

ACTUALIZACIÓN PLAN MAESTRO DE EVACUACIÓN Y DRENAJE DE AGUAS LLUVIAS DE ANTOFAGASTA

INFORME FINAL

Índice de contenidos

1.	INTRODUCCIÓN	1
1.1.	ANTECEDENTES GENERALES	1
1.2.	OBJETIVOS.....	2
1.3.	ALCANCE DEL ESTUDIO.....	4
1.4.	ÁREA DE ESTUDIO.....	5
2.	RECOPIACIÓN Y ANÁLISIS DE ANTECEDENTES	5
2.1.	REVISIÓN Y ANÁLISIS CRÍTICO DEL PM-26	5
2.1.1.	Descripción general del Plan Maestro.....	5
2.1.2.	Antecedentes básicos de estudio	6
2.1.3.	Proposición y selección de alternativas	7
2.1.4.	Inversiones y priorización de las soluciones.....	9
2.1.5.	Comentarios finales y conclusiones.....	10
3.	POBLACIÓN EN CONOS DE DEYECCIÓN Y ANÁLISIS DE LA EXPOSICIÓN A RIESGOS HIDROMETEOROLÓGICOS EXTREMOS	11
3.1.	CENSO DE POBLACIÓN DE 2017 DE ANTOFAGASTA.....	12
3.2.	PROYECCIÓN DE POBLACIÓN DE LOS CAMPAMENTOS	12
3.3.	CATASTRO NACIONAL DE CAMPAMENTOS DE 2019	13
3.4.	ANÁLISIS DE EXPOSICIÓN A RIESGOS HIDROMETEOROLÓGICOS Y PROYECCIONES	15
3.4.1.	Criterios de clasificación propuestos.....	15
3.4.2.	Resumen del análisis de la exposición al riesgo de los campamentos	17
3.5.	USOS DE SUELO, ÁREAS INUNDABLES Y POBLACIÓN EXPUESTAS A RIESGOS	18
3.5.1.	Usos de suelo.....	19
3.5.2.	Áreas inundables	22
3.5.3.	Identificación de zonas pobladas expuestas a riesgos de inundaciones y flujos	25
4.	INFORMACION DE INFRAESTRUCTURA DE SERVICIOS EN EL ÁREA DE ESTUDIO	26
4.1.	REDES DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE Y REDES DE AGUAS SERVIDAS	26
4.2.	RED DE AGUAS LLUVIAS EXISTENTE	27
4.3.	RED DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA	27
4.4.	GASODUCTOS	28
4.5.	VIALIDAD ESTRUCTURANTE	28
5.	ACTIVIDADES DE TERRENO.....	28

5.1.	RECONOCIMIENTO DE TERRENO.....	28
5.1.1.	Quebradas N1 y N2.....	29
5.1.2.	Quebrada La Chimba.....	30
5.1.3.	Quebrada La Roca.....	31
5.1.4.	Quebrada Club Hípico.....	31
5.1.5.	Quebrada Bonilla.....	32
5.1.6.	Quebrada Farellones.....	33
5.1.7.	Quebrada Salar del Carmen.....	34
5.1.8.	Quebrada La Cadena.....	35
5.1.9.	Quebrada El Ancla.....	36
5.1.10.	Quebrada Schneider.....	37
5.1.11.	Quebrada Riquelme.....	38
5.1.12.	Quebrada Baquedano.....	39
5.1.13.	Quebrada Uribe.....	40
5.1.14.	Quebrada El Toro.....	41
5.1.15.	Quebrada Caliche.....	42
5.1.16.	Quebrada La Negra.....	43
5.1.17.	Quebrada Universidad de Antofagasta.....	44
5.1.18.	Quebrada Jardín del Sur.....	45
5.1.19.	Quebrada Huáscar.....	46
5.1.20.	Quebradas S1, S2 y S3.....	47
5.1.21.	Quebrada Roca Roja.....	47
5.1.22.	Comentarios finales del reconocimiento de terreno.....	49
5.2.	LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO.....	50
5.2.1.	Poligonales primarias y secundarias.....	50
5.2.2.	Levantamiento intersecciones y cruces de calles y avenidas.....	51
5.2.3.	Levantamiento perfiles transversales quebradas.....	51
5.3.	LEVANTAMIENTO AEROFOTOGRAMÉTRICO.....	52
5.4.	RESTITUCIÓN AEROFOTOGRAMÉTRICA.....	54
6.	ANÁLISIS HIDROLOGICO CON PROYECCIONES DE CAMBIO CLIMÁTICO.....	56
6.1.	ALCANCE DEL ANÁLISIS.....	56
6.2.	RECOPIACIÓN REVISIÓN Y ANÁLISIS DE ANTECEDENTES DE CAMBIO CLIMÁTICO.....	56
[1]	Ministerio de Medio Ambiente, 2014. Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático.....	57
6.3.	CARACTERIZACIÓN FISOGRÁFICA DE LA ZONA DE ESTUDIO.....	60
6.4.	ANÁLISIS DE PRECIPITACIONES EN EL PERIODO HISTÓRICO 1979-2020.....	62
6.4.1.	Corrección del producto grillado CR2MET V2.0.....	62
6.4.2.	Desagregación horaria de las series de precipitación diaria.....	62
6.4.3.	Estimación de la recurrencia anual de eventos de precipitación.....	63
6.4.4.	Análisis de condiciones antecedentes en el periodo histórico 1979-2020.....	64

6.4.5.	Análisis de las tormentas de mayor magnitud en la zona de estudio.....	65
6.4.6.	Análisis de hietogramas de precipitaciones anuales extremas.....	66
6.4.7.	Determinación de curvas intensidad-duración-frecuencia (IDF)	67
6.5.	PROYECCIONES FUTURAS DE PRECIPITACIÓN EN EL PERIODO 2035-2065	69
6.5.1.	Aspectos generales	69
6.5.2.	Procedimiento seguido.....	69
6.5.3.	Desagregación horaria de la precipitación	70
6.5.4.	Ajuste de Análisis de Frecuencia en el periodo 1979-2020.....	71
6.5.5.	Estimación de la recurrencia anual de eventos de precipitación del periodo 2035-2065	71
6.5.6.	Determinación de curvas IDF según estadísticas del periodo 2035-2065.....	72
6.6.	CAUDALES DE CRECIDA DURANTE EVENTOS DE PRECIPITACIONES EXTREMAS	75
6.6.1.	Crecidas calculadas con base en datos del periodo histórico 1979-2020	75
6.6.2.	Crecidas calculadas con base en datos del periodo futuro 2035-2065	77
6.6.3.	Comparación entre crecidas con base en datos de periodos 1979-2020 y 2035-2065.....	79
7.	PATRÓN DE DRENAJE E IDENTIFICACIÓN DE SISTEMAS	80
8.	MODELACIONES DEL ÁREA DE ESTUDIO PARA LA SITUACIÓN ACTUAL	85
8.1.	MODELOS DESARROLLADAS.....	85
8.2.	CARACTERIZACIÓN DE LAS CUENCAS EN ESTUDIO.....	85
8.2.1.	Área de estudio	85
8.2.2.	Parámetros morfométricos	86
8.2.3.	Precipitaciones máximas.....	86
8.2.4.	Caudales líquidos	88
8.2.5.	Caudales detríticos	88
8.2.6.	Hidrogramas líquidos y detríticos.....	89
8.3.	MODELACIÓN DE LAS QUEBRADAS Y DE SU ÁREA DE INFLUENCIA	89
8.3.1.	Modelo digital de terreno (MDT)	90
8.3.2.	Condiciones de borde	90
8.3.3.	Coeficiente de rugosidad de Manning.....	90
8.3.4.	Malla de modelación y parámetros de simulación numérica	90
8.3.5.	Escenarios de simulación.....	91
8.4.	EJEMPLOS DE LOS INPUTS DE MODELACIÓN	91
8.4.1.	Quebrada La Chimba y su área de influencia.....	91
8.4.2.	Quebrada Bonilla y su área de influencia.....	92
8.4.3.	Quebrada Universidad de Antofagasta y su área de influencia	93
8.5.	MODELACIÓN EPA SWMM DEL SISTEMA QUEBRADA SALAR DEL CARMEN.....	94
8.5.1.	Antecedentes sobre el sistema.....	94
8.5.2.	Caracterización de las subcuencas aportantes	95
8.6.	MODELACIÓN.....	95
8.6.1.	Nodos	95

8.6.2.	Links	97
9.	MODELACIÓN HEC-RAS PARA ESTUDIO DE INUNDACIONES EN 5 QUEBRADAS	99
9.1.	CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA DE LAS QUEBRADAS EN ESTUDIO	99
9.1.1.	Parámetros morfométricos	99
9.1.2.	Intensidades de lluvia.....	99
9.2.	CAUDALES DE CRECIDA LÍQUIDOS Y DETRÍTICOS	100
9.3.	HIDROGRAMAS LÍQUIDOS Y DETRÍTICOS	100
9.4.	INPUTS PARA LA MODELACIÓN HEC-RAS 2D	102
9.5.	EJEMPLO 1 DE LOS INPUTS DE MODELACIÓN: QUEBRADA LA ROCA	102
9.5.1.	Modelo digital de terreno (MDT)	102
9.5.2.	Condiciones de borde	102
9.5.3.	Coefficiente de rugosidad de Manning	103
9.5.4.	Malla de modelación y parámetros de simulación numérica	103
9.5.5.	Escenarios de modelación	104
9.5.6.	Malla de modelación y parámetros de simulación numérica	104
9.6.	EJEMPLO 2 DE LOS INPUTS DE MODELACIÓN: QUEBRADA SCHNEIDER	105
9.6.1.	Modelo digital de terreno (MDT)	105
9.6.2.	Condiciones de borde	105
9.6.3.	Malla de modelación y parámetros de simulación numérica	105
9.6.4.	Escenarios de modelación	107
10.	DIAGNÓSTICO DE LA RED DE DRENAJE DE AGUAS LLUVIAS EN LA SITUACIÓN ACTUAL Y EN SITUACIÓN ACTUAL OPTIMIZADA.....	107
10.1.	DIAGNÓSTICO DE LA SITUACIÓN ACTUAL	107
10.1.1.	Variables de diagnóstico de las inundaciones	108
10.2.	EJEMPLO 1. DIAGNÓSTICO DE LA QUEBRADA LA CHIMBA	109
10.2.1.	Áreas de inundación	109
10.2.2.	Profundidad de inundación.....	109
10.2.3.	Mapa de velocidades	112
10.3.	EJEMPLO 2. DIAGNÓSTICO DE LAS QUEBRADAS SALAR DEL CARMEN Y LA CADENA.....	112
10.3.1.	Áreas de inundación	112
10.3.2.	Profundidad de inundación.....	115
10.3.3.	Mapa de velocidades	115
10.4.	EJEMPLO 3 DIAGNÓSTICO DE LAS QUEBRADAS RIQUELME, BAQUEDANO Y URIBE	115
10.4.1.	Áreas de Inundación.....	115
10.4.2.	Profundidad de inundación.....	119
10.4.3.	Mapa de velocidades	119
10.5.	ANÁLISIS DE LAS PROYECCIONES DE CAMBIO CLIMÁTICO EN EL DIAGNÓSTICO DEL DRENAJE DE AGUAS LLUVIAS EN LA SITUACIÓN ACTUAL.....	122
10.5.1.	Situación actual sin y con proyecciones de cambio climático de la quebrada N1.....	122

