudal inverso de agua pura a través de una membrana semipermeable, obteniendo como productos el agua desalada y un agua concentrada o salmuera. Tras el tratamiento, se procede a su potabilización a través de procesos de remineralización, y la dosificación de hidróxido sódico, fluoruro sódico e hipoclorito sódico, para incorporarle finalmente la dureza, alcalinidad, pH del agua potable.

Fuente: Elaboración propia en base a Aguas Antofagasta (2013) y SISS (2006)

Anexo 14: Estanques del sistema de abastecimiento hídrico de la ciudad de Antofagasta

	Nombre	Volumen (m ³)	Material	Año de Constr.	Cota de Rebalse (msnm)
Producción	Estanque de Mezcla	2.000	Hormigón Armado	1987	2.385
	Topáter I	2.450	Hormigón Armado	1972	2.351,50
	Topáter II	2.450	Hormigón Armado	1972	2.352,80
	Topáter III	2.000	Hormigón Armado	1985	2.354
	Estanque PFSC	10.000	Hormigón Armado	1981	596
	Caracoles I	12.500	Acero revestido	1974	358,82
	Caracoles II	12.500	Acero revestido	1974	358,82
	NACA I	5.000	Hormigón Armado	1981	2.349,65
	Sierra Gorda	10.000	Hormigón Armado	1981	1.901,50
	Oasis	10.000	Hormigón Armado	1981	1.350
	Estanque Desaladora	1.800	Hormigón Armado	2003	25
Distribución	La Chimba I	2.000	Hormigón Armado	2003	132,4
	La Chimba II	4.000	Hormigón Armado	2011	130,65
	Bonilla I	2.000	Hormigón Armado	1978	193,15
	Bonilla II	2.000	Hormigón Armado	1992	193,15
	Bonilla III	5.000	Hormigón Armado	2014	193,15
	Balmaceda	2.000	Hormigón Armado	1984	215,07
	Prat	2.000	Hormigón Armado	1978	191,24
	El Salto I	500	Acero revestido	1981	198,27
	El Salto II	200	Acero revestido	1993	196,17
	Ancla I	10.000	Hormigón Armado	2001	116,7
	Ancla II	12.500	Acero revestido	1942	116,7
	Centro	2.000	Hormigón Armado	1981	209,96
	Alto Gran Vía	750	Acero revestido	1997	164,57
	Amarillo I	2.406	Acero revestido	1954	85,63
	Amarillo II	2.406	Acero revestido	1954	85,63
	Amarillo III	1.978	Acero revestido	1954	83,88
	Amarillo IV	1.978	Acero revestido	1954	83,88
	Amarillo V	1.978	Acero revestido	1954	83,88
	Independencia I	1.000	Acero revestido	1976	180,78
	Independencia II	1.000	Hormigón Armado	2014	180,78
Sur	2.000	Hormigón Armado	1981	222,35	

Fuente: Catastro de infraestructura de abastecimiento hídrico de Antofagasta (SISS, 2017)

Anexo 15: Plantas elevadoras de agua del sistema de abastecimiento hídrico de la ciudad de Antofagasta

	Plantas elevadoras de agua	Tipo	Caudal Diseño (L/s)	Potencia Instalada (HP)	Difer. Máx. de Presión (mca)/ *Altura Total de Elevación (m)	N° de Bombas	Año de Construcción	Cota (m)
PEAC Producción	Lequena 1	E	650	800	75	2	2014	2.353
	Lequena 2	E	650	800	75	2	2014	2.521
	Puente Negro	A	150	185	*80	3	1996	2.309
	Bocatoma Desaladora	Planta A	1200	1040	*46,8	6	2003	5
PEAP Distribución	Impulsión Desaladora	A	600	11150	*167,8	2003	6	17
	Estanque La Chimba	A	70	90	80	2012	2	125
	Estanques Bonilla	A	150	295	60	2014	3	188
	Impulsión Bonilla	E	100	1300	*85	2006	4	106
	Estanque Ancla	A	150	885	182	2012	5	112

Fuente: Catastro de infraestructura de abastecimiento hídrico de Antofagasta (SISS, 2017)

Anexo 16: Conducciones de agua potable del sistema de distribución de la ciudad de Antofagasta

