



Actualización del Plan Maestro de Aguas Lluvias de la ciudad de Antofagasta

Resumen Ejecutivo



En alianza con:

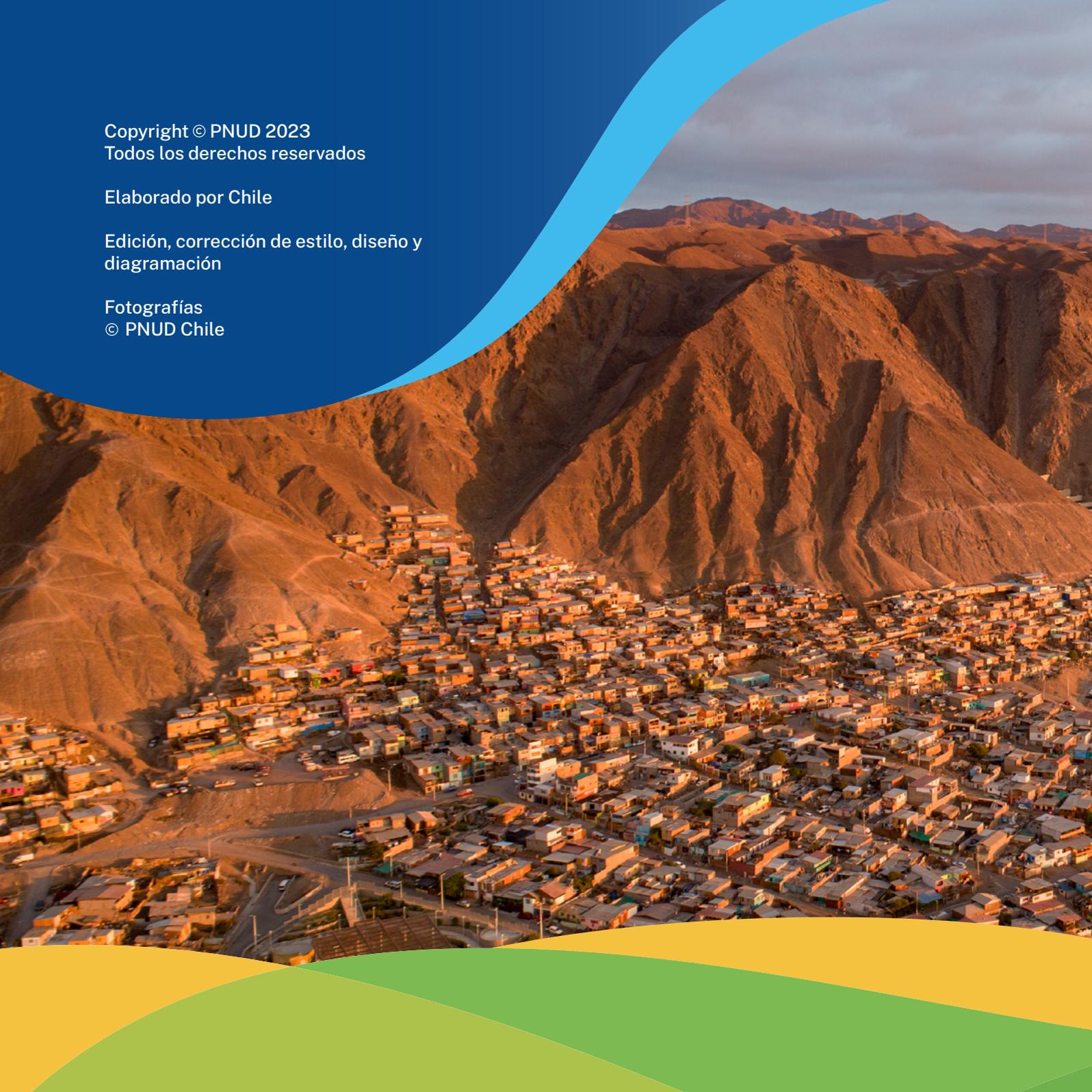


Copyright © PNUD 2023
Todos los derechos reservados

Elaborado por Chile

Edición, corrección de estilo, diseño y
diagramación

Fotografías
© PNUD Chile





Índice de contenidos

	PRÓLOGO	08
1.	INTRODUCCIÓN	11
1.1.	ANTECEDENTES GENERALES	11
1.2.	OBJETIVOS DEL ESTUDIO	13
1.3.	ALCANCE DEL ESTUDIO	14
2.	ÁREA DE ESTUDIO Y CUENCA APORTANTE	15
3.	CARTOGRAFÍA Y ACTIVIDADES DE TERRENO	16
3.1.	LEVANTAMIENTO AEROFOTOGRAMÉTRICO	16
3.2.	LEVANTAMIENTO DE CRUCES DE CALLES	17
3.3.	PERFILES TRANSVERSALES EN 5 QUEBRADAS	17
4.	ESTUDIOS BÁSICOS	18
4.1.	HIDROLOGÍA CON PROYECCIONES DE CAMBIO CLIMÁTICO	18
4.1.1.	OBJETIVO Y ALCANCE	18
4.1.2.	ANÁLISIS DE LAS PRECIPITACIONES EN EL PERIODO HISTÓRICO 1979-2020	19

4.1.3.	PROYECCIONES FUTURAS DE LA PRECIPITACIÓN EN EL PERIODO 2035-2065	19
4.1.4.	COMPARACIÓN DE INTENSIDADES DE LLUVIA BASADAS EN LA HIDROLOGÍA HISTÓRICA Y EN LA HIDROLOGÍA CON CAMBIO CLIMÁTICO	20
4.1.5.	CAUDALES DE CRECIDA	20
5.	POBLACIÓN EN CONOS DE DEYECCIÓN Y EXPOSICIÓN A RIESGOS CLIMÁTICOS	25
6.	PATRÓN DE DRENAJE	28
7.	DIAGNÓSTICO DE LA SITUACIÓN ACTUAL DE INUNDACIONES	30
7.1.	DIAGNÓSTICO DE LA SITUACIÓN ACTUAL SIN CAMBIO CLIMÁTICO	30
7.2.	DIAGNÓSTICO DE LA SITUACIÓN ACTUAL CON CAMBIO CLIMÁTICO	35
7.3.	DIAGNÓSTICO DE INUNDACIONES EN SITUACIÓN ACTUAL EN 5 QUEBRADAS	39
8.	CATASTROS PARA ETAPAS FUTURAS DE ACTUALIZACIÓN DEL PLAN MAESTRO	42
9.	SÍNTESIS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	43
9.1.	SÍNTESIS	43
9.2.	CONCLUSIONES	45
9.3.	RECOMENDACIONES	46

Índice de tablas

Tabla 4.1	CURVAS IDF PERIODO HISTÓRICO (1979-2020) Y PROYECCIÓN CAMBIO CLIMÁTICO (2035-65)	21
Tabla 4.2	CAUDALES LÍQUIDOS MÁXIMOS INSTANTÁNEOS SIN Y CON EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO	23
Tabla 5.1	GRADO DE EXPOSICIÓN AL RIESGO CLIMÁTICO EXTREMO DE LOS CAMPAMENTOS	26
Tabla 7.1	VÍAS DE ESCURRIMIENTO IDENTIFICADAS PARA CADA QUEBRADA	33

Índice de figuras

Figura 1.1	ÁREA DE ESTUDIO Y CUENCAS QUE DRENAN HACIA EL PLANO URBANO DE ANTOFAGASTA	13
Figura 4.1	CURVAS IDF PERIODO HISTÓRICO (1979-2020) Y PROYECCIÓN CAMBIO CLIMÁTICO (2035-65)	22
Figura 6.1	EJEMPLO DEL PATRÓN DE DRENAJE DE ALGUNAS CUENCAS URBANAS	29
Figura 7.1	ÁREAS DE INUNDACIÓN DE LA QUEBRADA EL TORO, PARA T=25 Y T=100 AÑOS	31
Figura 7.2	ÁREAS DE INUNDACIÓN QUEBRADAS RIQUELME, BAQUEDANO Y URIBE. T=25 Y T=100 AÑOS	32
Figura 7.3	RESULTADOS PARA LA QUEBRADA EL TORO CON PROYECCIÓN DE CAMBIO CLIMÁTICO	36
Figura 7.4	INUNDACIONES DE QUEBRADAS RIQUELME, BAQUEDANO Y URIBE CON CAMBIO CLIMÁTICO	37
Figura 7.5	ÁREAS DE INUNDACIÓN EN QUEBRADA LA ROCA	38

Figura 7.6

ÁREAS DE INUNDACIÓN EN QUEBRADA LA ROCA EN SECTOR
DE LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO

40

Figura 7.7

ÁREAS DE INUNDACIÓN EN QUEBRADA LA ROCA EN SECTOR
DE LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO

41

PRÓLOGO

El presente documento se enmarca en el proyecto **“Reducción de la vulnerabilidad climática y el riesgo de inundación en áreas urbanas y semi urbanas costeras en ciudades de América Latina”**, AdaptaClima. Iniciativa del Ministerio del Medio Ambiente de Chile, implementado por CAF-Banco de Desarrollo de América Latina y el Caribe y financiado por el Fondo de Adaptación, ejecutado por el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo en Chile (PNUD) actúa como entidad ejecutora. En colaboración con el Ministerio de Obras Públicas, a través de la Secretaría Regional Ministerial de Obras Públicas en Antofagasta, Dirección de Obras Hidráulicas y Dirección General de Aguas, SENAPRED, la Dirección General de Aeronáutica Civil por medio de la Dirección Meteorológica de Chile.

El objetivo del proyecto es reducir la vulnerabilidad a inundaciones, flujos de lodo y deslizamientos de tierra relacionados con el clima en tres ciudades costeras mediante la incorporación de un enfoque basado en el riesgo para la adaptación, construyendo acciones colaborativas y creación de redes, y el desarrollo de una cultura de adaptación. El proyecto se enfoca en los peligros hidrometeorológicos de los flujos de lodo en Antofagasta y Taltal. Los impactos previstos a medio plazo son condiciones habilitantes mejoradas para mantener la adaptación a la Reducción del Riesgo de Desastres en las dos ciudades. A largo plazo, se espera que esto dé como resultado una capacidad de adaptación mejorada. También se prevé que las lecciones del proyecto sean

útiles para otros países de América Latina y el Caribe y otras regiones del mundo.

El proyecto está organizado en tres componentes:

El **Componente 1** se enfocará en acciones prioritarias para aumentar la resiliencia en las tres ciudades. Se generarán cuatro resultados integrando la RRD en la planificación local, construyendo infraestructura que incorpore variables relacionadas con el clima, mejorando el monitoreo del clima y fortaleciendo los sistemas existentes de alerta temprana y respuesta.

El **Componente 2** se enfocará en fortalecer las capacidades de los funcionarios y comunidades del gobierno local, así como en fortalecer las conexiones entre las comunidades y el gobierno local y nacional. Se generarán dos resultados desarrollando un curso de capacitación en línea sobre adaptación basada en el riesgo para funcionarios municipales y gubernamentales y personal técnico, e implementando estrategias de comunicación y educación para aumentar la conciencia local y contribuir a la construcción de la memoria cultural. El curso en línea estará abierto a profesionales de otras ciudades costeras de América Latina y el Caribe.