10.5.2.	Situación actual sin y con proyecciones de cambio climático de la quebrada Bonilla	124
10.5.3.	Situación actual sin y con proyecciones de cambio climático de las quebradas Riquelme, Baquedano y Uribe	126
10.5.4.	Situación actual sin y con proyecciones de cambio climático de la quebrada Caliche.....	126
10.5.5.	Situación actual sin y con proyecciones de cambio climático de las quebradas S2 y S3.....	129
10.5.6.	Resumen de los efectos del cambio climático	130
10.6.	DIAGNÓSTICO DE LA RED DE DRENAJE EN LA SITUACIÓN ACTUAL OPTIMIZADA.....	134
11.	DIAGNÓSTICO DE LAS INUNDACIONES ASOCIADAS A LAS QUEBRADAS N1, LA ROCA, SCHNEIDER, S2 Y S3.....	136
11.1.	HIDROGRAMAS DETRÍTICOS	136
11.2.	ESCENARIOS DE SIMULACIÓN	136
11.3.	INUNDACIONES EN LA QUEBRADA LA ROCA Y EN SU ÁREA DE INFLUENCIA.....	137
11.3.1.	Áreas de inundación	137
11.3.2.	Profundidad de inundación.....	139
11.3.3.	Mapa de velocidades	139
11.3.4.	Análisis de resultados y conclusiones.....	142
11.4.	INUNDACIONES EN LA QUEBRADA SCHNEIDER Y EN SU ÁREA DE INFLUENCIA.....	142
11.4.1.	Áreas de inundación	142
11.4.2.	Profundidad de inundación.....	144
11.4.3.	Mapa de velocidades	144
11.4.4.	Análisis de resultados y conclusiones.....	148
11.5.	SÍNTESIS DEL DIAGNÓSTICO DE LAS INUNDACIONES DE LAS 5 QUEBRADAS	148
12.	PROPOSICIÓN DE CATASTROS	149
12.1.	BASES Y FUNDAMENTOS PARA REALIZAR LA PROPOSICIÓN DE CATASTROS	149
12.2.	SISTEMAS COLECTORES DE AGUAS LLUVIA CONSTRUIDOS	151
12.3.	SISTEMAS DE AGUAS LLUVIAS CON OBRAS DE CONTROL ALUVIONAL CONSTRUIDAS ..	151
12.4.	SISTEMAS DE AGUAS LLUVIAS SIN OBRAS DE CONTROL ALUVIONAL A LA FECHA.....	155
12.5.	ANÁLISIS COMPARATIVO DE CATASTROS PROPUESTOS CON LOS DEL PM-26	156
12.6.	PROPOSICIÓN DE LEVANTAMIENTOS TOPOGRÁFICOS	157
12.6.1.	Levantamientos locales de zonas de descarga de obras aluvionales.....	157
12.6.2.	Levantamiento de perfiles en calles.....	158
12.6.3.	Resumen de levantamientos topográficos propuestos.....	160
13.	SÍNTESIS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	161
13.1.	SÍNTESIS	161
13.2.	CONCLUSIONES	162
13.3.	RECOMENDACIONES	163

Índice de tablas

Tabla 2.1 Colectores red primaria propuesta.....	9
Tabla 2.2 Priorizaciones propuestas e inversiones para proyectos en áreas urbanas.....	9
Tabla 2.3 Resumen de Inversiones para Proyectos en Área de Expansión Área Urbana.....	10
Tabla 3.1 Cantidad de hogares y personas por campamento	13
Tabla 3.2 Situación de riesgo por campamento.....	17
Tabla 3.3 Denominación de las áreas verdes y de utilidad pública según PRC de Antofagasta	22
Tabla 3.4 Zonificación de áreas de inundación	23
Tabla 3.5 Zonificación de flujo de aguas lluvias propuesta	24
Tabla 3.6 Zonificación de población expuesta a riesgos hidrometeorológicos en área estudio.....	26
Tabla 5.1 Fuentes de información utilizadas en la restitución	55
Tabla 6.1 Matriz de amenaza de inundaciones urbanas de Antofagasta	58
Tabla 6.2 Resumen de comparación de alternativas de reformulación de caudales de diseño.....	59
Tabla 6.3 Parámetros morfométricos y tiempo de concentración de las cuencas	60
Tabla 6.4 Cobertura de suelo por quebrada de interés.....	61
Tabla 6.5 Fracciones de precipitación adoptadas según Tipo de Distribución	66
Tabla 6.6 Coeficientes de curvas IDF de zonas no urbanas para el periodo 1979-2020	68
Tabla 6.7 Coeficientes de curvas IDF de la zona urbana para el periodo 1979-2020.....	68
Tabla 6.8 Coeficientes de curvas IDF de la zona al norte de la latitud 23,65°S (1979-2020).....	69
Tabla 6.9 Coeficientes de curvas IDF de la zona al sur de la latitud 23,65°S (1979-2020).....	69
Tabla 6.10 Curvas IDF promedio entre MCG para la zona no urbana en periodo 2035-2065.....	73
Tabla 6.11 Curvas IDF promedio entre MCG para la zona urbana en periodo 2035-2065	74
Tabla 6.12 Intensidad media de precipitación en quebradas periodo histórico 1979-2020	75
Tabla 6.13 Caudal máximo instantáneo en el periodo histórico 1979-2020	76
Tabla 6.14 Intensidad media de precipitación en quebradas periodo futuro 2035-2065	77
Tabla 6.15 Caudal máximo instantáneo en el periodo futuro 2035-2065.....	78
Tabla 6.16 Cambio porcentual del QMI del periodo 2035-2065 respecto al periodo 1979-2020	79
Tabla 8.1. Parámetros morfométricos de las cuencas	86
Tabla 8.2 Caudales máximos detríticos (m³/s). Periodo histórico y con cambio climático.....	88
Tabla 8.3 Parámetros de modelación HEC RAS de Quebrada La Chimba.....	92
Tabla 8.4 Parámetros de modelación HEC RAS de Quebrada Bonilla	93
Tabla 8.5 Parámetros de modelación HEC RAS de Quebrada Universidad de Antofagasta	94
Tabla 8.6 Parámetros de las subcuencas aportantes al sistema Salar del Carmen	95
Tabla 8.7. Definición de los nodos para el sistema Salar del Carmen	96
Tabla 8.8 Definición de los links del modelo del sistema Salar del Carmen.....	97
Tabla 9.1 Parámetros morfométricos de las 5 quebradas en estudio	99
Tabla 9.2 Intensidades de precipitación (mm/hr).....	100
Tabla 9.3 Caudales máximos líquidos y detríticos.....	100

Tabla 9.4 Parámetros de modelación en malla de escurrimiento de Quebrada La Roca.....	104
Tabla 9.5 Parámetros de modelación HEC RAS de Quebrada Universidad de Antofagasta	105
Tabla 10.1 Efectos del cambio climático sobre el diagnóstico del drenaje. T= 25 años	131
Tabla 10.2 Efectos del cambio climático sobre el diagnóstico del drenaje. T= 50 años	132
Tabla 10.3 Efectos del cambio climático sobre el diagnóstico del drenaje. T= 100 años	133
Tabla 10.4 Puntos críticos y soluciones locales de corto plazo de inundaciones	135
Tabla 11.1 Resumen de caudales y áreas de inundación para T= 25, 50 y 100 años.....	148
Tabla 12.1 Obras de arte a ser catastradas propuestas en PM-26.....	150
Tabla 12.2 Resumen de catastro propuesto en los sistemas de las quebradas de Antofagasta	156
Tabla 12.3 Levantamientos propuestos en zonas de descarga con obras de control aluvional	158
Tabla 12.4 Resumen de cantidades y longitudes de perfiles topográficos propuestos	160

Índice de figuras

Figura 1.1 Área de estudio y cuencas que drenan hacia el plano urbano de Antofagasta	3
Figura 3.1 Límite urbano según Plan regulador de Antofagasta y área de estudio.....	20
Figura 3.2 Vías aluviales entre quebrada Bonilla y quebrada El Ancla	20
Figura 3.3 Vías aluviales entre quebrada Riquelme y quebrada La Negra	21
Figura 3.4 Vías aluviales entre quebrada La Negra y quebrada Huáscar	21
Figura 5.1 Imagen satelital de los flujos principales de la quebrada N1.....	29
Figura 5.2 Imagen satelital de los flujos principales de la quebrada N2.....	30
Figura 5.3 Imagen satelital de los flujos principales de la quebrada La Chimba.....	30
Figura 5.4 Imagen satelital de los flujos principales de la quebrada La Roca	31
Figura 5.5 Imagen satelital de los flujos principales de la quebrada Club Hípico	32
Figura 5.6 Imagen satelital de los flujos principales de la quebrada Bonilla	33
Figura 5.7 Imagen satelital de los flujos principales de la quebrada Farellones	33
Figura 5.8 Muros estabilizadores y rápidos de descarga de pozas de la quebrada Farellones.....	34
Figura 5.9 Imagen satelital de la quebrada Salar del Carmen y obras aluvionales.....	34
Figura 5.10 Obras de control aluvional de la quebrada Salar del Carmen	35
Figura 5.11 Imagen satelital de los flujos principales de la quebrada La Cadena.....	35
Figura 5.12 Uso de las pozas de decantación como basural (vista hacia aguas abajo)	36
Figura 5.13 Imagen satelital de los flujos principales de la quebrada El Ancla.....	36
Figura 5.14 Obra disipadora y entrada a alcantarilla de cruce de la Avda. Padre Hurtado	37
Figura 5.15 Obra de descarga de la quebrada El Ancla en calle Buenos Aires.....	37
Figura 5.16 Imagen satelital de los flujos principales de la quebrada Schneider	38
Figura 5.17 Imagen satelital de los flujos principales de la quebrada Riquelme	38
Figura 5.18 Batería de muros estabilizadores y a la derecha viviendas irregulares	39
Figura 5.19 Imagen satelital de los flujos principales de la quebrada Baquedano.....	39
Figura 5.20 Acumulación de basura aguas abajo del colector de la quebrada Baquedano	40