Nombre	Longitud Total (m)	Presión Máx.(mca)	Tramo	Longitud (m)	Diámetro (mm)	Año de Construcción	Material	% de Aducc.
Alimentadora Norte	5.794	250	T 1	4.023	300	1985	Hierro Dúctil	69,43%
			T 2	1.278	400	1985	Hierro Dúctil	22,06%
			D Balm	442	315	1985	HDPE	7,63%
			D Prat	51	250	1985	Hierro Dúctil	0,88%
Alimentadora Sur	11.931	250	T 1	8.414	500	1981	Hierro Dúctil	70,52%
			T 2	2.132	600	1981	Hierro Dúctil	17,87%
			T 3	132	200	1981	Hierro Dúctil	1,11%
			D Salt	180	200	1981	Hierro Dúctil	1,51%
			D Anc T1	8	200	1981	Hierro Dúctil	0,07%
			D Anc T2	235	300	1981	Acero Negro	1,97%
			D Cent	97	200	1981	Hierro Dúctil	0,81%
			D AGV	230	250	1995	Acero Negro	1,93%
			D Amar	460	400	1981	Hierro Dúctil	3,86%
			D Inde	43	200	1981	Acero Negro	0,36%
Impulsión Desaladora	15.640,96	250	T 1	5.721	600	2001	Hierro Dúctil	36,58%
			T 2	5.981,46	700	2001	Hierro Dúctil	38,24%
			T 3	402,5	1200	2012	Acero Carbón con Rec. HDPE	2,57%
			D Chi T1	683	400	2004	Hierro Dúctil	4,37%
			D Chi T2	800	450	2004	Hierro Dúctil	5,11%
			D Bon T1	1.250	600	2007	Hierro Dúctil	7,99%
			D Bon T2	803	600	2007	Hierro Dúctil	5,13%
VACA Caracoles Ancla	3.776	250	T 1	546	600	1959	Acero Negro	14,46%
			T 2	619	600	1980	Hierro Dúctil	16,39%
			T 3	2.261	648	1959	Acero Negro	59,88%
			T 4	350	800	1959	Acero Negro	9,27%
Aducción Cerro Moreno	24.088 (10.212)	117	T 1	9.812	300	1992	Hierro Dúctil	96,08%
			D Boni	400	300	1978	Asbesto Cemento	3,92%
Interconexión Ancla Amarillos	6.226	250	T 1	6.200	600	2008	Hierro Dúctil	99,58%
			T 2	26	500	2009	Acero Revestido	0,42%

Fuente: Catastro de infraestructura de abastecimiento hídrico de Antofagasta (SISS, 2017)

Anexo 17: Sectores de distribución de agua potable de la ciudad de Antofagasta

Sector	Área (Km ²)	Viviendas	Volumen disponible (m ³)	Longitud Red de Distribución (m)	Q medio (L/s)	Q max día (L/s)	Población	L/hab/día
La Chimba	4,47	10.161	6.000	57.372,68	76,3	89,4	20.363	323,74
Bonilla	6,27	25.036	9.000	167.063,63	177,5	208	112.799	135,96
Balmaceda	1,17	4.955	2.000	36.912,93	27,6	32,3	19.629	121,49
Prat	2,15	7.679	2.000	59.468,06	49,7	58,3	31.881	137,62
El Salto	0,71	2.201	700	21.818,66	15,2	17,8	10.412	126,13
Ancla	5,06	11.960	22.500	91.885,26	116,6	136,6	48.468	207,85
Centro	3,2	10.344	2.000	77.343,2	76,8	89,9	39.945	166,12
Alto Gran Vía	0,27	579	750	4.576,52	4,9	5,8	1.480	286,05
Amarillos	3,29	11.772	10.746	67.091,38	150,7	176,7	30.919	421,12
Independencia	1,14	2.372	2.000	18.841,44	33,8	39,6	5.431	537,71
Sur	3,28	4.746	2.000	56.908,84	49,2	57,7	11.469	370,64
Total	30,99	91.805	59.696	659.282,59	778,3	912,1	332.796	202,06

Fuente: Elaboración propia en base a Aguas Antofagasta (2011a) y SISS (2011c; 2017)

Anexo 18: Matriz vulnerabilidad operativa del sistema de abastecimiento hídrico de la ciudad de Antofagasta.