El **Componente 3** se enfocará en nutrir las comunidades de práctica del proyecto y documentar y diseminar las lecciones. La columna vertebral del proyecto regional son las comunidades de práctica que permiten el

desarrollo de aprendizaje colectivo sobre temas específicos. Se desarrollarán cinco comunidades de práctica.

De acuerdo al componente 1 entre sus principales productos se realizó la actualización del Plan Maestro de Drenaje y Evacuación de Aguas Lluvias de Antofagasta, que no solo incluyera información actualizada de las condiciones físicas y del desarrollo urbano de la ciudad, sino además, que incorporara entre sus antecedentes, eventos climáticos recientes como el ocurrido en la zona norte del país el año 2015 y proyecciones climáticas para los años 2035 y 2065, el cual se detalla a continuación.





1

INTRODUCCIÓN

1.1 ANTECEDENTES GENERALES

Un plan maestro de evacuación y drenaje de aguas lluvias, es un instrumento normativo que forma parte de las herramientas de planificación y desarrollo urbano de una ciudad, considera una integración sistémica del drenaje urbano y su interdependencia con el ordenamiento territorial, respondiendo además a las necesidades sociales y ambientales relacionadas específicamente con el manejo de las aguas lluvias.

La ciudad de Antofagasta cuenta hoy en día con un Plan Maestro de Aguas Lluvias (PM-26), sin embargo, éste data del año 2004 y por lo mismo, se encuentra desactualizado ya que en su oportunidad incorporó un escenario poblacional muy distinto al existente a la fecha (2022), además que no tomó en cuenta aspectos relevantes de los fenómenos climáticos que en la actualidad se consideran cruciales, como son las proyecciones de cambio climático para décadas futuras.

Las proyecciones más recientes hacen ver que ocurrirán severas modificaciones de los períodos estacionales de lluvia y sequía, con eventos climáticos más intensos y frecuentes, como tormentas costeras y además, un incremento en el nivel del mar, por lo cual resultan fundamentales medidas de adaptación al cambio climático para reducir el riesgo de pérdidas humanas y materiales, particularmente, pero no solo, en zonas costeras.

Las medidas de adaptación señaladas deben tener presente particularmente el hecho que los efectos adversos del fenómeno climático se están traduciendo en una clara intensificación de los desastres naturales como inundaciones, flujos aluvionales y deslizamientos de tierra, los que ya están afectando la vida y bienestar de seres humanos, y provocando daños y pérdidas económicas a las viviendas, infraestructura y servicios de territorios donde se encuentran asentados.

Dentro del proyecto mencionado se consideró importante llevar a cabo la actualización del Plan Maestro de Drenaje y Evacuación de Aguas Lluvias de Antofagasta, que no solo incluyera información actualizada de las condiciones físicas y del desarrollo urbano de la ciudad, sino además, que incorporara entre sus antecedentes, eventos climáticos recientes como el ocurrido en la zona norte del país el año 2015 y proyecciones climáticas para los años 2035 y 2065. El presente estudio aborda las primeras etapas de la actualización del Plan Maestro de Aguas Lluvias de la ciudad de Antofagasta, incluyendo información actualizada de la red de drenaje y de las características de 27 cuencas aportantes del piedemonte de la ciudad, cubriendo una extensión de alrededor de 30 km siguiendo una dirección paralela a la línea de costa, desde la quebrada N0 por el norte (ubicada al norte de las quebradas N1, N2 y Varas Norte) hasta la quebrada Roca Roja por el sur, conjunto que define el área de estudio que muestra la Figura 1.1.

Adicionalmente incorpora las proyecciones de cambio climático para el periodo 2035 a 2065 para determinar los caudales de diseño de los sistemas de colectores primarios de la red de aguas lluvias.

1.2. OBJETIVOS DEL ESTUDIO

El objetivo general del estudio es reunir, obtener, procesar y analizar información actualizada de la ciudad de Antofagasta, orientada a caracterizar hidrológicamente y mediante modelaciones hidráulicas, la situación actual del drenaje de aguas lluvias de su plano urbano, suponiendo válida la hidrología de eventos extremos basada en los registros históricos del periodo 1979 a 2020, como también la de la situación futura a través del mismo tipo de simulaciones, incorporando las proyecciones de cambio climático, obtenidas de la aplicación de Modelos de Circulación Global (GCM) para el periodo 2035-2065.

Los resultados de las caracterizaciones señaladas permitirán abordar en el futuro las siguientes etapas de la actualización del Plan Maestro de Evacuación y Drenaje de Aguas Lluvias de la ciudad de Antofagasta para su formulación detallada, incluyendo la red primaria de colectores.

De acuerdo a los Términos de Referencia del estudio, los objetivos específicos de la presente actualización del presente estudio pueden resumirse como sigue:



Recopilación y revisión de antecedentes.



Levantamiento aerofotogramétrico de 172 km² de la ciudad de Antofagasta mediante vuelo Lidar u otro y generación de ortomosaico.



Figura 1.1 Área de estudio y cuencas que drenan hacia el plano urbano de Antofagasta



Elaboración de un diagnóstico preliminar de la problemática de evacuación y drenaje en el área urbana de Antofagasta.



Actualización del estudio hidrológico, elaboración de curvas Intensidad Duración Frecuencia (IDF) y mapa de isoyetas, definición de la tormenta de diseño y determinación de caudales de crecidas para cuencas externas al área de estudio.



Elaboración de modelos numéricos de simulación de la escorrentía superficial en el área de estudio y cuencas aportantes.



Planteamiento y desarrollo de una metodología que permita conocer el comportamiento hidrológico de las quebradas y su correlación con el sistema de aguas lluvias en un horizonte futuro que considera la proyección climática para el escenario más desfavorable de efecto invernadero RCP8.5 (Forzamiento Radiactivo Representativo RCP, por sus siglas en inglés, en W/m^2), que se plantean para la presente consultoría, y que sea útil en ciudades costeras no solamente de Antofagasta, sino de otras ciudades costeras nortinas del país.



Incorporación de los efectos del cambio climático al análisis hidrológico para la determinación de los caudales diseño y su correspondiente periodo de retorno.



Actualización de información de la población formal e informal instalada en el cono de deyección de cada una de las quebradas que descargan al radio Urbano de la ciudad de Antofagasta.

1.3. ALCANCE DEL ESTUDIO

Según se desprende de lo expuesto precedentemente, el estudio abarca la actualización de aspectos básicos del Plan Maestro de Aguas Lluvias de Antofagasta, en lo que refiere básicamente a cartografía del área de interés, estudio hidrológico y las primeras etapas del estudio hidráulico con fines de diagnóstico de la situación actual del área urbana.

Se incorporaron en el desarrollo del estudio aquellos aspectos recomendados para adaptarse al cambio climático, en particular, proyecciones climáticas de la región, basadas en las siguientes publicaciones: “Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático”, Ministerio de Medio Ambiente – 2014; “Política de Sustentabilidad Ambiental del Ministerio de Obras Públicas”, diciembre 2016; “Plan de Adaptación y Mitigación de los Servicios de Infraestructura al cambio Climático 2017–2022”, Ministerio de Obras Públicas 2017; “Diagnóstico de la Vulnerabilidad de las Obras del MOP y Medidas de Adaptación al Cambio Climático”, Ministerio de Obras Públicas, 2018; “Atlas de Riesgo Climático del Ministerio del Medio Ambiente (ARClím)”, desarrollado por el Centro de Cambio Global UC y el Centro de Ciencia del Clima y Resiliencia (CR)², 2020.



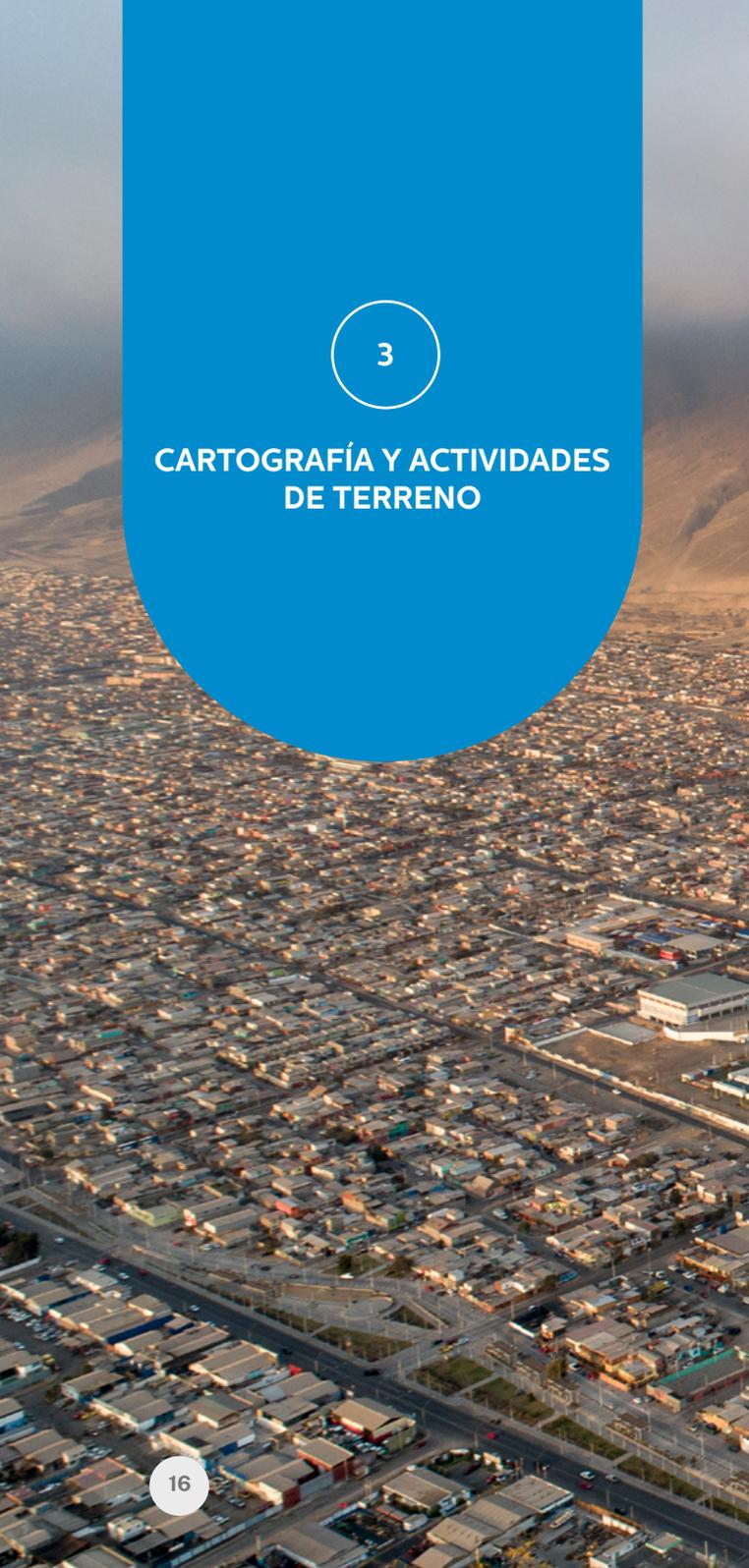
2

ÁREA DE ESTUDIO Y CUENCA APORTANTE

El área de estudio comprende las cuencas aportantes que drenan hacia la ciudad de Antofagasta, desde sus divisorias de aguas hasta su descarga en el mar (Océano Pacífico), dentro de la cual se incluyen las áreas definidas como urbanas en la actualidad, así como las zonas de expansión urbana proyectadas.