Figura 5.21 Imagen satelital de los flujos principales de la quebrada Uribe	40
Figura 5.22 Obras de acumulación y descarga del flujo a calle Uribe.....	41
Figura 5.23 Imagen satelital de los flujos principales de la quebrada El Toro	41
Figura 5.24 Vista desde aguas arriba de pozas de acumulación y descarga en Manuel Bulnes.....	42
Figura 5.25 Imagen satelital de los flujos principales de la quebrada Caliche	42
Figura 5.26 Descarga del cauce norte de la quebrada Caliche a la calle Radoslav Razmilic.....	43
Figura 5.27 Descarga del cauce norte de la quebrada Caliche a la calle Los Changos.....	43
Figura 5.28 Imagen satelital de los flujos principales de la quebrada La Negra	44
Figura 5.29 Canalización en hormigón de la quebrada La Negra	44
Figura 5.30 Imagen satelital de los flujos principales de la quebrada U. de Antofagasta	45
Figura 5.31 Imagen satelital de los flujos principales de la quebrada Jardín del Sur	45
Figura 5.32 Obra de control aluvional del cauce de la cuenca sur de la quebrada Jardín del Sur.....	46
Figura 5.33 Imagen satelital de los flujos principales de la quebrada Huáscar.....	46
Figura 5.34 Descarga hacia Calle Baja de la quebrada Huáscar	47
Figura 5.35 Imagen satelital de los flujos principales de las quebradas S1, S2 y S3.....	48
Figura 5.36 Imagen satelital de los flujos principales de la quebrada Roca Roja	48
Figura 5.37 Vista de la zona baja de la quebrada Roca Roja y obras de decantación	48
Figura 5.38 Límites del área del levantamiento de la ciudad de Antofagasta.....	52
Figura 6.1 Esquema del cálculo para la agregación espacial a escala de cuenca	63
Figura 6.2 Máxima precipitación diaria anual en el periodo 1979-2020	65
Figura 7.1 Patrón de drenaje de cuencas	81
Figura 7.2 Patrón de drenaje de sistemas urbanos. Quebrada Farellones y sectores aledaños	83
Figura 7.3 Patrón de drenaje de sistemas urbanos. Quebrada Bonilla y sectores aledaños.....	84
Figura 8.1 Curva IDF para T=25 años seleccionada para el periodo histórico	87
Figura 8.2 Áreas aportantes definidas para el modelo EPA SWMM.....	96
Figura 8.3. Esquema de la malla de modelación del sistema Salar del Carmen	98
Figura 9.1 Curvas IDF seleccionadas para el periodo histórico.....	100
Figura 9.2 Hidrogramas líquidos y detríticos de Quebrada La Roca.....	101
Figura 9.3 Hidrogramas líquidos y detríticos en Quebrada Schneider	101
Figura 9.4 Coeficientes de rugosidad en Quebrada La Roca.....	103
Figura 9.5 Malla de escurrimiento y condiciones de borde en Quebrada La Roca	104
Figura 9.6 Coeficientes de rugosidad en Quebrada Schneider	106
Figura 9.7 Malla de escurrimiento y condiciones de borde en Quebrada Schneider	106
Figura 10.1 Áreas de inundación en Quebrada La Chimba, para T= 25 y T=100 años	110
Figura 10.2 Profundidades en flujos detríticos en Quebrada La Chimba, Para T=25 años.....	111
Figura 10.3 Mapa de velocidades en Quebrada La Chimba, para T=25 años.....	113
Figura 10.4 Áreas de inundación quebradas Salar del Carmen y La Cadena T=25 y T=100 años	114
Figura 10.5 Profundidades en flujos detríticos en Salar del Carmen y La Cadena. T=25 años.....	116
Figura 10.6 Mapa de velocidades en quebradas Salar del Carmen y La Cadena para T=25 años	117

Figura 10.7 Áreas de inundación en quebradas Riquelme, Baquedano y Uribe para T=25 y T=100 años	118
Figura 10.8 Profundidades en flujos detríticos en quebradas Riquelme, Baquedano y Uribe, para T=25 años	120
Figura 10.9 Mapa de velocidades en quebradas Riquelme, Baquedano y Uribe, para T=25 años.....	121
Figura 10.10 Áreas de inundación de T= 25 y T=100 años con y proyección con cambio climático. Quebrada N1	123
Figura 10.11 Áreas de inundación de tormentas T=25 y T=100 años con y proyección con cambio climático. Quebrada Bonilla	125
Figura 10.12 Áreas de inundación T=25 y T=100 años con proyección con cambio climático. Qdas Riquelme, Baquedano y Uribe	127
Figura 10.13 Áreas de inundación de T=25 y T=100 años con cambio climático. Quebrada El Toro	128
Figura 10.14 Áreas inundación T=25 y T=100 años con cambio climático. Quebradas S2 y S3.....	130
Figura 11.1 Áreas de inundación en Quebrada La Roca	138
Figura 11.2 Profundidades en flujos detríticos en Quebrada La Roca	140
Figura 11.3 Mapa de velocidades en Quebrada La Roca	141
Figura 11.4 Áreas de inundación en Quebrada Schneider.....	143
Figura 11.5 Profundidades en flujos detríticos en Quebrada Schneider	145
Figura 11.6 Curvas de nivel y área de inundación en Quebrada Schneider.....	146
Figura 11.7 Mapa de Velocidades en la quebrada Schneider	147
Figura 12.1 Descarga del colector de la quebrada Salar del Carmen.....	152
Figura 12.2 Canalización en hormigón de la quebrada La Negra.....	152
Figura 12.3 Obra disipadora y entrada a alcantarilla cruce de la Avda. Padre Hurtado. El Ancla.....	153
Figura 12.4 Puntos a catastrar en colector proyectado. Sistema El Ancla	153
Figura 12.5 Canal de descarga hacia calle Teniente Ernesto Riquelme	154
Figura 12.6 Puntos a catastrar en colector proyectado. Sistema Riquelme	154
Figura 12.7 Sitios a catastrar en colector proyectado. La Roca.....	155
Figura 12.8 Sitios a catastrar en colector proyectado. Club Hípico.....	156
Figura 12.9 Perfiles topográficos propuestos. La Chimba.....	159
Figura 12.10 Perfiles topográficos propuestos. Bonilla	160

ANEXOS

Anexo I Revisión y Análisis Crítico del PM-26

Anexo II Antecedentes de Población en Conos de Deyección y Análisis de Exposición a Riesgos Hidrometeorológicos

Anexo III Infraestructura de Servicios Básicos en el Área de Estudio

Anexo IV Zonificación Urbana. Usos de Suelo, Áreas Inundables y Zonas de Asentamientos Humanos Expuestas a Riesgos Hidrometeorológicos

Anexo V Visita de Reconocimiento de Terreno

Anexo VI Informe Topográfico

Anexo VII Aerofotogrametría y Restitución

Anexo VIII Análisis Hidrológico con Proyecciones de Cambio Climático

Anexo IX Modelaciones HEC-RAS 2-D Y EPA-SWMM del Área de Estudio para la Situación Actual

Anexo X Modelaciones HEC-RAS Para la Situación Actual de las Quebradas N1, La Roca, Schneider, S2 y S3

Anexo XI Diagnóstico del Drenaje de Aguas Lluvias en Situación Actual y Situación Optimizada del Área de Estudio

Anexo XII. Diagnóstico de las Inundaciones en Situación Actual para las Quebradas N1, La Roca, Schneider, S2 Y S3

Anexo XIII Proposición de Catastro y Levantamientos Topográficos para Estudios Futuros

PLANOS

CÓDIGO	TÍTULO PLANO	ESCALA	LÁMINAS
PNUD-PMA-CNC	CUENCAS APORTANTES A RED DE AGUAS LLUVIAS DE ANTOFAGASTA	1 : 20.000	3
PNUD-PMA-PRY	RED DE AGUAS LLUVIAS PROYECTADA Y CONSTRUIDA PM-16	1 : 5.000	7
PNUD-PMA-ZUR	ZONIFICACIÓN URBANA - AREAS VERDES - ÁREAS INUNDABLES - ZONAS DE RIESGO	1 : 5.000	9
PNUD-PMA-CAT	DIAGNÓSTICO DE PROBLEMAS DE EVACUACIÓN DE AGUAS LLUVIAS Y PROPOSICIÓN DE CATASTRO	1 : 5.000	9
PNUD-PMA-QLR	LEVANTAMIENTO TOPOGRAFICO QUEBRADA LA ROCA	INDICADAS	3
PNUD-PMA-QN1	LEVANTAMIENTO TOPOGRAFICO QUEBRADA N1	INDICADAS	3
PNUD-PMA-QS2	LEVANTAMIENTO TOPOGRAFICO QUEBRADA S2	INDICADAS	2
PNUD-PMA-QS3	LEVANTAMIENTO TOPOGRAFICO QUEBRADA S3	INDICADAS	2
PNUD-PMA-QSCH	LEVANTAMIENTO TOPOGRAFICO QUEBRADA SCHNEIDER	INDICADAS	2
PNUD-PMA-DAD	PLANOS DE DIAGNOSTICO DE LA SITUACION ACTUAL DEL SISTEMA DE DRENAJE URBANO DE ANTOFAGASTA Y SITUACION OPTIMIZADA	1 : 5.000	10
PNUD-PMA-MH	DIAGNÓSTICO DE INUNDACIONES DE 5 QUEBRADAS-T = 25 Y 100 AÑOS	1 : 5.000	4
PNUD-PMA-ISO	ISOYETAS ASOCIADAS A DURACION 24H - T=10 AÑOS	1 : 20.000	3
PNUD-PMA-PDU	PATRON DE DRENAJE DE LA ZONA URBANA	1 : 5.000	9
PNUD-PMA-PDC	PATRON DE DRENAJE DE LAS CUENCAS APORTANTES	1 : 20.000	3

ACTUALIZACIÓN PLAN MAESTRO DE EVACUACIÓN Y DRENAJE DE AGUAS LLUVIAS DE ANTOFAGASTA INFORME FINAL

1. INTRODUCCIÓN

1.1. ANTECEDENTES GENERALES

Un plan maestro de evacuación y drenaje de aguas lluvias, en tanto 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.

En este contexto, el Banco de Desarrollo de América Latina (CAF) y el Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) con el financiamiento del Fondo Internacional de Adaptación (FA), en conjunto con los países de Chile y Ecuador, implementaron el proyecto “Reducción de la vulnerabilidad climática y el riesgo de inundación en área urbanas y semi urbanas costeras en ciudades de América Latina” AdaptaClima.

En el presente proyecto, el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo PNUD, actúa como agencia implementadora del mismo, el Ministerio del Medio Ambiente como socio implementador, el Ministerio de Obras Públicas como socio estratégico, en conjunto con la Dirección de Obras

Hidráulicas como unidad técnica, y el Ministerio de Relaciones Exteriores como entidad representante del Gobierno de Chile, para formalizar la colaboración y roles, y las funciones y responsabilidades de las partes.

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, 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

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.

Dichas modelaciones consideran dos escenarios.

- Un escenario en el cual las simulaciones suponen válida la hidrología de eventos extremos basada en los registros históricos del periodo 1979 a 2020.
- Un escenario alternativo que involucra la situación futura a través del mismo tipo de simulaciones, pero que incorpora 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.

En cuanto a los objetivos específicos, de acuerdo a los Términos de Referencia la presente actualización del Plan Maestro de Aguas Lluvias considera los que se indican a continuación.

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



- Recopilación y revisión de antecedentes.
- Levantamiento aerofotogramétrico de 172 km² de la ciudad de Antofagasta mediante vuelo Lidar u otro y generación de ortomosaico.
- Elaboración de un diagnóstico preliminar de la problemática de evacuación y drenaje en el área urbana de Antofagasta.
- Proposición de catastro y topografía para futuras etapas del estudio.
- Actualización del estudio hidrológico, elaboración de curvas 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/m²), 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 publicaciones como las siguientes:

- 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. En particular, las proyecciones climáticas de área de estudio del periodo proyectado 2035 al 2065.

1.4. ÁREA DE ESTUDIO

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.