Componente analizado		Capacidad del componente	Ind. Continuidad	Ind. Calidad		
Producción	Fuentes	Río Linzor	50L/s (3%)	0,988 (Ciu dad)	0,984	
		Río Hojalar	140L/s (8,4%)			
		Río Toconce	470L/s (28,2%)			
		Río Loa	919L/s (55,1%)			
		Río San Pedro	90L/s (5,4%)			
		Total	1.669L/s (100%)			
	Captaciones	Toconce	610L/s (12,2%)			
		Lequena	576L/s (11,5%)			
		Quinchamale	400L/s (8%)			
		Puente Negro	150L/s (3%)			
		San Pedro	100L/s (2%)			
		Bocatoma Desaladora	3.172L/s (63,3%)			
		Total	5.008L/s (100%)			
	Aducciones	VACA	610L/s (13,3%)			
		NACA	800L/s (17,5%)			
		Impulsión Desaladora (Prod)	1.200L/s (26,2%)			
		Segunda Impulsión Desaladora	1.972L/s (43%)			
		Total	4.582L/s (100%)			
	PTAP	PFASC	500L/s (27%)			
		PFNSC	500L/s (27%)			
		Planta Desaladora de Antofagasta	850L/s (46%)			
		Total	1.850L/s (100%)			
	Estanques de Producción	Estanque de Mezcla PFCT	2.000m ³ (3,1%)			0,995 (Em presa)
		NACA I	5.000m ³ (7,8%)			
		Sierra Gorda (NACA II)	10.000m ³ (15,7%)			
		Oasis (NACA III)	10.000m ³ (15,7%)			
		PFSC	10.000m ³ (15,7%)			
Caracoles I		12.500m ³ (19,6%)				
Caracoles II		12.500m ³ (19,6%)				
Estanque Desaladora		1.800m ³ (2,8%)				
Total	63.800m³ (100%)					
PEAC	Lequena 1	650L/s (14,1%)				
	Lequena 2	650L/s (14,1%)				
	Puente Negro	150L/s (3,2%)				
	Impulsión Desaladora (Prod)	1.200L/s (26%)				
	Segunda Impulsión Desaladora	1.972L/s (42,7%)				
	Total	4.622L/s (100%)				
Distribución	Conducciones	Alimentadora Norte	5,79Km (10,8%)	0,986 (ciu dad)	0,976	
		Alimentadora Sur	11,93Km (22,3%)			
		Impulsión Desaladora	15,64Km (29,2%)			
		VACA Caracoles - Ancla	3,78Km (7,1%)			
		Aducción Cerro Moreno	10,21Km (19,1%)			
		Interconexión Ancla - Amarillos	6,23Km (11,6%)			
		Total	53,58Km (100%)			
	Estanques de Distribución	La Chimba I	2.000m ³ (3,4%)			
		La Chimba II	4.000m ³ (6,7%)			
		Bonilla I	2.000m ³ (3,4%)			
		Bonilla II	2.000m ³ (3,4%)			
		Bonilla III	5.000m ³ (8,4%)			
		Balmaceda	2.000m ³ (3,4%)			
		Prat	2.000m ³ (3,4%)			
		El Salto I	500m ³ (0,8%)			
		El Salto II	200m ³ (0,3%)			
		Ancla I	10.000m ³ (16,8%)			
		Ancla II	12.500m ³ (20,9%)			
		Centro	2.000m ³ (3,4%)			
		Alto Gran Vía	750m ³ (1,3%)			
Amarillo I	2.406m ³ (4%)					
Amarillo II	2.406m ³ (4%)					

		Amarillo III	1.978m ³ (3,3%)				
		Amarillo IV	1.978m ³ (3,3%)				
		Amarillo V	1.978m ³ (3,3%)				
		Independencia I	1.000m ³ (1,7%)				
		Independencia II	1.000m ³ (1,7%)				
		Sur	2.000m ³ (3,4%)				
		Total	59.696m³ (100%)				
	PEAP	Impulsión Desaladora	600L/s (56,1%)				
		Estanque La Chimba	70L/s (6,5%)				
		Estanques Bonilla	150L/s (14%)				
		Impulsión Bonilla	100L/s (9,3%)				
		Estanque Ancla	150L/s (14%)				
		Total	1.070L/s (100%)				
	Zonas de distribución	La Chimba	76,3L/s (9,8%)	323,74L/hab/día (11,4%)	0,967	0,725	0,490
		Bonilla	177,5L/s (22,8%)	135,96L/hab/día (4,8%)	0,978	0,729	0,492
		Balmaceda	27,6L/s (3,5%)	121,49L/hab/día (4,3%)	0,975	0,759	0,421
		Prat	49,7L/s (6,4%)	137,62L/hab/día (4,9%)	0,973	0,742	0,465
		El Salto	15,2L/s (2%)	126,13L/hab/día (4,4%)	0,985	0,762	0,619
		Ancla	116,6L/s (15%)	207,85L/hab/día (7,3%)	0,984	0,744	0,429
		Centro	76,8L/s (9,9%)	166,12L/hab/día (5,9%)	0,974	0,739	0,504
		Alto Gran Vía	4,9L/s (0,6%)	286,05L/hab/día (10,1%)	0,914	0,754	0,444
		Amarillos	150,7L/s (19,4%)	421,12L/hab/día (14,9%)	0,971	0,813	0,495
		Independencia	33,8L/s (4,3%)	537,71L/hab/día (19%)	0,982	0,847	0,545
		Sur	49,2L/s (6,3%)	370,64L/hab/día (13,1%)	0,976	0,790	0,519
		Total/Promedio	778,3L/s (100%)	202,06L/hab/día (100%)	0,976	0,753	0,491