El área de estudio que muestra la Figura 1.1 corresponde a la superficie demarcada con línea roja que como se ha señalado, comprende todas las cuencas de las quebradas que drenan sobre el plano urbano de la ciudad, cuya escorrentía afecta directamente el área de estudio.

Las cuencas fueron graficadas en 3 láminas escala 1:20.000.



3

CARTOGRAFÍA Y ACTIVIDADES DE TERRENO

La obtención y generación de información cartográfica y topográfica de terreno, incluyó el levantamiento aerofotogramétrico de Antofagasta y una parte de las cuencas aportantes que drenan sus aguas hacia el plano urbano, apoyado en una poligonal terrestre y el levantamiento altimétrico y planimétrico de puntos en intersecciones de calles y avenidas relevantes y de cruce de colectores primarios, cuyo trazado se encuentra bien definido en el Plan Maestro PM-26 o que fueron actualizados en el presente estudio, como también el levantamiento de perfiles transversales en 5 quebradas que no cuentan con obras aluvionales a la fecha, consideradas por la Dirección de Obras Hidráulicas (DOH) como representativas para el estudio de los ejes hidráulicos y la delimitación de áreas de inundación en sus tramos finales, inmediatamente aguas arriba de sus descargas a las calles.

3.1. LEVANTAMIENTO AEROFOTOGRAMÉTRICO

Se realizó el levantamiento aerofotogramétrico de la ciudad de Antofagasta en escala de 1:1000, mediante un dron DJI Matrice 300 RTK.

Este levantamiento se apoyó en una red primaria, la cual fue complementada mediante una red secundaria para asegurar una intervisibilidad entre los puntos de referencia (PRs), cuya monumentación fue vinculada altimétrica y planimétrica al vértice IGM CORS Mejillones.

A partir de las capturas aerofotogramétricas en 20 polígonos, se obtuvo la información que permitió generar 58 ortofotomosaicos con sus respectivas mallas TIN y mallas DEM de los cuales se obtuvieron las curvas de nivel cada 1 m para caracterizar la topografía actualizada del área de estudio.

A partir de los ortomosaicos obtenidos de los vuelos aerofotogramétricos y su correspondiente postproceso, se realizó la restitución de la mencionada área de estudio, considerando múltiples capas de información digitalizadas, consideradas necesarias para realizar posteriormente una adecuada actualización del Plan Maestro, tales como: red de PRs; curvas de nivel; cotas de intersecciones de calles, puntos bajos y altos relevantes; trazado de manzanas; subdivisión predial a nivel de manzanas, líneas de solera; ejes de las calles; red vial; huellas y senderos; construcciones importantes; sectores de servicios (bomberos, hospitales, etc.); red ferroviaria; hidrografía; arborización y áreas verdes; toponimia (nombre de lugares, calles y otros); límite urbano actual; demarcación de coordenadas UTM, entre otras.

3.2. LEVANTAMIENTO DE CRUCES DE CALLES

El trabajo aerofotogramétrico fue complementado mediante el levantamiento de puntos aislados con metodología RTK, a fin de obtener las cotas en los cruces de calles principales con líneas de trazado de futuros colectores de la red primaria de aguas lluvias,

e intersecciones de calles y avenidas principales a lo largo de la ciudad de Antofagasta, de interés para el presente estudio. Este levantamiento abarcó en total 474 puntos.

3.3. PERFILES TRANSVERSALES EN 5 QUEBRADAS

De acuerdo a lo definido en los Términos de Referencia y en función del presupuesto para el estudio, la DOH seleccionó en el área de estudio las quebradas N1, La Roca, Schneider, S2 y S3, con el objetivo de caracterizar su comportamiento hidráulico, para lo cual se ejecutó en cada una de ellas, un levantamiento topográfico consistente en la toma de perfiles transversales en los tramos finales de estas quebradas con las siguientes longitudes:

Quebrada N1:	338 m y 14 perfiles.
Quebrada La Roca:	643 m y 27 perfiles.
Quebrada Schneider:	158 m y 9 perfiles.
Quebrada S2:	192 m y 11 perfiles.
Quebrada S3:	181 m y 8 perfiles.

Los levantamientos topográficos de estas quebradas fueron graficados en planos de planta, perfiles longitudinales y transversales en distintas escalas.

Los estudios básicos incluyeron la actualización del estudio hidrológico con proyecciones de cambio climático y la caracterización de la población expuesta a riesgos hidrometeorológicos, la que se ubica principalmente sobre los conos de deyección a lo largo de la ciudad.

4.1. HIDROLOGÍA CON PROYECCIONES DE CAMBIO CLIMÁTICO

4.1.1. Objetivo y alcance

El objetivo del estudio hidrológico fue determinar las precipitaciones y tormentas de diseño incorporando proyecciones de cambio climático para el periodo 2035-2065 bajo el escenario RCP8.5 (Forzamiento Radiactivo Representativo RCP, por sus siglas en inglés, en W/m^2), que corresponde a la proyección más desfavorable de acuerdo al Panel Intergubernamental en Cambio Climático (IPCC).

Para realizar un estudio comparativo, se caracterizaron las estadísticas de precipitación del periodo histórico (1979-2020) provenientes del producto CR2MET y su respectivo análisis de recurrencia. Además, a partir del manejo de datos de precipitación desagregados a escala temporal horaria, se estimaron hietogramas representativos para el área de estudio.

El estudio incluyó también, la caracterización morfométrica de las cuencas aportantes en el área de estudio y de la cobertura del suelo, concluyéndose que todas las cuencas se pueden clasificar con suelos constituidos principalmente por rocas, predominando solo en 6 de ellas un suelo tipo grava, lo cual tiene incidencia directa en la estimación de los coeficientes de escorrentía de dichas cuencas.

4.1.2. Análisis de las precipitaciones en el periodo histórico 1979-2020

Se realizó la corrección y validación del producto grillado del CR2MET para la obtención de datos de la distribución espacial de precipitación con resolución de 5 km para el periodo histórico (1979-2020).

Posterior a ello se realizó una desagregación de la estadística diaria de precipitación, determinando de esta manera datos a nivel horario, considerando como base, la distribución subdiaria obtenida del reanálisis atmosférico ERA5, de la base de datos de Copernicus.

Una vez obtenidos los datos a nivel horario en la grilla definida para el área de estudio, se procedió a determinar la precipitación asociada a cada cuenca de interés.

Seguidamente se analizaron las tormentas para el periodo histórico en base a las distribuciones temporales normalizadas asociadas a los eventos de máximas precipitaciones en bloques de 3, 6, 12 y 24 horas, determinando 5 tipos de distribuciones asociadas a las envolventes inferior y superior, al promedio de las distribuciones y 2 casos intermedios entre el promedio y cada envolvente.

A continuación se determinaron las curvas IDF a partir de la desagregación de los datos pluviométricos mencionada antes y ajustándolos al modelo propuesto por Chow.

A partir del análisis de la distribución espacial de la precipitación en el área de estudio, se definieron dos zonas para el área de estudio, las cuales se definieron como “zona urbana” y “zona no urbana”.

Para el caso de la zona no urbana, se adoptaron los valores asociados a la envolvente de las curvas IDF individuales obtenidas para cada quebrada, tomando de esta manera un criterio conservador.

Sin embargo, dada la variabilidad espacial de la precipitación a lo largo de Antofagasta, es posible subdividir a su vez la “zona no urbana” en norte y sur, observándose un aumento de la precipitación hacia el sur de la ciudad.

4.1.3. Proyecciones futuras de la precipitación en el periodo 2035-2065

De acuerdo a lo mencionado antes, para la proyección de las precipitaciones se seleccionó el escenario más desfavorable respecto a las emisiones de gases de invernadero (RCP 8.5) y las proyecciones de precipitación de los modelos climáticos CCSM4, CSIRO-Mk3-6-0, IPSL-CM5A-LR y MIROC-ESM, los mismos empleados en la actualización del Balance Hídrico Nacional y ARCLim, para el periodo 2035-2065.

Dentro de los procedimientos seguidos para la obtención de los resultados se realizó el escalamiento de los resultados de los cuatro modelos de circulación global (MCG), junto con la respectiva corrección de sesgo para las precipitaciones diarias, espacialmente agregadas a escala cuenca. Además se incluyeron las variables de temperatura mínima y amplitud térmica como variables codependientes.

La desagregación diaria de la precipitación a nivel horario se realizó en base a las observaciones del periodo histórico, dividiendo el análisis en grupos mensuales e incorporando las temperaturas mínimas y máximas diarias para determinar símiles climáticos. Si

bien lo anterior implica una incertidumbre intrínseca, se sustenta en el supuesto de que las distribuciones del pasado pueden repetirse en el futuro y de esta manera se evitan supuestos adicionales sobre posibles ajustes de distribuciones de probabilidad.

A partir de la misma metodología presentada para determinar las curvas IDF del periodo histórico, se obtuvieron las curvas IDF ajustadas según el modelo de Chow a los resultados derivados del análisis de frecuencia de las series de máximos anuales, en bloques de 1 a 24 horas, en el periodo 2035-2065 asociadas a cada uno de los MCG estudiados.

Dado que las proyecciones de cambio en las intensidades medias de precipitación presentan una gran dispersión entre los distintos modelos empleados, se adoptó el promedio de las curvas IDF derivadas de dichos modelos para el periodo 2035-2065 como una aproximación razonable a los potenciales cambios futuros.

4.1.4. Comparación de intensidades de lluvia basadas en la hidrología histórica y en la hidrología con cambio climático

En la Tabla 4.1 se muestra una comparación de las curvas IDF asociadas al periodo histórico (1979-2020) y aquellas estimadas con la proyección futura de cambio climático (2035-2065).

Los resultados se resumen para los periodos de retorno $T=25$, $T=50$ y $T=100$ años, donde se observa que la intensidad aumentaría en promedio entre 50% y 75%, con los mayores cambios esperados asociados a las duraciones mayores de tormenta. Por su parte, la Figura 4.1 muestra una comparación gráfica entre las curvas determinadas para ambos periodos en análisis.

4.1.5. Caudales de crecida

En base a las curvas IDF adoptadas, mediante el método racional se realizó la estimación de los caudales máximos instantáneos de las quebradas que drenan sus aguas hacia el plano urbano de la ciudad.

Para determinar la intensidad de precipitación para cada cuenca, se utilizó la expresión de Bell atendido que los tiempos de concentración de la mayoría de las quebradas son inferiores a una hora.

El cálculo de los caudales máximos instantáneos de las quebradas del área de interés, se realizó para el escenario de hidrología del periodo histórico (1979-2020) como también para el escenario de hidrología con proyección con cambio climático (2035-2065), utilizando los coeficientes de escorrentía actualizados en el presente estudio.