2. RECOPIACIÓN Y ANÁLISIS DE ANTECEDENTES

2.1. REVISIÓN Y ANÁLISIS CRÍTICO DEL PM-26

En el presente acápite se presenta los diversos aspectos que cubrieron la revisión y análisis crítico del Plan Maestro de Evacuación y Drenaje de Aguas Lluvias de la ciudad de Antofagasta, desarrollado por la DOH el año 2004, denominado PM-26.

Los detalles de esta actividad están consignados en el Anexo I del presente informe denominado “Revisión y Análisis Crítico del PM-26”.

2.1.1. Descripción general del Plan Maestro

El PM-26 del 2004 formó parte de la elaboración de los Planes Maestros de Evacuación y Drenaje de Aguas Lluvias para distintas ciudades del país sobre 50.000 habitantes.

Como primera parte de dicho estudio, se realizó una completa recopilación y revisión de los antecedentes bibliográficos relativos a los problemas y soluciones planteadas para evacuación y drenaje de aguas lluvias de la ciudad de Antofagasta, los cuales estaban directamente relacionados con la ocurrencia de fenómenos aluvionales. A partir de ello, se formuló un diagnóstico.

Seguidamente se abordó el estudio hidrológico consistente en calcular las intensidades de lluvia, áreas aportantes y coeficientes de escorrentía basados en las características de las cuencas de las quebradas y en una zonificación de usos de suelo para las áreas aportantes urbanas, y los caudales de diseño del sistema de drenaje y evacuación de las aguas lluvias.

La proposición de alternativas de soluciones de aguas lluvias, asociada a un análisis técnico económico estableció que el período de retorno óptimo de diseño de las obras, es decir, el cual permite maximizar la rentabilidad del proyecto de drenaje, es de 25 años, aún cuando los indicadores de rentabilidad de la inversión resultaron todos negativos.

2.1.2. Antecedentes básicos de estudio

2.1.2.1. Hidrología

Las características convectivas de las precipitaciones en el área de estudio impidieron efectuar un análisis convencional (gran variabilidad espacial) de las precipitaciones, además de los pocos estudios hidrológicos y la inexistencia de redes pluviográficas a la época. De acuerdo con la información analizada, relativa a magnitud, duración e intensidad de los mayores eventos registrados en la zona, los caudales detríticos (aluviones) se inician con lluvias de intensidad superior a 4 mm/hr, lo que ocurriría para lluvias de 1,5 a 3 horas de duración cuyo período de retorno es del orden de 10 a 25 años.

2.1.2.2. Uso actual y futuro del suelo en el área de estudio

La determinación del uso actual y futuro del suelo en el área de estudio se realizó a partir de una clasificación del área en zonas homogéneas, según tipologías de uso del suelo, entendidas éstas como zonas que presentan o presentarán a futuro características similares en cuanto al grado de ocupación del territorio. Para las áreas homogéneas definidas y para cada una de las tipologías de suelos, se asignaron rangos de valores del coeficiente de escorrentía tomando en consideración valores entregados en la literatura especializada.

2.1.2.3. Infraestructura existente

La ciudad carecía de infraestructura propiamente tal, descartándose como parte de esta infraestructura, las vías que efectivamente evacúan, aunque parcialmente, aguas lluvias como calles ni cauces naturales.

2.1.2.4. Diagnóstico

Los escurrimientos superficiales más importantes están relacionados con 18 quebradas, las que se asocian a igual número de vías preferenciales en la ciudad, a saber, La Chimba, La Roca, Club Hípico, Bonilla, Farellones, Salar del Carmen, La Cadena, El Ancla, Riquelme, Baquedano, Uribe, El Toro, El Caliche, La Negra, Universidad de Antofagasta, Jardín del Sur, Huáscar y Roca Roja.

Las calles presentan capacidades de conducción muy restringidas, con fuertes pendientes longitudinales que permiten a los flujos alcanzar altas velocidades todo lo cual se traduce en escurrimientos altamente inestables y con gran potencial erosivo, en caso de calzadas sin pavimentar, concluyéndose que tales características hacen muy poco seguro considerar el uso exclusivo de las calles como vías conductoras de las aguas lluvias.

2.1.2.5. Patrón de drenaje

El análisis del patrón de drenaje permitió definir dos áreas: “Área Costera”, que corresponde al sector que descarga directamente al Océano Pacífico y “Área Salar del Carmen” donde todos los escurrimientos confluyen a un punto bajo.

El Área Costera, se subdividió en 29 zonas de drenaje independientes.

El área Salar del Carmen se consideró como una sola unidad, distinta de la cuenca “Área Salar del Carmen”, la cual está inserta en la llamada Área Costera y se encuentra fuera del límite del área estudio de la presente Consultoría.

A fin de minimizar las inversiones en las obras de drenaje se utilizó, como complemento a las redes de colectores, la capacidad de conducción de las calles que forman parte de las vías preferenciales, de modo de aprovechar la fracción del caudal de diseño que ellas pueden conducir.

A la fecha del estudio, la zona del Salar del Carmen contaba con obras de control aluvional: 44 obras estabilizadoras de pendiente: 5 en el afluente N°1; 18 en el afluente N°2; 10 en el afluente N°2-2; y 11 en el afluente N°3, por lo que el caudal aportante sobre la zona urbana se supuso que corresponde a un flujo líquido con una concentración máxima de 15% de material sólido. Las restantes quebradas que aún no contaban con obras de control aluvional aportarían caudales detríticos sobre el sector urbano consolidado con valores de concentración volumétricos entre un 40 y 65%.

Para la situación futura, establecida al año 2032, se supusieron construidas todas las obras de control aluvional proyectadas lo cual implica que los caudales aportantes sobre la zona urbana serían de carácter líquido con una concentración máxima de 15%. Los caudales obtenidos en zonas urbanas, que no reciben descargas de quebradas, se consideraron como líquidos con una concentración de sólidos menor a 15%.

2.1.3. Proposición y selección de alternativas

2.1.3.1. Antecedentes

El análisis de soluciones para el drenaje de las aguas lluvias de la ciudad de Antofagasta tomó en cuenta, entre otros, los siguientes elementos que influyen en el tipo de soluciones posibles de adoptar:

- La ciudad y su red vial es la receptora natural de los escurrimientos superficiales generados principalmente por 18 quebradas que se encuentran al oriente del casco urbano. Ninguna de estas quebradas presenta condiciones para un adecuado cruce de la ciudad hasta su descarga en el mar.
- De no construirse las obras como las que se encuentran desarrolladas a nivel de ingeniería de detalle en el proyecto de la DOH del MOP (EWI & AC Ingenieros Consultores, 2000), los

sistemas de drenaje solo serán efectivos para aquellos eventos en que haya escurrimiento líquido. Se estimó que ello ocurriría para períodos de retorno inferiores a 25 años.

- Una vez resuelto el problema de la conducción y evacuación de los escurrimientos provenientes de las quebradas que atraviesan la ciudad, los únicos flujos superficiales de alguna importancia que podrían generarse durante lluvias, son aquellos provenientes de las laderas ubicadas entre cuencas de quebradas y los generados por caída directa de precipitaciones sobre el casco urbano. Para estos casos los caudales y escurrimientos superficiales a través de las calles, presentarían menor relevancia.
- Asimismo, las inundaciones por acumulación de aguas lluvias no causan problemas significativos por daños a las personas y bienes materiales o inmuebles ya que, en general, las áreas anegadas son de escasa extensión y profundidad. Debido a esto, en este caso resulta atractiva la posibilidad de aceptar que al menos parte de dichos flujos escurra a través de las calles evacuándolos hacia conducciones construidas en las vías principales (asociadas a las quebradas) o directamente al mar y que solo los puntos bajos de acumulación de aguas lluvias sean drenados mediante colectores locales.

2.1.3.2. *Alternativas*

Para la definición de las soluciones se consideró que ellas se encuentran relacionadas principalmente con la necesidad de evacuar los escurrimientos que ingresan a la ciudad proveniente de las quebradas. Ello por cuanto los principales aportes al sector urbano se encuentran concentrados en los puntos de ingreso o entrada al área urbanizada.

En el análisis de las alternativas, como se mencionó anteriormente, se descartó la conducción de la totalidad de los flujos provenientes de las quebradas en forma superficial por las calzadas. Consecuente con ello, solo se consideró posible que a través de las vías preferenciales escurriera aquella fracción de las aguas lluvias acorde a su capacidad máxima de conducción.

2.1.3.3. *Definición de la Red Primaria*

La

Tabla 2.1 resume los colectores de la red primaria definida en el PM-26.

2.1.3.4. *Evaluación económica y período de retorno de diseño*

La metodología utilizada para la evaluación económica se basó en el criterio de considerar los beneficios del proyecto como el daño evitado en la situación con proyecto, para crecidas de diferentes períodos de retorno, determinándose que el período de retorno óptimo de diseño de las obras, es decir, el cual permite maximizar la rentabilidad del proyecto de drenaje, es 25 años.

Tabla 2.1 Colectores red primaria propuesta

Zona	Red Propyectada
La Chimba	Colector La Chimba
La Roca	Colector La Roca
Club Hípico	Colector Club Hípico
Bonilla	Colector Bonilla
Bonilla - Farellones	Colector Ongolmo
Farellones	Colector Farellones
Salar del Carmen	Colector Salar del Carmen
La Cadena	Colector La Cadena
El Ancla	Colector El Ancla
Riquelme – Baquedano – Uribe	Colector Riquelme – Baquedano – Uribe
El Toro - Caliche	Colector El Toro- Caliche
La Negra	Descarga La Negra
Universidad de Antofagasta	Colector Universidad de Antofagasta
Jardín del Sur	Colector Jardín del Sur
Huáscar	Colector Huáscar
Roca Roja	Descarga Roca Roja

2.1.4. Inversiones y priorización de las soluciones

Atendiendo a los altos costos de inversión asociados, se efectuó un análisis de priorización de las soluciones empleando diversos criterios cualitativos técnicos, económicos y sociales, que llevaron a proponer las prioridades e inversiones contabilizadas a mayo de 2003, para las distintas obras de drenaje que se consignan en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2 Priorizaciones propuestas e inversiones para proyectos en áreas urbanas

Colector	Prioridad Propuesta	Inversión miles de millones de \$ de mayo 2003
Salar del Carmen	A	7,780
El Ancla	A	3,394
Universidad de Antofagasta	A	0,479
Ongolmo	M	4,486
Farellones	M	4,951
La Cadena	M	2,010
Bonilla	M	3,608
Riquelme-Baquedano Uribe	M	7,230
El Toro- Caliche	M	4,239
La Negra	M	0,548
Jardín del Sur	M	0,933
La Roca	B	2,756
Club Hípico	B	3,695

Nota: Prioridad A: Alta, M: Media y B: Baja

Se propuso asignar la primera prioridad a las obras de la quebrada Salar del Carmen en virtud de que la quebrada ya contaba con obras de control aluvional construidas.

En lo que respecta a las obras de drenaje de aguas lluvias ubicadas fuera del área urbana consolidada, cuyas inversiones mayo de 2003 corresponden a las señaladas en la Tabla 2.3, éstas no fueron priorizadas.