Fuente: Elaboración propia en base a Aguas Antofagasta (2011a; 2014; 2017), CEPIS (1996), Monsalve (2018) y SISS (2006; 2011c; 2011d; 2015; 2017; s/f b)

Anexo 19: Matriz vulnerabilidad física del sistema de abastecimiento hídrico de la ciudad de Antofagasta.

Amenaza	Componentes		Impacto	Capacidad remanente	Ind. Vuln./ Pobl Impact.		
Sísmica	Producción	Captaciones	Toconce	Capt. Hojalar y 33,25Km(35,3%)	3.322L/s (66,3%)	0,337	
			Lequena				30,58Km (29,7%)
			Quinchamale				26,51Km (35,5%)
			San Pedro				8,36Km (48,3%)
			Total				1.686L/s (33,7%) 98,5Km (33,8%)
		Aducc.	VACA	117Km (53,5%)	3.172L/s (69,2%)	0,308	
			NACA	121,4Km (55,9%)			
			Total	1.410L/s (30,8%) 238,4Km (54,7%)			
		PTAP	PF Antigua Salar del Carmen	500L/s (27%)	850L/s (45,9%)	0,541	
			PF Nueva Salar del Carmen	500L/s (27%)			
	Total		1.000L/s (54,1%)				
	Estanques	PFSC	10.000m ³ (15,7%)	28.800m ³ (45,1%)	0,549		
		Caracoles I	12.500m ³ (19,6%)				
		Caracoles II	12.500m ³ (19,6%)				
		Total	35.000m³ (54,9%)				
	PEAC - Lequena 2		650L/s (14,1%)	3972L/s (85,9%)	0,141		
	Total Producción			1.000L/s (54,1%)	850L/s (45,9%)	0,541	
	Distribución	Conducciones	Alimentadora Norte	4,12Km (71,2%)	1,67Km (28,8%)	0,716	
			Alimentadora Sur	5,17Km (43,3%)			
			Impulsión Desaladora	13,82Km (88,4%)			
VACA Caracoles - Ancla			2,35Km (62,2%)				
Aducción Cerro Moreno			9,98Km (97,7%)				
Interc. Ancla - Amarillos			2,91Km (46,7%)				
Total			38,35Km (71,6%)	15,23Km (28,4%)			
Estanques		La Chimba I y II	6.000m ³ (10,1%)	27.940m ³ (46,8%)	0,532		
	Bonilla I-III	9.000m ³ (15,1%)					
	Balmaceda	2.000m ³ (3,4%)					
	Amarillos I-V	10.756m ³ (18%)					