Los resultados del cálculo se resumen en la Tabla 4.2. Estos caudales permiten concluir que los cambios proyectados al periodo 2035-2065 con cambio climático, son del orden de un 50% superior respecto al periodo histórico, aunque para periodos de retorno más altos este incremento es menor en comparación con periodos de retorno más bajos. En consecuencia, se espera que las lluvias más recurrentes tendrán una mayor magnitud en el futuro y por lo tanto, las crecidas generadas por estas lluvias, aumentarán su magnitud en la misma medida.

Tabla 4.1 Curvas IDF periodo histórico (1979-2020) y proyección cambio climático (2035-2065)

D (hrs)	Basadas en periodo histórico 1979-2020			Basadas en proyección 2035-2065		
	T=25 años	T=50 años	T=100 años	T=25 años	T=50 años	T=100 años
1	6,02	8,30	11,09	9,49	12,75	16,19
2	4,98	6,85	9,26	7,56	10,13	13,10
3	4,33	5,93	8,06	6,49	8,69	11,39
4	3,86	5,28	7,19	5,78	7,72	10,23
5	3,50	4,78	6,52	5,26	7,02	9,38
6	3,22	4,38	5,98	4,86	6,47	8,72
7	2,99	4,06	5,54	4,54	6,04	8,19
8	2,79	3,79	5,16	4,27	5,67	7,74
9	2,62	3,56	4,85	4,04	5,36	7,37
10	2,48	3,36	4,57	3,84	5,10	7,04
11	2,35	3,19	4,33	3,67	4,87	6,75
12	2,24	3,04	4,12	3,52	4,66	6,50
13	2,14	2,90	3,93	3,39	4,48	6,27
14	2,05	2,78	3,76	3,27	4,32	6,07
15	1,97	2,66	3,60	3,16	4,17	5,88
16	1,90	2,56	3,46	3,06	4,04	5,71

D (hrs)	Basadas en periodo histórico 1979-2020			Basadas en proyección 2035-2065		
	T=25 años	T=50 años	T=100 años	T=25 años	T=50 años	T=100 años
17	1,83	2,47	3,33	2,97	3,92	5,56
18	1,77	2,39	3,21	2,88	3,80	5,41
19	1,71	2,31	3,10	2,81	3,70	5,28
20	1,66	2,23	3,00	2,73	3,60	5,16
21	1,61	2,17	2,91	2,67	3,51	5,04
22	1,56	2,10	2,82	2,60	3,43	4,93
23	1,52	2,05	2,74	2,55	3,35	4,83
24	1,48	1,99	2,67	2,49	3,27	4,74

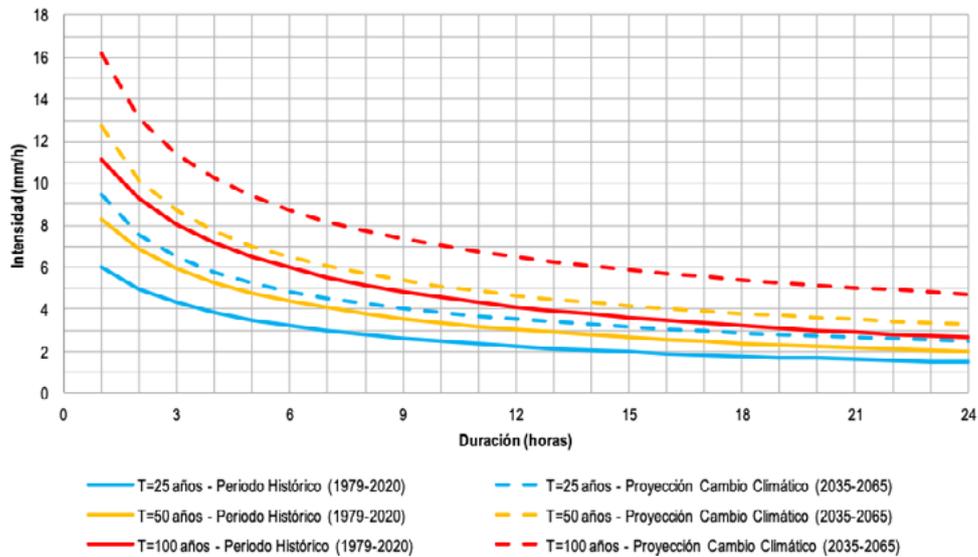
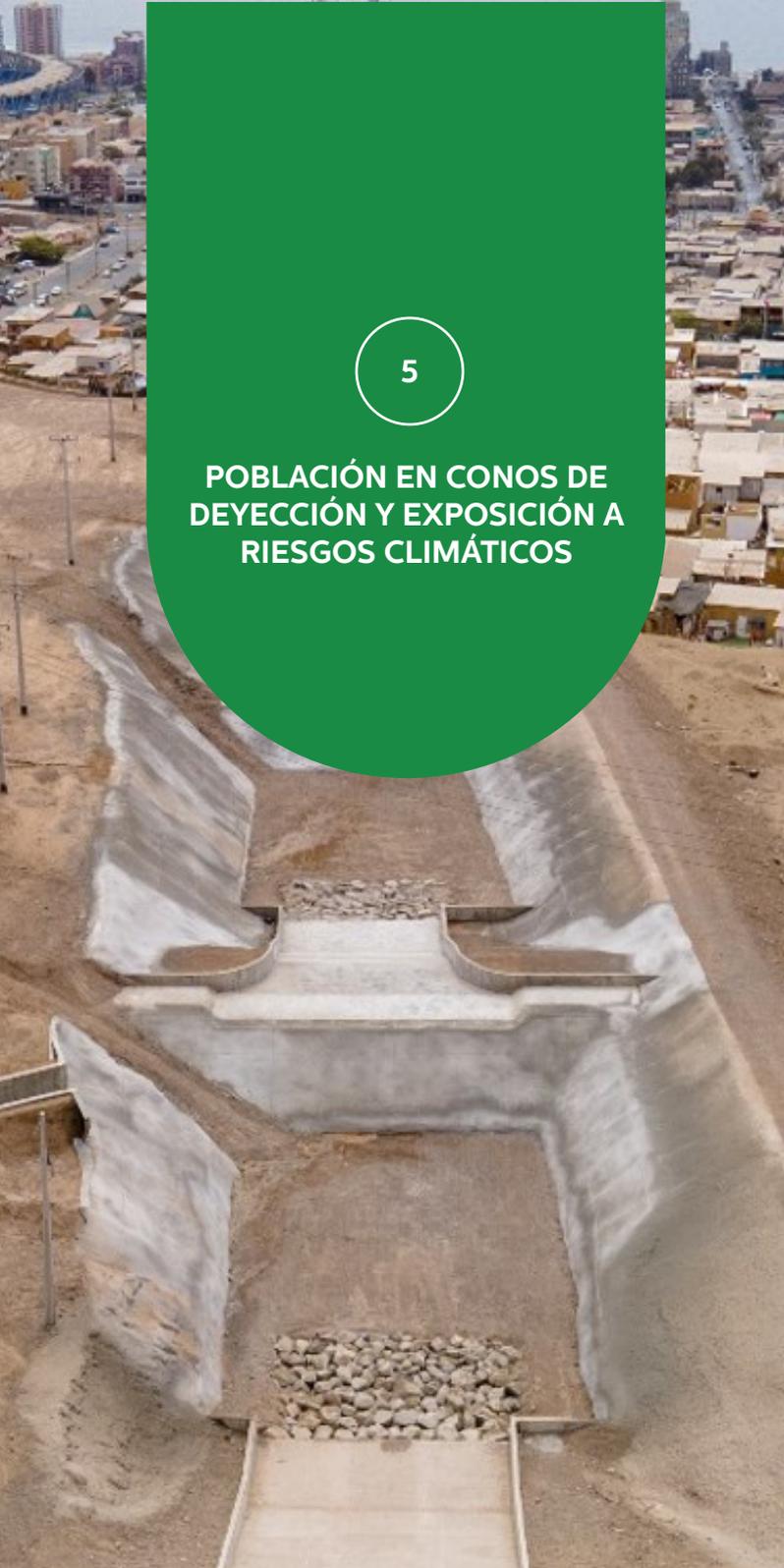


Figura 4.1 Curvas IDF periodo histórico (1979-2020) y proyección cambio climático (2035-65)

Tabla 4.2 Caudales líquidos máximos instantáneos sin y con efecto del cambio climático

Quebrada	Basados en periodo Histórico (1979-2020)			Basados en proyección con cambio climático (2035-2065)		
	T=25 años	T=50 años	T=100 años	T=25 años	T=50 años	T=100 años
NO	10,6	14,6	19,6	16,7	22,4	28,4
N1	14,7	20,3	27,1	23,1	31,1	39,5
N2	3,4	4,7	6,2	5,3	7,2	9,1
Varas Norte	4,7	6,5	8,7	7,4	10,0	12,7
Varas Sur	1,4	1,9	2,5	2,2	2,9	3,7
La Chimba	16,5	22,9	30,6	26,5	35,7	45,5
La Roca	3,7	5,1	6,8	5,8	7,8	9,9
Club Hípico	5,2	7,2	9,7	8,3	11,1	14,1
Bonilla Norte	4,7	6,5	8,7	7,5	10,0	12,7
Bonilla Sur	7,2	9,9	13,3	11,4	15,3	19,4
Farellones	6,1	8,5	11,4	9,7	13,0	16,6
La Cadena	14,9	20,7	27,6	23,6	31,8	40,3
El Ancla	1,6	2,2	3,0	2,6	3,4	4,4
Riquelme	0,6	0,8	1,0	0,8	1,2	1,5
Baquedano	2,4	3,4	4,5	3,8	5,1	6,6
Uribe	2,4	3,4	4,5	3,9	5,1	6,5

Quebrada	Basados en periodo Histórico (1979-2020)			Basados en proyección con cambio climático (2035-2065)		
	T=25 años	T=50 años	T=100 años	T=25 años	T=50 años	T=100 años
El Toro	6,3	8,7	11,7	10,0	13,4	6,5
Caliche Norte	3,2	4,4	5,9	5,0	6,8	8,6
Caliche Sur	2,3	3,1	4,2	3,5	4,8	6,1
Jardín del sur	9,4	13,0	17,4	14,9	19,9	25,4
Huáscar	4,0	5,5	7,3	6,2	8,4	10,7
Roca Roja	18,5	25,5	34,1	40,6	54,3	71,0
U. de Antofagasta	1,9	2,6	3,5	3,0	4,0	5,1
S1	0,4	0,6	0,8	0,7	0,9	1,2
S2	0,5	0,7	0,9	0,8	1,0	1,3
S3	1,5	2,1	2,8	2,4	3,2	4,1



5

POBLACIÓN EN CONOS DE DEYECCIÓN Y EXPOSICIÓN A RIESGOS CLIMÁTICOS

Se analizó a la población de campamentos establecida en sectores expuestos a flujos de aguas lluvias y eventos tipo remoción en masa, asociados a eventos hidrometeorológicos extremos, que pueden implicar una condición general de riesgo para asentamientos humanos.