Tabla 2.3 Resumen de Inversiones para Proyectos en Área de Expansión Área Urbana

Colector	Inversión miles de millones de \$ de mayo 2003
La Chimba	1,355
Huáscar	0,252
Roca Roja	0,565

Los resultados obtenidos permitieron identificar 17 áreas de riesgo de inundación por aguas lluvias las cuales requieren la construcción de una red primaria de 26,8 km de longitud.

La inversión requerida para esta red, de acuerdo con el desglose de las tablas precedentes, asciende a \$48.281 millones (equivalente a UF 2.836.090) para un nivel de seguridad asociado a 25 años de período de retorno.

2.1.5. Comentarios finales y conclusiones

La revisión y análisis crítico del PM-26 del año 2004 permite comentar y concluir en síntesis, lo siguiente:

- El análisis del patrón de drenaje y de las condiciones topográficas de la ciudad de Antofagasta, pone en evidencia que las altas pendientes en la dirección oriente-poniente propician el escurrimiento en ese sentido, por lo que no existen muchos sectores de puntos bajos donde las aguas lluvias tiendan a apozarse.
- Las excepciones se tienen principalmente en la costanera de la ciudad donde la pendiente longitudinal de la calle que es más baja y la presencia de construcciones impiden la descarga natural de las aguas al mar.
- La Red Primaria definida en el PM-26 está conformada por 18 Colectores de aguas lluvias, de los cuales solo 2 se han construido completamente a la fecha: Colector Salar del Carmen y Colector la Negra.
- Existen en la actualidad otras obras de infraestructura de aguas lluvias construidas en la ciudad, pero son de poca magnitud, principalmente atraviesos de calles.
- La mayoría de estos colectores se inician en la desembocadura de las diferentes quebradas afluentes al área urbana de la ciudad. El trazado de los colectores tiene un sentido de oriente a poniente, finalizando con la descarga de las aguas lluvias en el mar.

- La necesidad de la Red Primaria radica en evitar flujos superficiales de alta velocidad por las calles de la ciudad que pudieran afectar negativamente a los habitantes de la ciudad y daños estructurales.
- De no construirse las obras de control aluvional de las quebradas, como las que se encuentran desarrolladas a nivel de ingeniería de detalle en el proyecto de la DOH del MOP (EWI & AC Ingenieros Consultores, 2000), los sistemas de drenaje solo serán efectivos para aquellos eventos en que haya escurrimiento líquido. En el PM-26, se estimó que ello ocurriría para períodos de retorno inferiores a 25 años.
- En la actualidad no están materializadas las obras para las quebradas: La Chimba, Club Hípico, Bonilla, Caliche y U. de Antofagasta.
- Para el dimensionamiento de los colectores de aguas lluvias, el PM-26 supuso construidas las obras de control aluvional proyectadas en el estudio arriba citado.
- La revisión de los trazados de los colectores de la Red Primaria evidenció que se requerirá la actualización de algunos de ellos, principalmente en los tramos iniciales, producto de construcciones materializadas posteriormente que afectan o alteran totalmente el trazado original propuesto en el PM-26, los que en algunos casos están en el cauce mismo.
- Específicamente los colectores que requerirían cambios en el trazado son, La Chimba, La Roca, El Ancla, Riquelme, Uribe, Balmaceda, Baquedano, Toro-Caliche y U. de Antofagasta.
- Además de los cambios a los trazados que sería necesario realizar, cabe destacar la complejidad intrínseca que implicará la construcción de cada uno de los colectores de la Red Primaria, dado que, por estar emplazados en la ciudad misma, existen muchas interferencias a sortear.
- De manera preliminar y solo a título informativo, debe tenerse presente que si no todos ellos, la inmensa mayoría tendría que cruzar la autopista de la Ruta 1 y/o la vía del FF.CC.
- En el área urbana no se visualiza proyectar nuevos colectores dado que el PM-26 abordó en detalle tanto la red primaria como secundaria. Solamente se podrían eventualmente requerir en las zonas de expansión del Plan Regulador Comunal en el lado norte de la ciudad.

3. POBLACIÓN EN CONOS DE DEYECCIÓN Y ANÁLISIS DE LA EXPOSICIÓN A RIESGOS HIDROMETEOROLÓGICOS EXTREMOS

Se describen a continuación los antecedentes y análisis de la población asentada en los conos de deyección de las quebradas de Antofagasta y los riesgos a que está expuesta frente a la ocurrencia de eventos hidrológicos extremos, causantes de flujos de agua, lodo, piedras y rocas, denominados genéricamente aluviones.

Tanto los antecedentes como los análisis y sus resultados se incluyen detalladamente en el Anexo II. “Antecedentes de Población en Conos de Deyección y Análisis de Exposición a Riesgos Hidrometeorológicos”.

3.1. CENSO DE POBLACIÓN DE 2017 DE ANTOFAGASTA

Sobre la base del último censo realizado en Chile el año 2017, el Instituto Nacional de Estadísticas (INE) desarrolló una proyección de población anual a nivel comunal, hasta el año 2035. La información del censo se presenta desagregada a nivel de manzana, por lo que es posible revisar la situación de ese año detalladamente.

Para la comuna de Antofagasta el censo determina que la población alcanza un total de 361.873 personas, considerando un 21,88% de aumento respecto del censo 2002.

La estimación que realizó el INE para la población actual (año 2021), contempla un total de 433.712 personas, estimando un crecimiento de 19,85% respecto del censo del 2017, muy superior al país con un promedio nacional de aumento del 11,97%.

Este explosivo crecimiento comunal, con un aumento en 4 años similar al de los 15 años anteriores al censo 2017, se debe al mejoramiento de las condiciones socioeconómicas de la comuna producto de la minería, junto a un componente importante de migración instalada en la zona.

El INE establece una proyección de población hacia el año 2035, que alcanza para la comuna de Antofagasta a un total de 471.582 personas, con un aumento del 8,73%.

3.2. PROYECCIÓN DE POBLACIÓN DE LOS CAMPAMENTOS

El Censo 2017 no establece una posible distribución futura de la población, posiblemente debido a la variabilidad de los asentamientos que se generarán, tanto en densificación, expansión y construcciones irregulares.

Respecto de los campamentos, desde el catastro del año 2019, se puede observar un crecimiento de la mayoría de los sectores donde se emplazan, principalmente los periféricos con espacio disponible.

Como parte del presente estudio, se identificaron al menos dos nuevas zonas que cuentan con instalación de viviendas en condición irregular; al sur de la quebrada Riquelme y al sur de la quebrada Farellones.

Este importante crecimiento se debe principalmente a la falta de oportunidades producida por la pandemia del Covid 19 a partir del año 2020 y que aún se mantiene (2022), lo que aumentó la cesantía y generó un desplazamiento de las viviendas formales en la ciudad hacia las informales en campamentos.

Atendida la incertidumbre de la continuación de la pandemia y su grado de severidad, como también otras condiciones como los niveles de cesantía/ocupación, y más generalmente hablando, la condición política, social y económica del país, las futuras migraciones hacia la región y la situación económica comunal asociada al crecimiento de la minería, no resulta posible aventurar siquiera cuál podría ser la variación de la población en campamentos, en el mediano futuro o el largo plazo.

3.3. CATASTRO NACIONAL DE CAMPAMENTOS DE 2019

El MINVU realizó el año 2019 una actualización del catastro de campamentos a nivel nacional, desarrollando una plataforma geográfica con la información.

El catastro tuvo como objetivo cuantificar y localizar los campamentos del país, así como también identificar y caracterizar las viviendas, hogares y personas que habitan en ellos. Este levantamiento actualizó los datos del Catastro 2011 e incorporó mejoras a nivel metodológico, lo que permitió obtener información georreferenciada.

En la comuna de Antofagasta el año 2019 se identificó un total de 63 campamentos, agrupando 16.362 personas en 5.781 hogares, todos emplazados en el sector oriente de la ciudad, preferentemente en los faldeos de los cerros de la Cordillera de la Costa.

La mayoría de estos campamentos se emplaza en zonas cercanas al límite urbano, en el piedemonte.

a) Sector norte – La Chimba

En el sector norte de Antofagasta existen 4 campamentos denominados según orientación de norte a sur, todos emplazados en una zona más plana, alejado del piedemonte.

b) Sector centro norte – Bonilla

En el sector centro norte de Antofagasta existe un campamento que actualmente se encuentra erradicado (Parque Juan López) y otros 7 campamentos, emplazados en una zona de pendiente intermedia, alejados del piedemonte.

c) Sector centro sur

En el sector centro-sur, se encuentra el Macrocampamento Balmaceda con 11 campamentos y otros 15, denominados según orientación de norte a sur. Se observa que en general estos campamentos se emplazan en una zona de alta pendiente del piedemonte.

d) Sector sur

En el sector sur de Antofagasta existen 27 campamentos, en general emplazados en una zona de alta pendiente del piedemonte.

En la Tabla 3.1 se presenta el resumen de información por cada campamento de la ciudad, referida a la cantidad de hogares y personas de cada uno de ellos.

Tabla 3.1 Cantidad de hogares y personas por campamento

Campamentos	Hogares	Personas
América Unida (Macro Campamento Balmaceda)	174	441
Ecuachilepe (Macro Campamento Balmaceda)	131	375
Futuro Antofagasta (Macro Campamento Balmaceda)	115	292

Campamentos	Hogares	Personas
Irrarázaval Etapa I (Macro campamento Balmaceda)	55	138
Mujeres Emprendedoras (Macro Campamento Balmaceda)	79	230
Mujeres Unidas II (Macro Campamento Balmaceda)	9	23
Pantaleón Cortés (Macro campamento Balmaceda)	91	245
Un Techo Para Mi Pueblo Latino (Macro Campamento Balmaceda)	601	1.599
Villa Esperanza (Macro Campamento Balmaceda)	147	400
La Lucha es Posible	47	132
La Quebrada (Macro Campamento La Chimba)	75	228
Luz Divina VI (Macro Campamento La Chimba)	101	321
Sol Saliente	79	223
El Bosque	245	774
Eulogio Gordo	93	307
Nuevo Amanecer Latino	44	127
Rayito de Sol	34	108
Rayito Esperanza	116	337
Jardín del Norte	244	731
Villa El Sol	262	798
20 De Julio	65	217
Flor De Chile	74	248
Franja Esperanza	86	250
Los 33	28	78
Nuevo Amanecer Del Desierto	78	235
Sector 1	210	671
Villa Constancia II	37	111
18 de Septiembre II	24	69
Alto Las Cruces	38	113
Alto Mendoza	61	144
Altos De Sucre	23	74
Altos Del Salar	32	98
Arca de La Alianza	18	50
Arian Coni	26	79
Aurora Esperanza	207	548
Betzabet	47	157
Camino Al Futuro	82	231
Chilenos por un Sueño	37	90
Coloso	36	89
Familias Unidas	23	69
Fénix	75	199
Francis	49	132
Fuerza Esmeralda	16	52
Génesis II	210	546
Génesis I	23	59
Hijos de la Covadonga	86	320
Israel	73	245
Juanita Cruchaga	172	481
La Escuelita	50	131
La Negra	47	75
Mirador la Portada	76	212
Moisés	77	232

Campamentos	Hogares	Personas
Niños Felices	23	62
Parque Juan López	18	50
Quebrada Riquelme	39	129
René Schneider	94	284
Sol y Luna	78	200
Todos Luchando por un Sueño	25	83
Villa Constancia	80	220
Vista Hermosa	350	952
Mujeres Unidas	74	140
18 de Septiembre	55	55
La Flora	17	53
TOTAL COMUNA ANTOFAGASTA	5.781	16.362

3.4. ANÁLISIS DE EXPOSICIÓN A RIESGOS HIDROMETEOROLÓGICOS Y PROYECCIONES

3.4.1. Criterios de clasificación propuestos

En el contexto del presente estudio, se entiende por evento hidrometeorológico extremo aquél asociado a precipitaciones de mayor volumen de los que se tiene información en el pasado en Antofagasta.