			Independencia I y II	2.000m3 (3,4%)			
			Sur	2.000m3 (3,4%)			
			Total	31.756m3 (53,2%)			
		PEAP		Estanque La Chimba	70L/s (6,5%)	750L/s (70,1%)	0,299
				Estanques Bonilla	150L/s (14%)		
				Impulsión Bonilla	100L/s (9,3%)		
				Total	320L/s (29,9%)		
		Sectores	La Chimba	Estanques (100%)	0	100%	
				PEAP (100%)			
				48,03Km (83,7%)			
			Bonilla	Estanques (100%)	0	100%	
				PEAP (100%)			
				154,32Km (92,4%)			
			Balmaceda	Estanque (100%)	0	100%	
				33,87Km (91,8%)			
			Prat	55,7Km (93,7%)	100%	29860 (93,7%)	
			El Salto	18,4Km (84,3%)	100%	8780 (84,3%)	
			Ancla	77,49Km (84,3%)	100%	40873 (84,3%)	
			Centro	43,08Km (55,7%)	100%	22250 (55,7%)	
			Alto Gran Via	2,61Km (57%)	100%	843 (57%)	
Amarillos	Estanques (100%)		0	100%			
	54,81Km (81,7%)						
Independencia	Estanques (100%)		0	100%			
	2,92Km (15,5%)						
Sur	Estanques (100%)	0	100%				
	33,2Km (58,3%)						
Total Distribución			524,4Km 515,1L/s (66,2%)	263,2L/s (33,8%)	303.216 (91,1%)		
Sísmica de fallas	Producción	Captaciones	Toconce	7,3Km (7,7%)	3.272L/s (65,3%)	0,347	
			Lequena	Captación y 7,48Km (7,3%)			
			Quinchamale	3,35Km (4,5%)			
			Puente Negro	Captación y 1,26Km (72,8%)			
		Total	1.736L/s (34,7%) 19,39Km (6,7%)	17,78Km (6,1%)	0,939		
		Aducc.	VACA	38,68Km (17,7%)	3.172L/s (69,2%)	0,308	
			NACA	36,63Km (16,9%)			
			Total	1.410L/s (30,8%) 75,31Km (17,3%)			360,59Km (82,7%)
		PEAC - Puente Negro			150L/s (3,2%)	4.472L/s (96,8%)	0,032
		Estanques - NACA I			5.000m3 (7,8%)	58.800m3 (92,2%)	0,078
	Total Producción			1.000L/s (54,1%)	850L/s (45,9%)	0,541	
	Distribución	Conducc. - Alimentadora Sur			2,02Km (16,9%)	41,65Km (77,7%)	0,223
		Estanque - Centro			2.000m3 (3,4%)	57.696m3 (96,6%)	0,034
		Sectores	Centro	Estanque (100%)	0	100%	
				22,17Km (28,7%)			
			Alto Gran Vía	100%	0	100%	
			Independencia	100%	0	100%	
			Sur	100%	0	100%	
		Total Distribución			22,17Km (3,4%) 164,7L/s (21,2%)	613,6L/s (78,8%)	58.325 (17,5%)
	Tsunami	Producción	Captaciones - Bocatoma Desaladora			3.172L/s (63,3%)	1.836L/s (36,7%)
Aducc.			Impulsión Desaladora (Prod)	100%	1.410L/s (30,8%)	0,692	
			Segunda Imp. Desaladora	100%			
			Total	3.172L/s (69,2%) 0,21Km (0,1%)			435,69Km (99,9%)
PTAP - Planta Desaladora			850L/s (46%)	1.000L/s (54%)	0,459		
Estanques - Estanque Desaladora			1.800m3 (2,8%)	62.000m3 (97,2%)	0,028		
PEAP			Impulsión Desaladora (Prod)	1.200L/s (26%)	1.450L/s (31,4%)	0,686	
			Segunda Imp. Desaladora	1.972L/s (42,7%)			
			Total	3.172L/s (68,6%)			
Total Producción			850L/s (46%)	1.000L/s (54%)	0,459		
Distri	Se ct	PEAP - Impulsión Desaladora			600L/s (56,1%)	470L/s (43,9%)	0,561
		La Chimba			100%	0	100%