En base a los antecedentes recopilados en el estudio, complementados con la información recabada durante las visitas a terreno, fue posible constatar la condición actual de los campamentos y otros asentamientos humanos dentro de la ciudad de Antofagasta, dentro de los que se incluyen algunas viviendas irregulares instaladas en las cercanías e incluso en el interior de las obras de control aluvional, o al borde o directamente sobre los cauces de las quebradas.

Como parte del análisis de las distintas situaciones que se dan en la ciudad, desde el punto de vista de las viviendas y sus moradores expuestos a riesgos de naturaleza hidrometeorológica extrema, se clasificaron los campamentos de acuerdo a su grado de exposición al riesgo según niveles que van desde un grado de exposición “Muy bajo o nulo (MB-N)” hasta alcanzar un grado “Medio a alto (M-A)”, pasando por una categoría intermedia “Bajo (B)”.

La clasificación mencionada se basa en gran medida en una extrapolación de sucesos históricos más o menos recientes.

Los resultados de la aplicación de la clasificación propuesta al diagnóstico de la exposición al riesgo climático extremo de los campamentos presentes en el área de estudio, se resumen en la Tabla 5.1.

De acuerdo con esta información, se concluye que un 67% de los campamentos analizados tiene un grado exposición al riesgo “Muy bajo o nulo”, seguido por un 27% que tiene un grado de exposición “Bajo” y solo un

5% de la población analizada se categoriza dentro del nivel “Medio a Alto”. En esta última categoría destacan campamentos ubicados directamente bajo descargas de quebradas.

Tabla 5.1 Grado de exposición al riesgo climático extremo de los campamentos

Sector	Campamento	Grado de riesgo	Sector	Campamento	Grado de riesgo
Sector Norte - La Chimba	Sol Naciente	MB-N	Sector quebrada Salar del Carmen	Camino al Futuro	B
	Luz Divina VI	B		Vista Hermosa	B
	La Lucha es Posible	MB-N		Todos Luchando por un Sueño	MB-N
	La Quebrada	MB-N		18 de Septiembre	MB-N
Rayito Esperanza	MB-N	18 de Septiembre II		MB-N	
Sector centro norte (Bonilla)	Nuevo Amanecer Latino	MB-N	Sector quebrada la Cadena y el Ancla	Niños Felices	B
	Rayito de Sol	MB-N		Arca de la Alianza	B
	Jardín del Norte	MB-N		Betzabet	B
	El Bosque	MB-N		Israel	B
	Villa El Sol	MB-N		Moisés	B
	Eulogio Gordo	MB-N		Viviendas en Obras de Control aluvional	M-A
	Mujeres Unidas	MB-N		René Schneider	MB-N
Sector Baquedano	Mujeres Unidas II	MB-N	Sector René Schneider	Aurora Esperanza	M-A
	Villa Esperanza	MB-N		Quebrada Riquelme	B

Sector	Campamento	Grado de riesgo	Sector	Campamento	Grado de riesgo	
Sector Baquedano	Futuro Antofagasta	MB-N	Sector René Schneider	Campamento Nuevo	MB-N	
	Mujeres Emprendedoras	MB-N	Sector quebrada Baquedano	Chilenos por un Sueño	MB-N	
	Pantaleón Cortés	MB-N		Altos de Sucre	MB-N	
	Ecuachilepe	MB-N		Alto Mendoza	B	
	Sector Baquedano	Un Techo para mi Gente Latina	MB-N	Sector quebrada Uribe - el Toro	Mirador la Portada	B
		América Unida	MB-N		Fénix	MB-N
		Irarrázaval Etapa I	MB-N		Villa Constancia II	B
Génesis		MB-N	Villa Constancia		MB-N	
Génesis II		B	Franja Esperanza		MB-N	
Sol y Luna		MB-N	Sector 1		MB-N	
Alto las Cruces		MB-N	Los 33		MB-N	
Sector Baquedano	La Escuelita	B	20 de Julio	MB-N		
	Campamento Nuevo	B				
	Arian Coni	MB-N				
	Juanita Cruchaga	M-A				



6

PATRÓN DE DRENAJE

El patrón de drenaje se define por la forma como las aguas lluvias que se generan en el área de estudio escurren en general por sus calles, colectores, canales, quebradas, esteros, ríos, etc. para descargar en su respectivo cuerpo receptor.

En particular en el área de estudio, el patrón de drenaje se vincula directamente a los sistemas fluviales que forman las quebradas y conos de deyección, cuya escorrentía (generada en sus respectivas cuencas aportantes) descarga directamente en el área urbana de la ciudad y eventualmente alcanza el borde costero, para descargar finalmente en el mar.

Con el fin de caracterizar el patrón de drenaje del área de estudio, se recurrió a diferentes fuentes de información, entre las cuales se incluyó el Plan Maestro de Aguas Lluvias del año 2004 (PM-26), información satelital actualizada (Google Earth) y los antecedentes obtenidos de terreno, principalmente del levantamiento aerofotogramétrico de Antofagasta ejecutado en el presente estudio.

A partir del análisis de la información consultada, se identificaron y delimitaron los distintos sistemas que conforman el patrón de drenaje asociado directamente a las 27 quebradas que atraviesan la ciudad, y en base a dicho patrón, se construyeron los modelos hidráulicos para desarrollar el diagnóstico de la situación actual del drenaje urbano de Antofagasta.

El patrón de drenaje fue plasmado en 9 láminas escala 1: 5000 para los sectores urbanos y en 3 láminas escala 1:20.000 para las cuencas no urbanas, de las cuales un extracto de la representación del patrón de drenaje de algunas cuencas urbanas, se muestra a modo de ejemplo en la Figura 6.1.

PATRON DE DRENAJE DE LA ZONA URBANA
ESCALA 1:5000

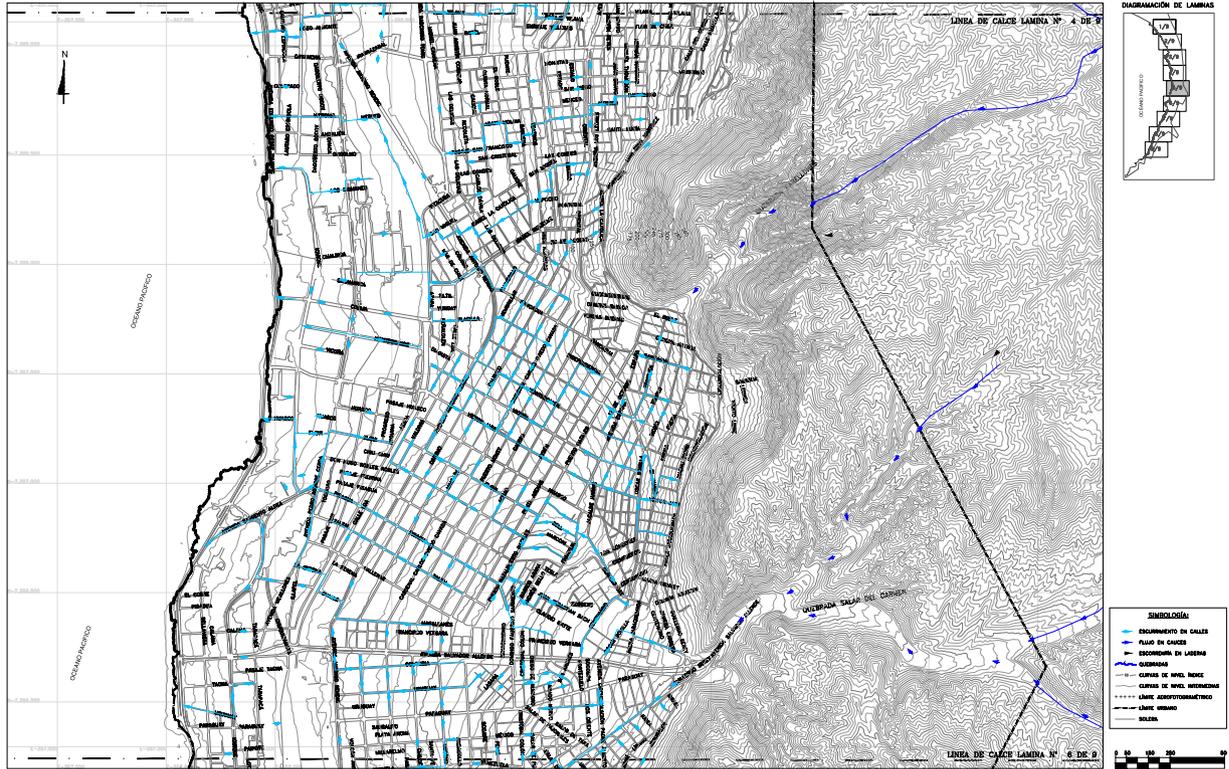


Figura 6.1 Ejemplo del patrón de drenaje de algunas cuencas urbanas

DIAGNÓSTICO DE LA SITUACIÓN ACTUAL DE INUNDACIONES

El diagnóstico de la situación actual de inundaciones de la ciudad de Antofagasta, se realizó en base a modelos numéricos desarrollados en HEC-RAS – 2D que permiten caracterizar bidimensionalmente el comportamiento del flujo del actual sistema de drenaje de la ciudad, descrito en el capítulo precedente.

En la elaboración de dichos modelos se utilizaron Modelos Digitales de Terreno (MDT) desarrollados a partir de la información del levantamiento aerofotogramétrico, y en el caso de las 5 quebradas estudiadas aparte para incluir los ejes hidráulicos de sus tramos terminales, antes de la descarga al plano urbano, se utilizaron además los datos de los levantamientos de perfiles topográficos de sus cauces. Por su parte, para la caracterización de los sistemas colectores presentes en el área de estudio, se aplicó el modelo EPA SWMM para el Colector Salar de Carmen.

El diagnóstico se realizó considerando dos escenarios: el primero, suponiendo válida la hidrología basada en los registros históricos del periodo 1979 a 2020 y el segundo, proyectando la hidrología con los modelos de cambio climático para el periodo 2035 a 2065.

7.1. DIAGNÓSTICO DE LA SITUACIÓN ACTUAL SIN CAMBIO CLIMÁTICO

El diagnóstico de la situación actual de la ciudad de Antofagasta sin la inclusión de la variable de cambio climático, se realizó para crecidas de periodos de retorno de $T=25$, $T=50$ y $T=100$ años, determinadas en base al periodo histórico 1979 a 2020, considerando un flujo detrítico con concentración volumétrica de sólidos 30%, para quebradas sin obras de control aluvional y para aquellas otras con obras aluvionales, con un flujo detrítico diluido con 15% de concentración.

Como parte del diagnóstico realizado se determinaron las áreas de inundación, mapas de velocidad y de profundidades, y las vías preferenciales de escurrimiento en la zona urbana, identificando además sectores críticos con mayores profundidades de inundación.

En la Figura 7.1 se muestran, a modo de ejemplo, los resultados obtenidos para el área de inundación en la quebrada El Toro, donde la superficie anegada es de aproximadamente 5,7 ha para la crecida de T=25 años, mientras que para la crecida de T=100 años dicha área

aumenta a 6,7 ha. Se observa que los cambios en la superficie anegada se dan principalmente en el sector de la costanera, junto a la descarga sobre el mar.