Típicamente los referentes principales de episodios extremos son los eventos del 12 de junio de 1940 (56,7 mm) y 18 de junio de 1991 (42 mm) en Antofagasta, que aunque el primero fue seguido de un evento de menor volumen, 50 años después y el más reciente aún no se repite en 30 años, podría volver a ocurrir a futuro, con características similares o más severas por efecto del cambio climático, particularmente de corta duración y alta intensidad como ocurrió con el del año 1991.

Sobre la base de la información satelital y las imágenes históricas de Google Earth Pro, complementado con lo observado durante las visitas a terreno, es posible constatar la situación real de exposición al riesgo de los distintos grupos de viviendas de un campamento y así revisar las zonas mayormente expuestas, existiendo distintos grados de exposición al riesgo hidrometeorológico extremo, dependiendo de las características particulares de cada sector.

Una exposición a un muy bajo o nulo riesgo hidrometeorológico corresponde, en general, a aquel tipo de área aportante mínima en cuanto a superficie y menor pendiente, con suelo más permeable, asociado a cauces de menor importancia o superficies con flujos difusos, que pueda generar un flujo de poca magnitud o significancia.

En cambio, un área aportante mayor, con mayor pendiente y suelo rocoso o menos permeable, asociada a un sistema de drenaje de mayor importancia compuesto por cauces principales mayores, actuales o pasados (evidenciados en imágenes históricas, por ejemplo), puede denotar una condición de exposición al riesgo bajo o bien, mediano a alto según el emplazamiento y exposición de las viviendas a eventuales flujos.

Así, si las viviendas están construidas en cauces o sus proximidades o incluso al interior de obras de control aluvional, la exposición al riesgo será distinta si el área aportante es del primero o del segundo tipo de los descritos precedentemente.

Para analizar las distintas situaciones que se dan en la ciudad de Antofagasta, desde el punto de vista de la exposición de las viviendas y sus moradores a riesgos de naturaleza hidrometeorológica extrema, se propone los siguientes grados de exposición al riesgo.

- **MB-N:** Exposición al riesgo hidrometeorológico extremo, **Muy Bajo o Nulo** para viviendas que solo pueden verse afectadas por pequeños flujos de agua o anegamientos menores, sin experimentar mayores daños ni afectar la integridad física de los moradores.
- **B:** Exposición al riesgo hidrometeorológico extremo, **Bajo** para viviendas que se pueden ver expuestas a flujos algo mayores de agua o arrastre de sólidos y/o deslizamientos de tierra que podrían causar daños menores o medianos a ellas, recuperables sin costos mayores, y además sin riesgo evidente para la integridad física de sus integrantes.
- **M-A:** Exposición al riesgo hidrometeorológico extremo, **Mediano a Alto** donde las viviendas se aprecian claramente expuestas a flujos significativamente mayores de agua o arrastre de sólidos y/o deslizamientos de tierra que podrían causar daños importantes o severos a ellas, en gran medida de difícil recuperación, y además significar riesgos evidentes para la integridad física de sus integrantes.
- **MA:** Exposición al riesgo hidrometeorológico extremo, **Muy Alto** lo que implica consecuencias catastróficas para las viviendas y sus moradores al estar frontalmente expuestas a flujos de agua o arrastre de sólidos y/o deslizamientos de tierra de gran magnitud con tendencia a arrasar viviendas, estructuras u obstáculos a su paso, causando un gran desastre.
- **EX:** Exposición al riesgo hidrometeorológico, **Extremo** lo cual equivaldría a una devastación del área con pérdidas materiales y de vidas humanas extraordinariamente grave con consecuencias severas también para el entorno de las viviendas afectadas.

La clasificación anterior aplicada a definir grados de exposición de los asentamientos existentes hoy en zonas de riesgos de Antofagasta, con consecuencias como las descritas precedentemente, durante eventos hidrometeorológicos extremos, se basa en gran medida en una extrapolación de sucesos históricos más o menos recientes, conocidos.

Sin embargo, si el efecto del cambio climático se traduce en fenómenos hidrometeorológicos más intensos y violentos, cabría aumentar en un grado cada una de las categorías propuestas.

En el presente estudio se optó por mantener la clasificación sin efecto de cambio climático.

3.4.2. Resumen del análisis de la exposición al riesgo de los campamentos

El estudio de campamentos en zona de peligro identifica las condiciones de riesgo hidrometeorológicos que presentan los campamentos de la ciudad de Antofagasta.

Los principales riesgos se asocian al emplazamiento en sectores sujetos a remoción en masa, aluviones e inundaciones, producto de eventos meteorológicos extremos, que ocurren con muy baja frecuencia.

Desafortunadamente, las personas tienden a considerar que por años no existen manifestaciones riesgosas, por lo cual se exponen a condiciones de peligro al asentar sus viviendas en cursos de agua secos y en las laderas aparentemente estables por cuanto sus suelos también se encuentran secos por largo tiempo.

Es necesario recalcar que los eventos climatológicos extremos de Antofagasta son difíciles de prever, debido a las lluvias convectivas de la zona. Por este motivo, es posible que ocurran eventos extremos muy intensos que no hayan sido pronosticados con suficiente antelación y que deriven en catástrofes al no poder tomar anticipadamente medidas preventivas y/o de evacuación de personas y enseres de las zonas de peligro.

En la Tabla 3.2 se identifican parte de los campamentos y otros lugares habitados que presentan una condición de exposición al riesgo de fenómenos hidrometeorológicos extremos con el correspondiente grado de riesgo propuesto en el presente estudio.

El (*) que se ha incluido da cuenta que este grado de riesgo, como ha sido comentado, podría ser incrementado en la medida que el cambio climático aumente la intensidad magnitud de las lluvias y caudales con consecuencias más adversas que las que se conocen históricamente.

Tabla 3.2 Situación de riesgo por campamento

Sector	Nombre del campamento	Grado de riesgo *
Sector Norte - La Chimba	Sol Naciente	MB-N
	Luz Divina VI	B
	La Lucha es Posible	MB-N
	La Quebrada	MB-N
Sector centro norte (Bonilla)	Rayito Esperanza	MB-N
	Nuevo Amanecer Latino	MB-N
	Rayito de Sol	MB-N
	Jardín del Norte	MB-N
	El Bosque	MB-N
	Villa El Sol	MB-N
	Eulogio Gordo	MB-N
Sector Baquedano	Mujeres Unidas	MB-N
	Mujeres Unidas II	MB-N
	Villa Esperanza	MB-N
	Futuro Antofagasta	MB-N
	Mujeres Emprendedoras	MB-N

Sector	Nombre del campamento	Grado de riesgo *
	Pantaleón Cortés	MB-N
	Ecuachilepe	MB-N
	Un Techo para mi Gente Latina	MB-N
	América Unida	MB-N
	Irarrázaval Etapa I	MB-N
Sector Norte quebrada Farellones	Génesis	MB-N
	Génesis II	B
	Sol y Luna	MB-N
	Alto las Cruces	MB-N
	La Escuelita	B
	Campamento Nuevo	B
Sector Sur quebrada Farellones	Arian Coni	MB-N
	Juanita Cruchaga	M-A
Sector quebrada Salar del Carmen	Camino al Futuro	B
	Vista Hermosa	B
	Todos Luchando por un Sueño	MB-N
	18 de Septiembre	MB-N
	18 de Septiembre II	MB-N
Sector quebrada la Cadena y el Ancla	Niños Felices	B
	Arca de la Alianza	B
	Betzabet	B
	Israel	B
	Moisés	B
	Viviendas en Obras de Control aluvional	M-A
Sector René Schneider	René Schneider	MB-N
	Aurora Esperanza	M-A
	Quebrada Riquelme	B
	Campamento Nuevo	MB-N
Sector quebrada Baquedano	Chilenos por un Sueño	MB-N
	Altos de Sucre	MB-N
	Alto Mendoza	B
Sector quebrada Uribe - el Toro	Mirador la Portada	B
	Fénix	MB-N
	Villa Constancia II	B
	Villa Constancia	MB-N
	Franja Esperanza	MB-N
	Sector 1	MB-N
	Los 33	MB-N
20 de Julio	MB-N	

3.5. USOS DE SUELO, ÁREAS INUNDABLES Y POBLACIÓN EXPUESTAS A RIESGOS

En este capítulo se resume la recopilación, revisión, procesamiento y análisis de los antecedentes relacionados con los distintos usos de suelo definidos en la zonificación del PRC y PRI de la ciudad de Antofagasta, las áreas inundables por anegamiento y escurrimiento de aguas lluvias, y las zonas de riesgo de población expuesta a flujos aluvionales en las quebradas del piedemonte de la ciudad.

El detalle de estos temas se desarrolla en el Anexo IV. “Zonificación Urbana. Usos de Suelo, Áreas Inundables y Zonas de Asentamientos Humanos Expuestas a Riesgos Hidrometeorológicos”.

3.5.1. Usos de suelo

3.5.1.1. Plan Regulador Comunal

El Plan Regulador Comunal (PRC) vigente para la ciudad de Antofagasta que define el límite urbano de la ciudad y la zonificación de usos de suelo con fines urbanos fue aprobado el año 2001.

La zonificación del PRC plantea 5 macroáreas, que se listan a continuación:

- 1) Áreas consolidadas (C): 14 áreas que cuentan con urbanización completa.
- 2) Áreas de extensión urbana (U): 4 áreas externas a las anteriores, capaces de recibir el crecimiento en extensión previsto en el PRC.
- 3) Áreas especiales (E): 19 áreas planificadas con un objetivo especial, como las áreas verdes.
- 4) Áreas urbanizables de desarrollo condicionado (ZUDC): 9 áreas definidas como de insuficiente urbanización, requiriendo el desarrollo de estudios de impacto urbano para la aprobación de los proyectos.
- 5) Zona típica (ZT). 2 áreas definidas como típicas.
- 6) Zona de riesgo de catástrofe natural (ZR): 1 área definida.

Para cada una de las zonas se describe el perfil de uso permitido, distinguiendo entre residencial, industrial, agrícola, áreas verdes, etc. En la Figura 3.1 se muestra en color verde el polígono que define el área urbana de Antofagasta, junto con el área de estudio del proyecto.

Además, en PRC se define un total de 14 “sistemas aluviales urbanos”, a través de los cuales se evacúan las aguas provenientes de las quebradas que drenan hacia la ciudad, los que se componen de 3 elementos básicos: un embudo superior, avenida aluvial y desembocadura.