		Bonilla	109,71L/s (38,2%)	67,79L/s (61,8%) 51,92L/hab/dia	100%	
		Ancla	44,53L/s (38,2%)	72,07L/s (61,8%) 128,47L/hab/dia	100%	
		Amarillos	57,55L/s (38,2%)	93,15L/s (61,8%) 260,29L/hab/dia	100%	
Total Distribución			288,09L/s (37%)	490,21L/s (63%)	212549 (63,9%)	
Remociones en masa	Producción	Captaciones	Toconce	2,03Km (2,2%)	3.422L/s (68,3%)	0,317
			Lequena	0,53Km (0,5%)		
			Quinchamale	1,05Km (1,4%)	19,4Km (6,66%)	0,933
			Total	1.586L/s (31,7%) 3,61Km (1,2%)		
		Aducciones - VACA	0,24Km (0,11%)	3.972L/s (86,7%)	0,133	
	Total Producción			317L/s (17,1%)	1.533L/s (82,9%)	0,171
	Distribución	Conducciones	Alimentadora Norte	4,77Km (82,4%)	1,02Km (17,6%)	0,264
			Alimentadora Sur	2,68Km (22,5%)	9,25Km (77,5%)	
			Impulsión Desaladora	1,77Km (11,3%)	13,87Km (88,7%)	
			VACA Caracoles - Ancla	0,56Km (14,8%)	3,22Km (85,2%)	
			Aducción Cerro Moreno	2,63Km (25,8%)	7,58Km (74,2%)	
			Interc. Ancla - Amarillos	1,76Km (28,3%)	4,47Km (71,7%)	
			Total	14,16Km (26,4%)	39,42Km (73,6%)	
		Estanques	Bonilla I-III	9.000m3 (15,1%)	46.696m3 (78,2%)	0,218
			Balmaceda	2.000m3 (3,4%)		
Prat			2.000m3 (3,4%)			
Total	13.000m3 (21,8%)					
PEAP - Estanques Bonilla	150L/s (14%)	920L/s (86%)	0,140			
Sectores	La Chimba	0,83Km (1,4%)	100,0%	295 (1,4%)		
	Bonilla	Estanques (100%)	0	100%		
		PEAP (60%)				
		17,94Km (10,7%)				
	Balmaceda	Estanques (100%)	0	100%		
		2,01Km (5,4%)				
	Prat	Estanques (100%)	0	100%		
		2,86Km (4,8%)				
	El Salto	0,88Km (4%)	100%	420 (4%)		
	Centro	12,29Km (15,9%)	100%	6348 (15,9%)		
	Alto Gran Via	1,29Km (28,2%)	100%	417 (28,2%)		
	Amarillos	9,55Km (14,2%)	100%	4401 (14,2%)		
Independencia	0,89Km (4,7%)	100%	257 (4,7%)			
Sur	5,72Km (10,1%)	100%	1153 (10,1%)			
Total Distribución			54,26Km (8,2%) 254,8L/s (32,7%)	535,5L/s (67,3%)	177.600 (53,4%)	
Volcánica-Producción	Captaciones - San Pedro		Capt. y 5,89Km (34%)			
				4908L/s (98%)	0,020	
			274,08Km (94,1%)	0,059		
Invierno Altiplánico	Producción	Captaciones	Toconce	100%	3.172L/s (63,2%)	0,367
			Lequena	100%		
			Quinchamale	100%		
			Puente Negro	100%		
			San Pedro	100%		
		Total	1.836L/s (36,7%)			
Total Producción			1.000L/s (54,1%)	850L/s (45,9%)	0,541	
Cambio climático	Producción - Captaciones	2011-2030	Toconce	145,07L/s (32,1%)	2656,41L/s (86,3%)	0,137
			Lequena	158,64L/s (32,1%)		
			Quinchamale	95,05L/s (32,1%)		
			Puente Negro	23,11L/s (51,2%)		
			Total	421,87L/s (13,7%)		
		2031 - 2050	Toconce	253,73L/s (56,1%)	2340,51L/s (76%)	0,240
			Lequena	277,47L/s (56,1%)		
			Quinchamale	166,25L/s (56,1%)		
			Puente Negro	40,33L/s (89,34%)		
Total	737,77L/s (24%)					