Por su parte, en la Figura 7.2 se muestran como segundo ejemplo, los resultados obtenidos para el área de inundación de las quebradas Riquelme, Baquedano y Uribe, donde el escurrimiento proveniente de los diferentes cauces confluye anegando una superficie que alcanza a 30 ha para el periodo de retorno T=25 años y 39 ha para el periodo de retorno T=100 años.



Figura 7.1 Áreas de inundación de la quebrada El Toro, para T=25 y T=100 años

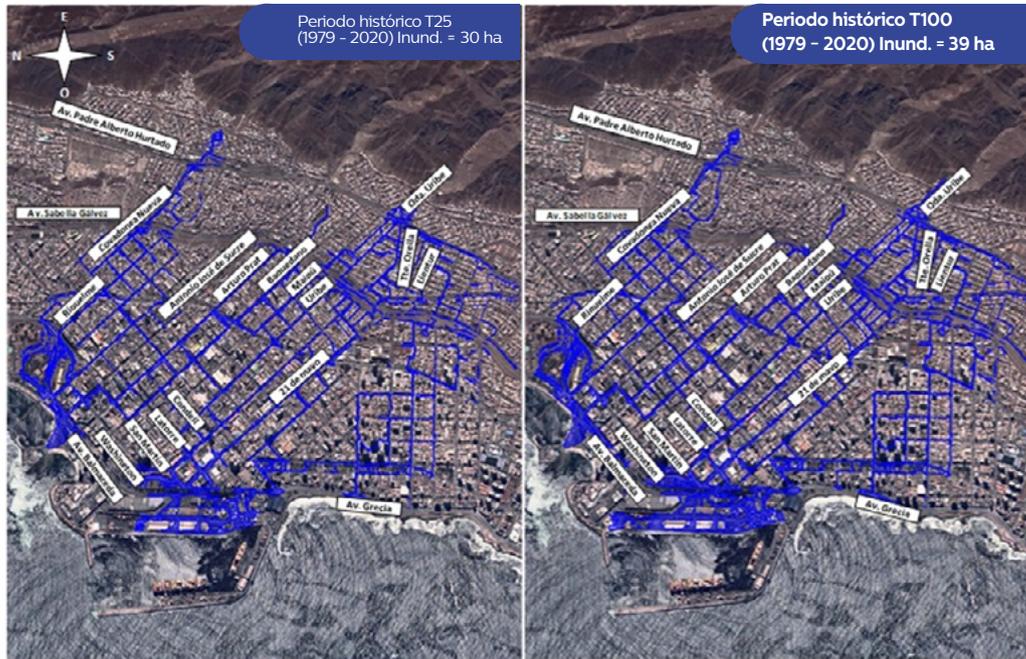


Figura 7.2 Áreas de inundación quebradas Riquelme, Baquedano y Uribe. T=25 y T=100 años

Aquí se detecta también que los cambios en las superficies anegadas ocurren principalmente en el sector de la costanera y que los puntos bajos se concentran principalmente en calles que son perpendiculares al sentido del flujo y son generados por la presencia de elementos que impiden el libre escurrimiento, como también por disminuciones en las pendientes a lo largo del eje de escurrimiento.

En cuanto a las calles por donde fluyen las crecidas, en la Tabla 7.1 se identifican las principales vías involucradas para el escurrimiento de cada una de las quebradas.

Los resultados obtenidos fueron sintetizados en 10 láminas escala 1:5.000, plasmándose en ellas los

periodos de retorno de T=25 y T=100 años, dada la mínima diferencia de los resultados asociados al periodo de retorno T=50 años que también se incluyó dentro de las simulaciones efectuadas.

Con el fin de completar el diagnóstico del sistema de drenaje de la situación sin cambio climático, se propusieron soluciones de bajo costo para mitigar las inundaciones en puntos críticos, ya sea evitando el escurrimiento hacia puntos bajos mediante soluciones de mejoramiento local, como la construcción de lomos de toro y muretes, o bien, modificando las calzadas y soleras para permitir la descarga libre de los flujos, sobre todo en el sector costero de la ciudad.

Tabla 7.1 Vías de escurrimiento identificadas para cada quebrada

Quebrada	Vías de Escurrimiento
N0	La quebrada escurre por sobre su cono de deyección, pasando por un recinto militar y atravesando la Ruta 1, aguas abajo escurre por el camino "Cruce Ruta 1 – La Portada hasta su descarga en el mar
N1	Las vías principales de drenaje aguas abajo de la descarga de la quebrada sobre el plano urbano se dan sobre el camino que conecta la Ruta 1 con la descarga de la quebrada N1 y el brazo generado al sur de la avícola que genera la bifurcación del escurrimiento. Aguas abajo el agua atraviesa los lotes de viveros e invernaderos, para luego atravesar la Ruta 1
N2	El escurrimiento atraviesa los recintos ubicados al sur del sector Altos La Portada, atravesando la Ruta 1 y aguas abajo descarga sobre el mar
Varas Norte	La crecida escurre por su cono de deyección hasta alcanzar y atravesar la Ruta 1, observándose aguas abajo de esta vía que el flujo se apoza en las cercanías del condominio Amazonas
Varas Sur	Las vías principales de escurrimiento para esta quebrada consideran su cono de deyección hasta que alcanza la zona urbana junto a la calle N°9, apozándose aguas abajo sobre la Ruta 1
La Chimba	El escurrimiento generado por esta quebrada se bifurca en dos brazos, escurriendo el brazo norte a través de las calles Quebrada La Chimba y los Topacios para posteriormente descargar en el mar. Por su parte, el brazo sur tiene como vías de escurrimiento principal pasa por las calles Abichita, Limonita, Caparrosa, y Santiago Humberstone
La Roca	El escurrimiento generado en la quebrada sigue en dirección este-oeste las calles Pablo Neruda, Caparrosa, Santiago Humberstone, Abichita y Sendero del Sol. También destacan algunas vías perpendiculares que conducen escurrimientos de importancia como lo son la calle Uno Oriente, Héroes de la Concepción y las Avenidas Pedro Aguirre Cerda y Edmundo Pérez Zujovic
Club Hípico	Las principales vías de escurrimiento para esta quebrada están dadas por Mamalluca, Los Chungungos, Vladimir Saavedra, Pérez Canto y Víctor Farías
Bonilla	La crecida generada por esta quebrada se bifurca en 2 partes antes de descargar sobre el plano urbano de la ciudad, donde el brazo norte escurre principalmente por las calles Juan Bolívar y Víctor Farías, mientras que el brazo sur escurre principalmente por la calle Nicolás Tirado

Quebrada

Vías de Escurrimiento

Farellones	El flujo que escurre en esta zona es más difuso que el generado por el resto de las quebradas, sin embargo, se observa una concentración por las calles Rancagua, Isabel Riquelme y Cobija en el sector Norte, mientras que en el sector sur el escurrimiento se concentra en las calles Huasco y Víctor Jara
La Cadena y Salar del Carmen	El escurrimiento proveniente de la quebrada Salar del Carmen se concentra sobre la Avenida Salvador Allende, dado que sobre dicha vía existen colectores primarios construidos para la evacuación de las aguas lluvias. Por su parte, para la quebrada La Cadena el flujo se concentra principalmente en las calles Quito, Salar de Pajonales, y Domingo Fausto Sarmiento hasta alcanzar la avenida Salvador Allende
El Ancla	El escurrimiento generado por esta quebrada se concentra en las calles Buenos Aires, Matta, Huanchaca, Antonio Rendic, Montevideo, Tarapacá y Lima, Avenida Iquique y Nuevo Extremo
Schneider	Las vías principales de escurrimiento corresponden a las calles Dos Norte, Guayaquil y Panamá
Riquelme	El escurrimiento fluye por las calles Covadonga Nueva y Riquelme, para luego confluir con el flujo proveniente de la quebrada Baquedano
Baquedano	Las principales vías de escurrimiento corresponden a las calles Baquedano, José Antonio Sucre, Maipú, Arturo Prat y Condell
Uribe	Las calles Quebrada Uribe, Uribe, Teniente Orella, Lientur, Condell, Latorre y San Martín corresponden a las vías principales de escurrimiento para esta quebrada
El Toro	Las principales vías de escurrimiento para esta quebrada corresponden a las calles Manuel Bulnes, Chillán, Talca, General Borgoño, Angamos y Los Inmigrantes
Caliche	El escurrimiento generado en la quebrada fluye principalmente por las calles Los Changos, Radoslav Razmilic, Homero Ávila, Rebeca Matte y Augusto D'Halmar
Universidad de Antofagasta	Las principales vías de escurrimiento para esta quebrada consideran las calles Llullaillaco, Escondida, Bahamonde Silva, Claudio Arrau y Avenida Universidad de Chile
Jardín del Sur	El pasaje sin nombre y las calles Valle Apacible, Valle del Viento y Samsó Sivori conforman las principales vías de drenaje de la quebrada Jardín del Sur
Huáscar	La principal vía de escurrimiento corresponde a la Calle Baja
S1	Para esta quebrada las calles Carlos Araneda y Calle Baja corresponden a las principales vías de escurrimiento
S2 y S3	Las principales vías de escurrimiento para la quebrada S2 corresponden a las calles Baltazar Leighton y Carlos Araneda, mientras que por su parte para la quebrada S3 se tiene a la Calle Baja

7.2. DIAGNÓSTICO DE LA SITUACIÓN ACTUAL CON CAMBIO CLIMÁTICO

A fin de cuantificar los efectos de la variable de cambio climático, se desarrolló un diagnóstico de la situación actual en todas las quebradas, con los caudales proyectados al periodo 2035-2065, considerando los mismos periodos de retorno que para los caudales sin cambio climático, vale decir, T=25, T=50 y T= 100 años. El análisis realizado consideró también la determinación de las superficies inundadas y las profundidades asociadas a éstas, a fin de visualizar los cambios asociados a los mayores caudales detríticos originados por el cambio climático.

En la Figura 7.3 se muestran, también a vía de ejemplo, los resultados de área de inundación causada por la descarga crecidas de periodo de retorno T=25 y T=100 años de la quebrada El Toro.

Para el periodo de retorno T=25 años se espera un área de inundación de 6,7 ha, lo cual significa que, por efecto del cambio climático, se produce un aumento del 18% en la superficie inundada. A su vez, el periodo de retorno de T=100 años presenta un área de inundación de 8,7 ha, que equivale a un aumento del 30% respecto a la inundación causada por crecidas basadas en datos del periodo histórico.

Por otro lado, se observa que el cambio climático no altera las principales vías de escurrimiento que fueron identificadas para crecidas determinadas en base a la hidrología del periodo histórico.

En la Figura 7.4 se muestran gráficamente los resultados del área de inundación causada por

descargas de las quebradas Riquelme, Baquedano y Uribe para los caudales asociados a la proyección con cambio climático, para periodos de retorno de T=25 y T=100 años.

Para el periodo de retorno T=25 años estos resultados revelan que la extensión del área de inundación es de 39 ha, equivalente a un aumento del 30% con respecto a la superficie inundada por caudales sin efecto del cambio climático. Por su parte, para el periodo de retorno de T=100 años el área inundada resulta de 50 ha, lo cual representa un aumento del 28% por efecto de los caudales con cambio climático.