En las Figura 3.2, Figura 3.3 y Figura 3.4 se muestran las vías aluviales entre las quebradas Bonilla y El Ancla entre las quebradas Riquelme y la Negra, y entre las quebradas la Negra y El Huáscar, respectivamente.

Cabe destacar que el plan regulador vigente no incluye las quebradas La Chimba, Club Hípico y la quebrada Las Rocas ubicadas en el sector norte de Antofagasta ni la quebrada Roca Roja en el sur de la ciudad.

Figura 3.1 Límite urbano según Plan regulador de Antofagasta y área de estudio



Figura 3.2 Vías aluviales entre quebrada Bonilla y quebrada El Ancla

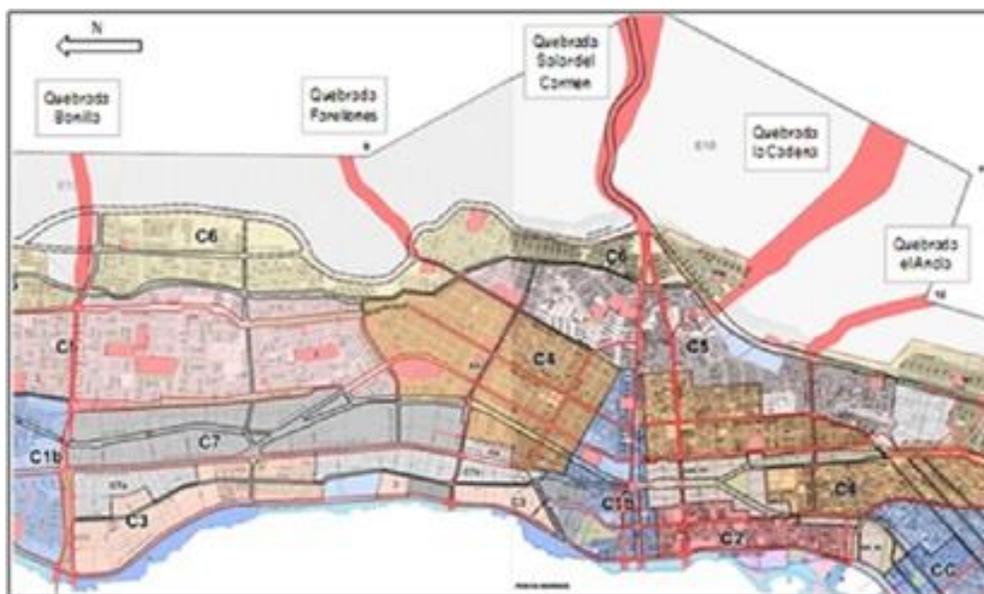


Figura 3.3 Vías aluviales entre quebrada Riquelme y quebrada La Negra

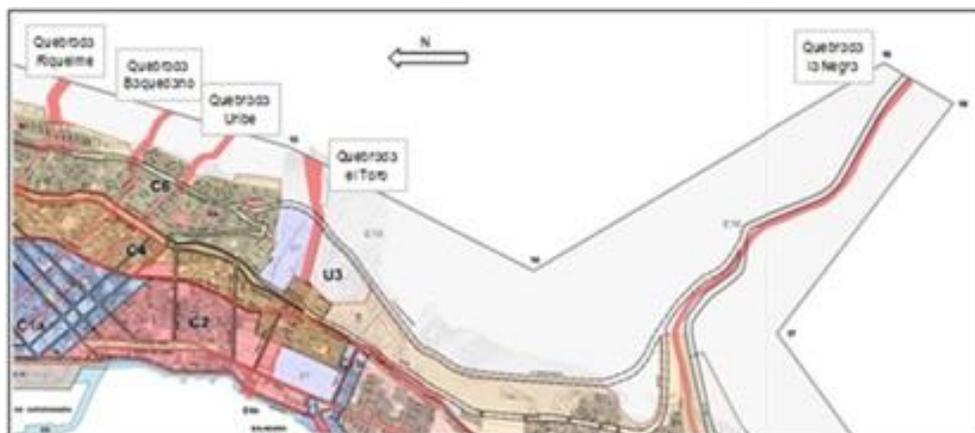
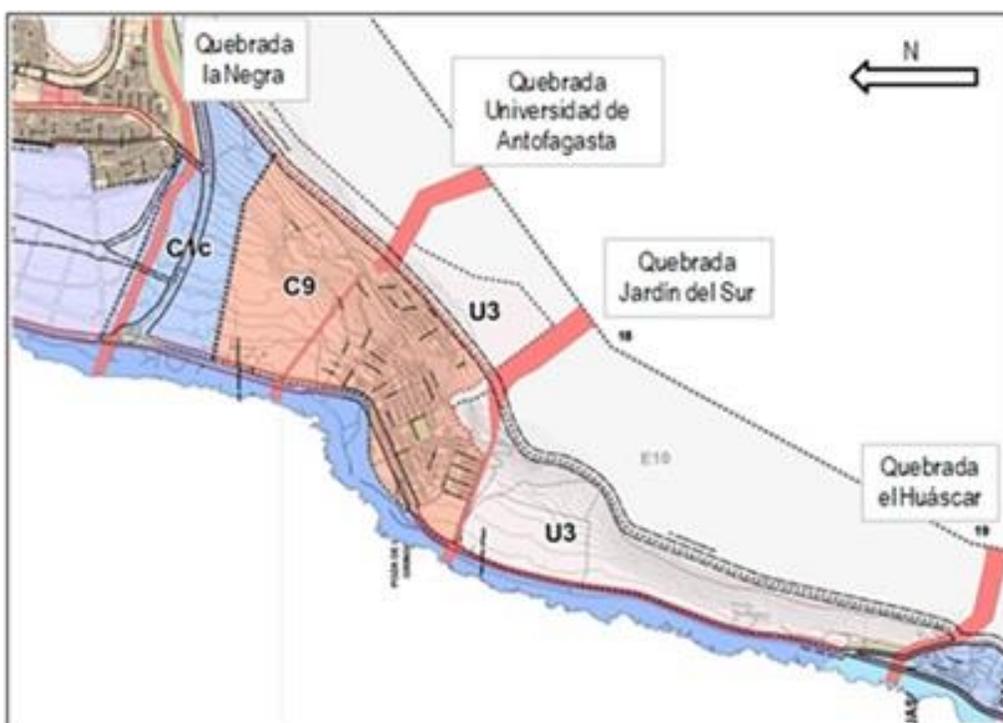


Figura 3.4 Vías aluviales entre quebrada La Negra y quebrada Huáscar



3.5.1.2. Modificaciones al plan regulador

El plan regulador vigente ha sufrido modificaciones en los años 2012, 2014 y 2018, de las cuales las dos primeras obedecieron a un reordenamiento de la zona norte de Antofagasta, dado que el crecimiento urbano se ha producido hacia esta dirección.

En estas modificaciones se han eliminado ciertas zonas definidas previamente y reemplazándolas por una serie de zonas centro y subcentro, residenciales, mixtas, de equipamiento, especiales de protección, restringidas y áreas de utilidad pública como áreas verdes, plazas y parques.

Las modificaciones aprobadas en el año 2018 obedecen a un cambio puntual de la zona ZM2 en el sector de la Chimba para compatibilizar la presencia de una planta desalinizadora ubicada en dicho lugar, mientras que la segunda corresponde a la aprobación del proyecto de modificación de la zonificación definida PRC con el objetivo de incorporar criterios de desarrollo sustentable en una nueva zonificación. Este proyecto de modificación se encontraba en etapa de diseño y elaboración en el momento que se aprobó el decreto municipal.

3.5.1.3. Áreas verdes

A partir de la zonificación definida PRC vigente para Antofagasta y sus modificaciones se identificaron las áreas designadas a áreas verdes, plazas, parques o afines, cuya denominación y descripción muestra en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3 Denominación de las áreas verdes y de utilidad pública según PRC de Antofagasta

Zona	Descripción
E3b	Áreas Verdes
AV-PU	Áreas verdes vecinales y de utilidad pública
PJL	Parque Comunal Juan López
PULCH	Parque Urbano la Chimba
ZAV	Zona de área verde

A partir de la información consultada de los instrumentos de planificación mencionados se realizó la zonificación de las áreas verdes y afines, en función de la destinación estipulada en el plan regulador vigente y la medición de su superficie, para áreas verdes, plazas y otros usos de utilidad pública junto con la ubicación respecto a las quebradas que drenan hacia la ciudad de Antofagasta.

En los planos adjuntos a este informe se ha graficado cada una de las zonas identificadas, determinando junto ello, la superficie asociada a cada una de ellas.

3.5.2. Áreas inundables

Se realizó una zonificación de las áreas inundables y las zonas de flujo de aguas lluvias en la ciudad de Antofagasta, considerando la información recabada durante la elaboración el PM-26 y la incorporación de información de los eventos hidrometeorológicos posteriores a dicho proyecto.

3.5.2.1. Zonificación de áreas de inundación

En función de la información revisada del PM-26 y la información recabada de la prensa para considerar los eventos ocurridos posteriores a ese proyecto, se generó una zonificación con las áreas con problemas de inundación dentro del área de estudio. En la Tabla 3.4 se resume la zonificación planteada, indicando la ubicación de las áreas, junto con una estimación de la superficie

afectada. En los planos que acompañan este informe se detalla la información relacionada con la ubicación de cada área identificada en la zonificación de los sectores con problemas de inundación.

Tabla 3.4 Zonificación de áreas de inundación

Zona	Ubicación	Área (m ²)
ZA-1	Calle Las Golondrinas desde Chamiza hasta los Tamarugos	37.168
ZA-2	Avda. Gran Avenida desde Avda. Irrázaval hasta A. Molina	13.558
ZA-3	Avda. Gran Avenida desde San Francisco hasta Vitacura	11.517
ZA-4	Avda. E. Pérez Zujovic desde Ongolmo hasta Cobija	32.782
ZA-5	Avda. E. Pérez Zujovic esquina Diagonal	10.658
ZA-6	Avda. E. Pérez Zujovic entre Quito y Centeno	18.594
ZA-7	Calle Iquique esquina Río Janeiro	2.827
ZA-8	Calle Aníbal Pinto con Zenteno	9.682
ZA-9	Avda. Séptimo de línea desde Calicanto hasta Bolívar	25.076
ZA-10	Avda. Circunvalación desde Ing. Mutilla hasta Ecuador	37.168
ZA-11	Calle Sucre con Washington	2.827
ZA-12	Avda. Balmaceda desde Baquedano hasta Uribe	18.969
ZA-13	Calle Baquedano con Latorre	2.827
ZA-14	Calle Baquedano con Condell	2.827
ZA-15	Calle Baquedano con Ossa	2.827
ZA-16	Avda. Grecia desde A. Matta hasta Aconcagua	18.969
ZA-17	Avda. Grecia con Salvador Reyes	8.702
ZA-18	Sector comprendido por Avda. Bernardo O'Higgins; Avda. José Miguel Carrera calle Salvador Reyes, calle General Velásquez	29.946
ZA-19	Avenida Angamos con Los Inmigrantes.	5.923
ZA-20	Avenida Miramar entre Riquelme y Chuquisaca	14.106
ZA-21	Calle Orella con pasaje Miramar	2.827
ZA-22	Calle Diego de Almagro y Pasaje Colón con S. Allende	8.433
ZA-23	Calle Tarapacá con Arica	2.827
ZA-24	Calle Loa entre Taltal y Peñuelas	12.888
ZA-25	Calle Valdivia entre Paihuano y Huasco	2.827
ZA-26	Pasaje Puerto Montt con calle Rancagua	2.827
ZA-27	Pasaje Quechurehue con Isabel Riquelme	9.487
ZA-28	Calle Teatinos entre San Miguel y San Francisco	4.272
ZA-29	Pantaleón Cortés y Manuel Thompson	2.827
ZA-30	Héroes de la Concepción entre Pérez Canto y Vladimir Saavedra	26.718
ZA-31	E. Pérez Zujovic entre los Tamarugos y Los Cerezos	14.011
ZA-32	Padre Hurtado entre Manutera y Huenchaca	8.967
ZA-33	Calle Panamá con Huérfanos	2.827
ZA-34	Calle Alfonso Meléndez con Esperanza	2.827
ZA-35	Calle Armando Mook	5.708
ZA-36	E. Orchard entre Borgoño y Talca	2.827
ZA-37	Av. Antihue, (Villa Imilac)	5.708
ZA-38	Pasajes Tucapel, Talcahuano, Vergara	19.420