		Total Producción	137L/s (7,4%) - 240L/s (13%)	1.713L/s (92,6%) - 1.610 (87%)	0,074 - 0,130	
Distribución - Sectores	2011-2030	Balmaceda	9,03L/s (32,7%)	18,57L/s (67,3%) 81,76L/hab/día	100%	
		Prat	16,25L/s (32,7%)	33,45L/s (67,3%) 90,65L/hab/día	100%	
		El Salto	4,97L/s (32,7%)	10,23L/s (67,3%) 84,89L/hab/día	100%	
		Centro	25,11L/s (32,7%)	51,69L/s (67,3%) 111,8L/hab/día	100%	
		Alto Gran Vía	1,6L/s (32,7%)	3,3L/s (67,3%) 192,51L/hab/día	100%	
		Independencia	11,05L/s (32,7%)	22,75L/s (67,3%) 361,88L/hab/día	100%	
		Sur	16,09L/s (32,7%)	33,11L/s (67,3%) 249,44L/hab/día	100%	
	2031-2050	Balmaceda	15,79L/s (57,2%)	11,81L/s (42,8%) 52L/hab/día	100%	
		Prat	28,43L/s (57,2%)	21,27L/s (42,8%) 57,65L/hab/día	100%	
		El Salto	8,69L/s (57,2%)	6,51L/s (42,8%) 53,98L/hab/día	100%	
		Centro	43,93L/s (57,2%)	32,87L/s (42,8%) 71,1L/hab/día	100%	
		Alto Gran Vía	2,8L/s (57,2%)	2,1L/s (42,8%) 122,43L/hab/día	100%	
		Independencia	19,33L/s (57,2%)	14,47L/s (42,8%) 230,14L/hab/día	100%	
		Sur	28,14L/s (57,2%)	21,06L/s (42,8%) 158,63L/hab/día	100%	
	Total Distribución	84,1L/s (32,7%) - 147,12L/s (57,2%)	173,1L/s (67,3%) - 110,08L/s (42,8%)	120247 (36,1%)		
Accidentes externos	Distribución Sectores	La Chimba	9 cortes, 4:52 horas	99,6%	8357 (41%)	
		Bonilla	47 cortes, 6:11 horas	99,8%	4916 (4,4%)	
		Balmaceda	9 cortes, 4:25 horas	99,6%	7969 (40,6%)	
		Prat	14 cortes, 3:21 horas	99,9%	3822 (12%)	
		El Salto	9 cortes, 3:04 horas	99,9%	1476 (14,2%)	
		Ancla	45 cortes, 3:24 horas	99,7%	3776 (7,8%)	
		Centro	23 cortes, 3:57 horas	99,8%	4906 (12,3%)	
		Alto Gran Vía	1 cortes, 3:20 horas	99,9%	2650 (179,1%)	
		Amarillos	20 cortes, 4:13 horas	99,7%	7406 (24%)	
		Independencia	10 cortes, 4:43 horas	99,3%	4964 (91,4%)	
		Sur	8 cortes, 3:35 horas	99,9%	2898 (25,3%)	
		Total Distribución	195 cortes, 4:21 horas	99,8%	4878 (1,5%)	
Cortes eléctricos	Producción	Captaciones	Puente Negro	150L/s (3%)	4758L/s (95%)	0,050
			San Pedro	100L/s (2%)		
			Total	250L/s (5%)		
		PTAP - Planta Desaladora	840,42L/s (98,9%)	1009,58L/s (54,6%)	0,454	
		Total Producción	890,42L/s (48,1%)	959,58L/s (51,9%)	0,481	
	Distribución	Bombeo	Impulsión Desaladora	600L/s (56,1%)	0	1
			Estanque La Chimba	70L/s (6,5%)		
			Estanques Bonilla	150L/s (14%)		
			Impulsión Bonilla	100L/s (9,3%)		
			Estanque Ancla	150L/s (14%)		
			Total	1.070L/s (100%)		
Sectores		La Chimba	PEAP (100%)	0	100%	
	Bonilla	PEAP (100%)	0	100%		
	Ancla	PEAP (100%)	72,07L/s (61,8%) 128,47L/hab/día	100%		
	Amarillos	57,55L/s (38,2%)	93,15L/s (61,8%) 260,29L/hab/día	100%		