En general, el aumento de los caudales detríticos por efecto del cambio climático, es del orden de un 65% con respecto a los mismos caudales sin este efecto, sin embargo, el aumento de las áreas anegadas, como se ha explicado en los ejemplos anteriores, es significativamente menor.

En efecto, para el periodo de retorno T=25 años se esperan cambios entre 8% y 50% en la superficie inundada con cambio climático en relación a sin este efecto, mientras que para T=100 años se esperan cambios entre 5% y 35%. En cuanto a las vías de escurrimiento principal, tampoco se observan cambios significativos al analizar el aumento en los caudales por efecto del cambio climático para un mismo periodo de retorno.

El relativo menor impacto que tiene en muchos casos el importante incremento en los caudales sobre el aumento de las superficies inundadas, se explica básicamente por las condiciones topográficas de la ciudad de Antofagasta, y en gran medida también, por

la disposición de su trama urbana, ya que el terreno y las calles presentan pronunciadas pendientes en el sentido este a oeste coincidiendo con la dirección principal del escurrimiento, si bien dichas pendientes van reduciéndose paulatinamente a medida que se avanza desde el piedemonte de la ciudad hasta la

costa. Las características mencionadas dificultan el flujo de aguas lluvia en la dirección perpendicular de las vías preferenciales de escurrimiento (sentido sur a norte o viceversa), salvo cuando existen condiciones de pendientes y/o cambios locales de rugosidad que así lo permiten.



Figura 7.3 Resultados para la quebrada el Toro con proyección de cambio climático

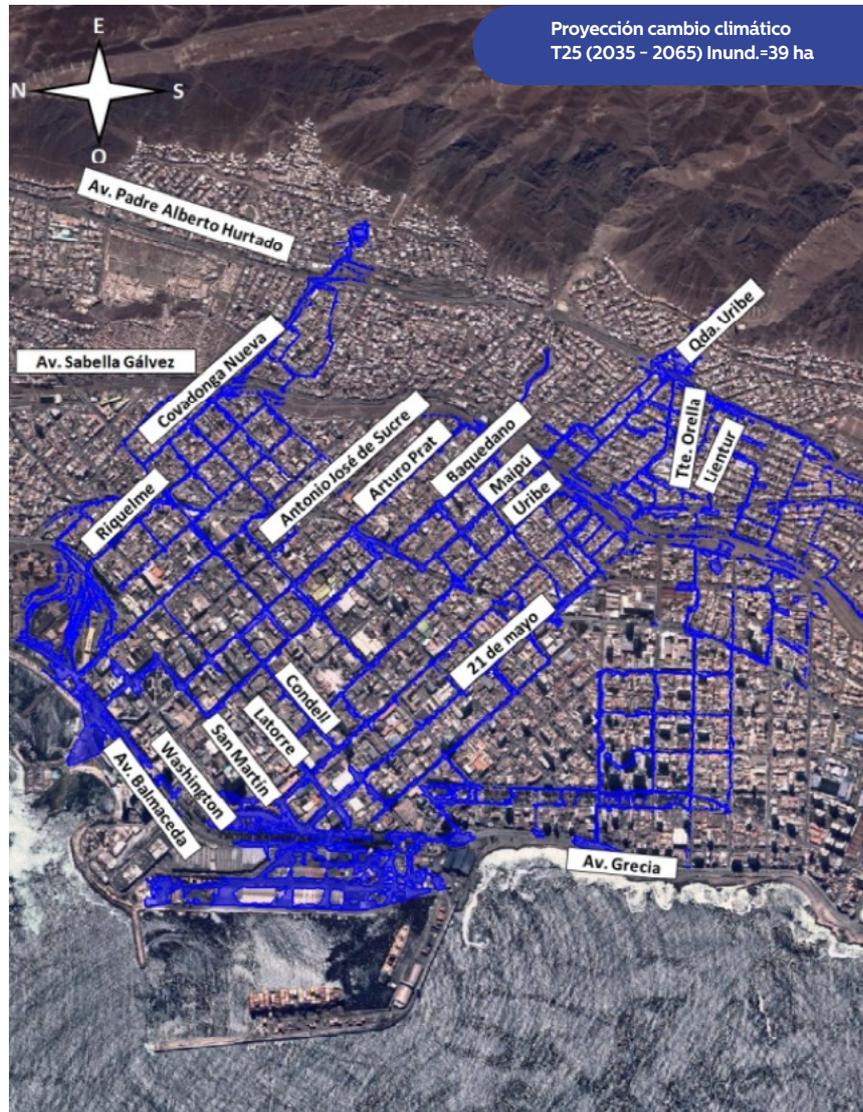


Figura 7.4 Inundaciones de quebradas Riquelme, Baquedano y Uribe con cambio climático

a Crecida de periodo de retorno T= 25 años



Figura 7.5 Inundaciones de quebradas Riquelme, Baquedano y Uribe con cambio climático

b Crecida de periodo de retorno T=100 años

7.3. DIAGNÓSTICO DE INUNDACIONES EN SITUACIÓN ACTUAL EN 5 QUEBRADAS

De manera análoga al diagnóstico descrito en los acápite anteriores, se realizó el diagnóstico de la situación actual para las 5 quebradas seleccionadas por la DOH, a saber, N1, La Roca, Schneider, S2 y S3. En la actualidad, estas quebradas analizadas no presentan obras de control aluvional en su descarga sobre el plano urbano, como tampoco estudios de la DOH para encauzar y controlar los flujos detríticos generados por estas cuencas.

Los resultados obtenidos y análisis llevados a cabo para crecidas detríticas de periodo de retorno $T=25$, $T=50$ y $T=100$ años, en cada una de estas quebradas y zonas urbanas dentro de su respectiva área de influencia, permitieron identificar las vías preferenciales de escurrimiento y delimitar las áreas de inundación, como también las profundidades y velocidades del flujo.

En la Figura 7.5 se muestran a modo de ejemplo los resultados del área de inundación determinada para la quebrada La Roca en la situación actual de drenaje

para los periodos de retorno de $T=25$, $T=50$ y $T=100$ años. Esta información se presentó en 4 láminas escala 1:5.000.

Para estos periodos de retorno, las crecidas anegan superficies de 18, 20 y 22 ha, respectivamente. Se observa además que las principales vías de escurrimiento corresponden a las calles Pablo Neruda, Caparrosa, Santiago Humberstone, Abichita y Sendero del Sol.

Un acercamiento a la zona donde se realizó el levantamiento topográfico sobre la quebrada la Roca se muestra en la Figura 7.6, donde puede observarse que el escurrimiento es evacuado en su totalidad por la calle Pablo Neruda para los periodos de retorno $T=25$ y $T=50$ años, mientras que para $T=100$ años se observa que una pequeña fracción de la inundación alcanza el brazo de desvío.

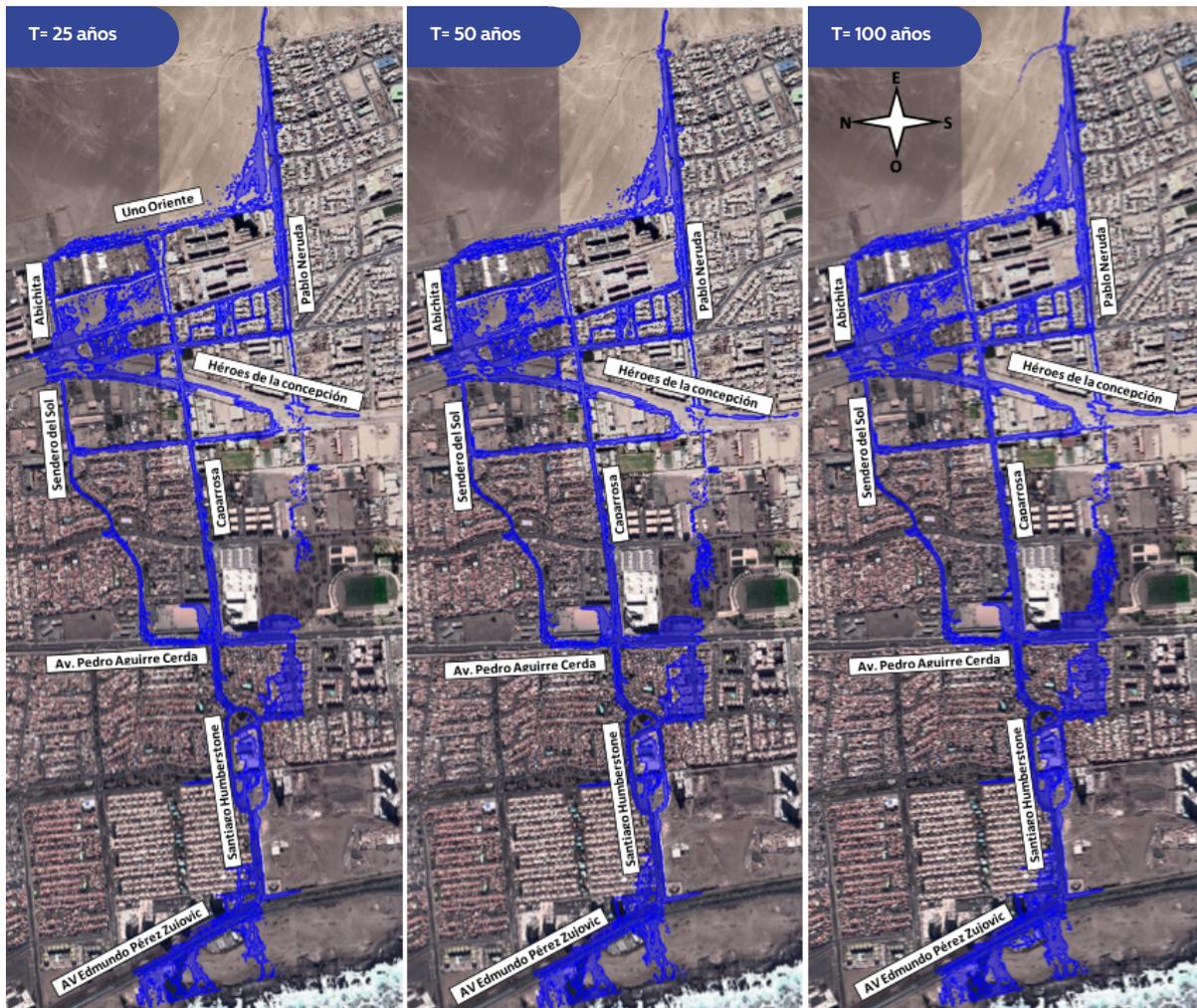


Figura 7.6 Áreas de inundación en Quebrada La Roca

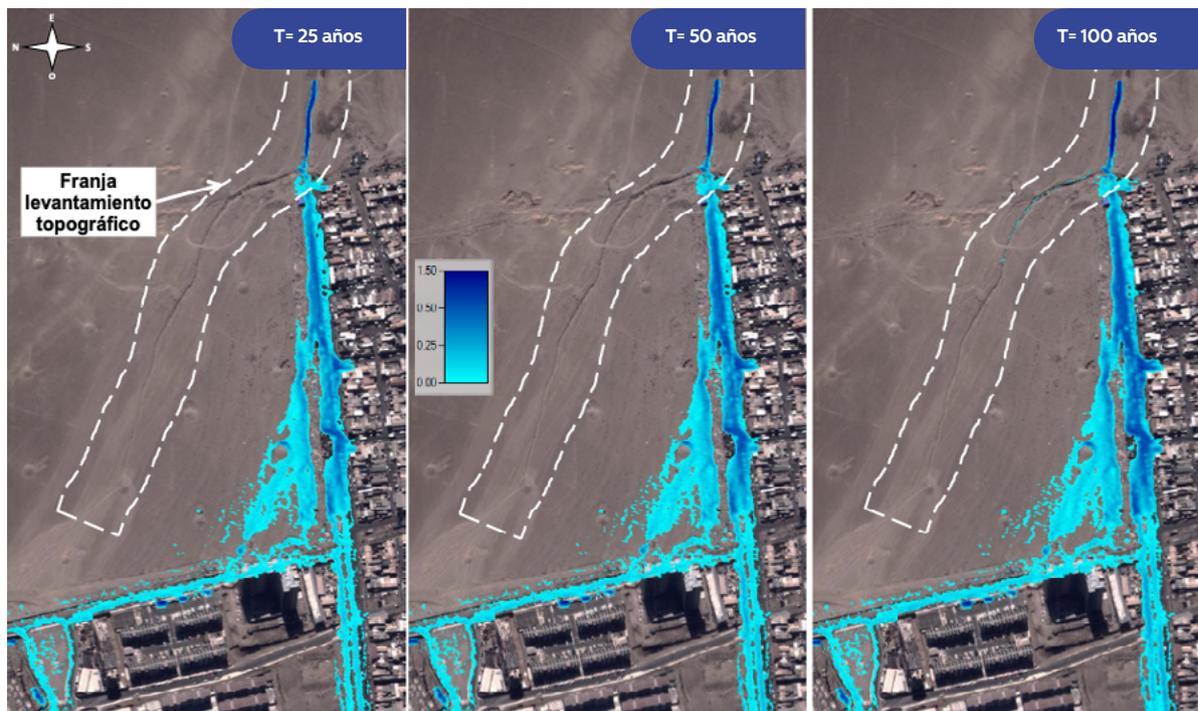


Figura 7.7 Áreas de inundación en Quebrada La Roca en sector de levantamiento topográfico

CATASTROS PARA ETAPAS FUTURAS DE ACTUALIZACIÓN DEL PLAN MAESTRO

Basado en los diagnósticos de las inundaciones de la ciudad de Antofagasta, precedentemente descritos, se realizó una proposición de catastro y levantamientos topográficos para las etapas futuras del Proyecto de Actualización del Plan Maestro.

El objetivo de estas actividades futuras es que, antes que se desarrolle del Plan Maestro de Drenaje y Evacuación de Aguas Lluvias de la ciudad de Antofagasta, se pueda evaluar la vigencia de la información existente, y si es necesario, actualizarla o complementarla mediante levantamientos topográficos de calles o zonas específicas.

Se identificaron los sectores donde se propone catastrar y realizar levantamientos topográficos en calles y sectores de descarga de quebradas a las calles, fundamentados en los diagnósticos realizados, complementados con los antecedentes de terreno recabados en el estudio.

En cuanto a los levantamientos, se propone realizar el levantamiento de las obras de control aluvional existentes y ejecutar la toma de perfiles transversales de calles para caracterizar el escurrimiento en las vías principales de evacuación de aguas lluvias.

Dentro de los trabajos propuestos, cabe destacar el levantamiento de los colectores existentes detectados durante las visitas a terreno, a saber: Colector Salar del Carmen y Colector La Negra, a fin de contrastar estos antecedentes con la información de los planos disponibles, evaluar el estado de conservación de las obras de captación, conducción y descarga y verificar las condiciones de limpieza de las obras.

Respecto de los catastros en quebradas que cuentan con obras de control aluvional construidas, se propone realizarlos principalmente en sectores donde se ubican las descargas como también, inspeccionar su estado de conservación y limpieza e identificar obras existentes que podrían interferir con el trazado de los colectores desde su origen hasta su descarga.

Para las quebradas sin obras de control aluvional construidas, se propone realizar catastros similares pero especialmente donde se proyectarían obras de descarga que se conectarían a colectores de la red primaria de aguas lluvias.

Los resultados del diagnóstico de inundaciones de la ciudad de Antofagasta y proposición de catastro fueron plasmados en 9 láminas escala 1:5.000.

9.1. SÍNTESIS

Los principales aspectos abordados en el estudio de “Actualización del Plan Maestro de Aguas Lluvias de Drenaje y Evacuación de Aguas Lluvias de Antofagasta”, pueden sintetizarse como sigue:

- Se actualizó la información cartográfica de Plan Maestro a través del levantamiento aerofotogramétrico del área definida para la ciudad, el que fue debidamente apoyado con topografía terrestre mediante la monumentación de poligonales primarias y secundarias a fin de garantizar la precisión requerida según el alcance definido para el proyecto y la generación de entregables para su utilización en este estudio y en etapas futuras de la actualización.
- Se realizaron los estudios básicos relacionados con la hidrología del área de interés, definiendo las estadísticas de precipitaciones extremas tanto para el periodo histórico 1979-2020, como para el periodo proyectado 2035-2065 con la inclusión de la variable de cambio climático en escenario RCP8.5, a fin de adaptar los futuros diseños de la red primaria ante los efectos provocados por el cambio climático.
- Se analizaron los campamentos establecidos en sectores expuestos a flujos de aguas lluvias y eventos tipo remoción en masa a raíz de eventos hidrometeorológicos extremos, clasificando a esta población en función del nivel de exposición al riesgo asociado a este tipo de eventos.

- Se definió el patrón de drenaje en el área de estudio, el que se vincula directamente a los sistemas fluviales que forman las 27 quebradas cuya escorrentía generada en sus cuencas aportantes, descarga directamente en el área urbana de la ciudad y eventualmente alcanza el borde costero, para descargar finalmente en el mar.

- Se realizó el diagnóstico de la situación actual de inundaciones para las 27 quebradas identificadas en la ciudad en base a modelos numéricos desarrollados en HEC-RAS 2D, a fin de caracterizar el comportamiento del flujo del actual sistema de drenaje de la ciudad considerando los escenarios históricos y de proyección de cambio climático para los periodos de retorno de T=25, T=50 y T=100 años. Dentro de este diagnóstico se incluyeron las 5 quebradas definidas por parte de la DOH, el cual incluyó también los tramos finales de sus cauces y para los cuales se levantaron perfiles transversales.

- Además, se identificaron las vías principales de escurrimiento y se identificaron sectores con problemas de inundación, como la presencia de puntos bajos, para los cuales se propusieron medidas de bajo costo para mitigar los efectos las inundaciones.

- Finalmente, se realizó una propuesta de catastro y levantamientos topográficos para las etapas futuras de la actualización del Plan Maestro de Aguas Lluvias en base al diagnóstico de la situación actual, con el objetivo de evaluar la vigencia de la

información existente y determinar si es necesario actualizarla o complementarla.

9.2. CONCLUSIONES

Respecto a los estudios básicos relacionados con la hidrología del proyecto incluyendo la componente de cambio climático, las principales conclusiones obtenidas pueden resumirse como se indica a continuación.

- Se realizó un análisis para determinar las precipitaciones para el periodo histórico 1979-2020 y para el periodo proyectado 2035-2065 con la inclusión de la componente de cambio climático, determinando además las tormentas de diseño, concluyéndose que existe un aumento en la intensidad media de los eventos de precipitación, independientemente de su duración o periodo de retorno. Estos aumentos varían del orden de 60% en promedio, esperando los mayores cambios para los eventos de más larga duración.

- Por otra parte, se espera una disminución en la cantidad de días con lluvia para el periodo futuro, con lo cual se reafirma que los eventos extremos serán más severos a futuro, sin embargo, el número total de eventos será menor.

- A partir de los resultados obtenidos se reconoce la necesidad de incorporar la variabilidad climática futura en el diseño hidrológico, donde es clave abordar la incertidumbre a partir de enfoques

estocásticos y con la inclusión de múltiples proyecciones climáticas (modelos), lo que permitirá tener una idea de cómo serán los eventos extremos de precipitación en el futuro para el área de estudio. En cuanto al análisis de la población en conos de deyección y exposición a riesgos climáticos se concluye lo siguiente:

- Gran parte de los campamentos analizados se encuentran con grados de exposición “Muy Bajo o nulo” y “Bajo”.
- Solo un 5% de la población estudiada fue clasificada con un grado de exposición “Medio a Alto”, que corresponde campamentos ubicados directamente bajo la descarga de las quebradas.

Respecto al diagnóstico de la situación actual del drenaje y evacuación de aguas lluvias de la ciudad se concluye lo que se detalla a continuación:

- Los sectores con problemas de drenaje de aguas lluvias, particularmente los puntos bajos detectados en las distintas áreas de inundación, se concentran especialmente en calles perpendiculares al sentido principal del escurrimiento de oriente a poniente, y son generados principalmente por la presencia de elementos que impiden el libre escurrimiento y apreciables disminuciones en las pendientes a lo largo del eje de escurrimiento.
- Respecto del efecto de cambio climático sobre el drenaje de la ciudad, en general las crecidas simuladas para los periodos de retorno de T=25,

T=50 y T=100 años, generan áreas inundadas con diferencias importantes entre sí, principalmente en los sectores anegados más cerca del borde costero, pero no así cambios significativos en las vías de escurrimiento principal.

- El importante incremento en los caudales que genera el cambio climático no se ve proporcionalmente reflejado en las áreas inundadas lo que se explica básicamente por las condiciones topográficas de la ciudad de Antofagasta, donde se observan grandes pendientes en la dirección este-oeste haciendo que las calles que conectan el piedemonte con la línea de costa, constituyen vías de evacuación principales de las aguas lluvias descargadas por las quebradas y trama urbana vecina. A lo largo de ellas el flujo alcanza importantes velocidades, con menos posibilidades de dispersarse transversalmente.

9.3. RECOMENDACIONES

Para las etapas posteriores del proyecto de actualización del Plan Maestro de Aguas Lluvias de la ciudad de Antofagasta se recomienda abordar los siguientes aspectos:

- Realización de catastros para la identificación de la infraestructura existente que pueda afectar o condicionar las redes de colectores y obras anexas de aguas lluvias.
- Levantamientos topográficos de calles y sectores localizados en el entorno de las descargas de las quebradas.

- Proposición de alternativas en función del diagnóstico de la situación actual.
- Dimensionamiento y presupuesto de las alternativas propuestas.
- Revisión del periodo de retorno de diseño.
- Análisis y selección de alternativas de solución.
- Definición de las áreas a sanear prioritarias y planificadas.
- Desarrollo de las soluciones.
- Inclusión de la componente ambiental para el análisis de los impactos del Plan Maestro.
- Inclusión de la componente de Participación Ciudadana de modo de informar y dar a conocer los beneficios del proyecto a la población.

**Adapta
Clima**

Ciudades Costeras



Adapta Clima

Ciudades Costeras

Promovemos la adaptación y
resiliencia climática



AdaptaClima



@adaptaclima



@Adapta_Clima



www.adaptaclima.org



ISBN: 978-956-6057-41-3



9 789566 1057413