		Total Distribución	355,88 (45,7%)	422,42 (54,3%) 109,67L/hab/día	212549 (63,9%)			
Golpe de ariete - Producción		Captación - San Pedro	100L/s (2%)	4908L/s (98%)	0,020			
		Aducción - VACA	610L/s (13,3%)	3972L/s (86,7%)	0,133			
		Total Producción	20L/s (1,1%)	1.830L/s (98,9%)	0,011			
Materialidad	Distribución	Producción - Captación - Hojalar		0,51Km (14,3%)	100%	0,000		
		Sectores	La Chimba	7,81Km (13,6%)	49,56Km (86,4%)	2769 (13,6%)		
			Bonilla	40,15Km (24%)	126,91Km (76%)	27072 (24%)		
			Balmaceda	23,78Km (64,4%)	13,13Km (35,6%)	12641 (64,4%)		
			Prat	37,6Km (63,2%)	21,87Km (36,8%)	20149 (63,2%)		
			El Salto	13,99Km (64,1%)	7,83Km (35,9%)	6674 (64,1%)		
			Ancla	44,08Km (48%)	47,8Km (52%)	23265 (48%)		
			Centro	55,39Km (71,6%)	21,96Km (28,4%)	28601 (71,6%)		
			Amarillos	27,67Km (41,2%)	39,42Km (58,8%)	12739 (41,2%)		
			Independencia	10,03Km (53,2%)	8,81Km (46,8%)	2889 (53,2%)		
		Sur	8,13Km (14,3%)	48,78Km (85,7%)	1640 (14,3%)			
	Total Distribución	268,64Km (40,7%)	390,65Km (59,3%)	135448 (40,7%)				
Envejecimiento	Producción	Captaciones	Toconce	100%	3.322L/s (66,2%)	0,337		
			Lequena	Capt. y 98,97Km (96,1%)				
			Quinchamale	100%				
			San Pedro	16,04Km (92,6%)			2,08Km (0,7%)	0,993
			Total	1.686L/s (33,7%) 284,04Km (97,5%)				
		Aducciones - VACA	204,4Km (93,5%)	3972L/s (86,7%)	0,133			
				217,39Km (49,9%)	0,501			
		PTAP - PF Antigua Salar del Carmen	500L/s (27%)	1350L/s (73%)	0,270			
		Estan.	Caracoles I	12.500m3 (19,6%)	38800m3 (60,8%)	0,392		
			Caracoles II	12.500m3 (19,6%)				
			Total	25000m3 (39,2%)				
		PEAP	Puente Negro	150L/s (3,2%)	3272L/s (70,8%)	0,292		
			Impulsión Desaladora (Prod)	1.200L/s (26%)				
			Total	1350L/s (29,2%)				
			Total Producción	668,5L/s (36,1%)	1.181,5L/s (63,9%)	0,361		
		Envejecimiento	Distribución	Conducc.	Alimentadora Sur	0,51Km (4,3%)	11,42Km (95,7%)	0,068
					VACA Caracoles - Ancla	3,16Km (83,6%)	50,42Km (94,1%)	
Total	3,67Km (6,8%)				49,91Km (93,2%)			
Estanques	El Salto I			500m3 (0,8%)	32.940m3 (55,2%)	0,448		
	Ancla II			12.500m3 (20,9%)				
	Centro			2.000m3 (3,4%)				
	Amarillos I-V			10.756m3 (18%)				
	Independencia I			1.000m3 (1,7%)				
	Total			26.756m3 (44,8%)				
PEAP	Impulsión Desaladora			600L/s (56,1%)	150L/s (14%)	0,860		
	Estanque La Chimba			70L/s (6,5%)				
	Impulsión Bonilla			100L/s (9,3%)				
	Estanque Ancla			150L/s (14%)				
	Total			920L/s (86%)				
Sectores	La Chimba			PEAP (100%)	0	100%		
				6,39Km				
	Bonilla			PEAP (40%)	109,71L/s (61,8%) 84,03L/hab/dia	24929 (22,1%)		
		36,86Km (22,1%)						
	Balmaceda	22,85Km (61,9%)	100%	12150 (61,9%)				
	Prat	39,69Km (66,7%)	100%	21265 (66,7%)				
	El Salto	Estanque (71,4%)	4,35L/s (28,6%) 36,07L/hab/dia	7715 (74,1%)				
		16,17Km (74,1%)						
	Ancla	Estanque (55,6%)	63,43L/s (54,4%) 113,07L/hab/dia	27336 (56,4%)				
		PEAP (100%)						
		51,86Km (56,4%)						
Centro	Estanque (100%)	0	100%					
	61,93Km							
Amarillos	Estanques (100%)	0	100%					

Rotura y falla de matrices	Distribución	Sector		46,71Km			
			Independencia	Estanque (50%)	10,8L/s (32%)	3492 (64,3%)	
				12,11Km (64,3%)	171,8L/hab/día		
			Sur	8,24Km (14,5%)	100%	1663 (14,5%)	
		Total Distribución			302,79Km (45,9%) 602,77L/s (77,4%)	175,53L/s (22,6%)	331.316 (99,6%)
		Sector	La Chimba	82 cortes, 2:36 horas	98,8%	2063 (10,1%)	
			Bonilla	234 cortes, 2:38 horas	99,0%	4357 (3,9%)	
			Balmaceda	81 cortes, 3:13 horas	99,0%	2407 (12,3%)	
			Prat	188 cortes, 3:14 horas	98,3%	2483 (7,8%)	
			El Salto	48 cortes, 2:59 horas	98,7%	2553 (24,5%)	
			Ancla	154 cortes, 2:45 horas	99,1%	1870 (3,9%)	
			Centro	234 cortes, 3:15 horas	98,5%	1899 (4,8%)	
Alto Gran Vía	6 cortes, 2:20 horas		99,6%	1361 (92%)			
Amarillos	83 cortes, 3:53 horas		98,5%	4595 (14,9%)			
Independencia	27 cortes, 3:09 horas		99,5%	1435 (26,4%)			
Sur	52 cortes, 2:42 horas		98,8%	2766 (24,1%)			
Total Distribución			1189 cortes, 3:01 horas	98,8%	2757 (0,8%)		

Fuente: Elaboración propia en base a Aguas Antofagasta (2011a; 2014; 2017), CEPIS (1996), Alonso (2008), DGA (2014), Monsalve (2018), Rojas (2012), ONEMI (2012), SERNAGEOMIN (2003; 2014) y SISS (2006; 2011c; 2011d; 2015; 2017; s/f b) y Torres (2016)