Zona	Ubicación	Área (m ²)
ZA-39	Magallanes con El Olivar	2.827
ZA-40	Claudio Godoy con La Feria	3.654
ZA-41	Calle Rendic, Pje. Coloso, Pje. Mar de Chile, Pje. Loa, Pje. Azapa. Pje. Isabel La Católica	13.788
ZA-42	Pje. Quinta Normal, Pje. Recoleta	11.492
ZA-43	Clodomiro Rozas, Emilio Correa	19.839
ZA-44	Avda. Los Chungungos y Mario Silva	2.500
ZA-45	Campamento Luz Divina	16.764
ZA-46	Campamentos Juanita Cruchaga y Arian Coni	36.402
ZA-47	Campamento René Schneider	24.856

3.5.2.2. Zonificación de flujo de aguas lluvias

La Tabla 3.5 consigna la zonificación de flujos de aguas lluvias propuesta, las calles que considera y el sistema aluvial asociado según el PRC. Cabe mencionar que las quebradas la Chimba, Club Hípico y Roca Roja no cuentan con un “sistema aluvial” definido en el PRC vigente desde el año 2001. Además, para la zonificación propuesta se modificó la ubicación de la descarga asociada a la quebrada Jardín del Sur, dado que con la materialización de las obras de control aluvional sobre dicho cauce se cambió dicho punto de descarga.

En los planos que acompañan este informe se detalla la información relacionada con la ubicación de cada zona de flujo de aguas lluvias identificada en los distintos sectores de la ciudad.

Tabla 3.5 Zonificación de flujo de aguas lluvias propuesta

I Zona	Calle	Tramo entre calles	“Sistema aluvial”
ZF-01	Patricio Infante	Desde su inicio hasta Héroes de la Concepción	Quebrada la Chimba
	Quebrada La Chimba	Entre Héroes de la Concepción y Sierra Nevada	Quebrada la Chimba
	Quebrada la Chimba norte	Entre Sierra Nevada hasta Av. Pedro Aguirre Cerda	Quebrada la Chimba
ZF-02	Oficina Bonasort	Toda su extensión	Quebrada la Chimba
	Av. Pérez Canto	Toda su extensión	Quebrada Club Hípico
	Chacalluta	Entre Pérez Canto y Av. E. Pérez Zujovic	Quebrada Club Hípico
ZF-03	Río Lauca	Toda su extensión	Quebrada Club Hípico
	Nicolás Tirado	Oscar Bonilla y Avda. Costanera	Quebrada Bonilla
ZF-04	Avenida Costanera	Los Pimientos y Nicolás Tirado	Quebrada Bonilla
ZF-05	Los Pimientos	Avda. Pedro Aguirre Cerda y Avda. Costanera	Quebrada Bonilla
	Puerto Natales	Avda. Circunvalación Norte y Huasco	Quebrada Farellones
ZF-06	Huasco	Puerto Natales y Loca	Quebrada Farellones
	Paraguay	Loa y E. Pérez Zujovic	Quebrada Salar del Carmen
	Avda. Salvador Allende	Paraguay y Loa	Quebrada Salar del Carmen
ZF-07	Calama	Loa y Avda. E. Pérez Zujovic	Quebrada Salar del Carmen
ZF-08	Arica	Paraguay y Loa	Quebrada Salar del Carmen
	Avda. Paraguay	Av. Salvador Allende y Sarmiento	Quebrada La Cadena
ZF-09	Quito	Av. Jerusalén y Sarmiento	Quebrada La Cadena
	Buenos Aires	Avda. Circunvalación e Iquique	Quebrada el Ancla
	Iquique	Buenos Aires y Zenteno	Quebrada el Ancla
	Zenteno	Iquique y Aníbal Pinto	Quebrada el Ancla

I Zona	Calle	Tramo entre calles	“Sistema aluvial”
ZF-10	Avda. Martín Luther King	Covadonga y Esmeralda	Quebrada Riquelme
	Covadonga	Avda. Martín Luther King y Avda. M. A. Matta	Quebrada Riquelme
	Avda. Alfonso Meléndez	Covadonga y Esmeralda	Quebrada Riquelme
	Avda. Circunvalación	Calle Ecuador y su prolongación al sur	Quebrada Riquelme
	Avda. Andrés Sabella	Méndez y Covadonga	Quebrada Riquelme
ZF-11	Baquedano	Andrés Sabella y Balmaceda	Quebrada Baquedano
ZF-12	Uribe	Avda. Circunvalación y Andrés Sabella	Quebrada Uribe
	Uribe	Manuel Rodríguez y Balmaceda	Quebrada Uribe
ZF-13	Bulnes	En toda su extensión	Quebrada el Toro
	General Borgoño	En toda su extensión	Quebrada el Toro
ZF-14	Club Hípico	Avda. Argentina y Avda. Ejército	Quebrada el Caliche
ZF-15	Avenida Ejército	Intersección con Ruta 26	Quebrada la Negra
ZF-16	Avenida la Escondida	Catalina Massot y Los Aymaras	Quebrada Universidad de Antofagasta
ZF-17	Pasaje SN entre Subida del Sur y Valle Nortino	En toda su extensión	Quebrada Jardín del Sur
ZF-18	Norberto Escobar	En toda su extensión	Quebrada el Huáscar
ZF-19	Ruta B-510	En intersección con la Ruta 1	Quebrada Roca Roja

3.5.3. Identificación de zonas pobladas expuestas a riesgos de inundaciones y flujos

Los principales riesgos relacionados con eventos hidrometeorológicos extremos, corresponden a las inundaciones y los flujos aluvionales que se dan en la ciudad dada sus particulares características geomorfológicas, y tipología de los eventos que ocurren en la ciudad.

Asociados con los anteriores, también se consideraron riesgos asociados a fenómenos que genéricamente se denominan “de remoción en masa”, los que incluyen los flujos de detritos y corrientes de barro llamados genéricamente “aluviones”, dada la ocurrencia de este tipo de fenómenos en el pasado.

A partir de esta información se generó una zonificación para identificar gráficamente las áreas donde la población se encuentra expuesta a los distintos riesgos mencionados antes, correspondiendo estas a los campamentos emplazados en el sector oriente de la ciudad.

Se asignaron 3 niveles de exposición al riesgo: muy bajo a nulo (MB-N), bajo (B) y mediano a alto (M-A), en base a un análisis cualitativo que consideró factores como cercanía al cauce de una quebrada, pendiente de las laderas adyacentes a los asentamientos, etc.

En la Tabla 3.6 se resume la información de los campamentos identificados en la zonificación, junto con el nivel de riesgo al que están expuestos.

Cabe destacar que la mayoría de los campamentos identificados cuentan con un nivel de exposición al riesgo muy bajo a nulo, mientras que solo 3 de ellos se les consideró con una exposición mediana a alta (Juanita Cruchaga, Aurora Esperanza y las viviendas ubicadas en las obras de control aluvional).

Tabla 3.6 Zonificación de población expuesta a riesgos hidrometeorológicos en área estudio

ID	Campamento	Nivel de Riesgo	ID	Campamento	Nivel de Riesgo
ZR-1	Sol Naciente	MB-N	ZR-29	Juanita Cruchaga	M-A
ZR-2	Luz Divina VI	B	ZR-30	Camino al Futuro	B
ZR-3	La Lucha es Posible	MB-N	ZR-31	Vista Hermosa	B
ZR-4	La Quebrada	MB-N	ZR-32	Todos Luchando por un Sueño	MB-N
ZR-5	Rayito Esperanza	MB-N	ZR-33	18 de Septiembre	MB-N
ZR-6	Nuevo Amanecer Latino	MB-N	ZR-34	18 de Septiembre II	MB-N
ZR-7	Rayito de Sol	MB-N	ZR-35	Niños Felices	B
ZR-8	Jardín del Norte	MB-N	ZR-36	Arca de la Alianza	B
ZR-9	El Bosque	MB-N	ZR-37	Betzabet	B
ZR-10	Villa El Sol	MB-N	ZR-38	Israel	B
ZR-11	Eulogio Gordo	MB-N	ZR-39	Moisés	B
ZR-12	Mujeres Unidas	MB-N	ZR-40	Viviendas en Obras de Control aluvional	M-A
ZR-13	Mujeres Unidas II	MB-N	ZR-41	René Schneider	MB-N
ZR-14	Villa Esperanza	MB-N	ZR-42	Aurora Esperanza	M-A
ZR-15	Futuro Antofagasta	MB-N	ZR-43	Quebrada Riquelme	B
ZR-16	Mujeres Emprendedoras	MB-N	ZR-44	Campamento Nuevo	MB-N
ZR-17	Pantaleón Cortés	MB-N	ZR-45	Chilenos por un Sueño	MB-N
ZR-18	Ecuachilepe	MB-N	ZR-46	Altos de Sucre	MB-N
ZR-19	Un Techo para mi Gente Latina	MB-N	ZR-47	Alto Mendoza	B
ZR-20	América Unida	MB-N	ZR-48	Mirador la Portada	B
ZR-21	Irrarázaval Etapa I	MB-N	ZR-49	Fénix	MB-N
ZR-22	Génesis	MB-N	ZR-50	Villa Constancia II	B
ZR-23	Génesis II	B	ZR-51	Villa Constancia	MB-N
ZR-24	Sol y Luna	MB-N	ZR-52	Franja Esperanza	MB-N
ZR-25	Alto las Cruces	MB-N	ZR-53	Sector 1	MB-N
ZR-26	La Escuelita	B	ZR-54	Los 33	MB-N
ZR-27	Campamento Nuevo	B	ZR-55	20 de Julio	MB-N
ZR-28	Arian Coni	MB-N			

4. INFORMACION DE INFRAESTRUCTURA DE SERVICIOS EN EL ÁREA DE ESTUDIO

En el Anexo III “Infraestructura de Servicios Básicos en el Área de Estudio” del presente informe, se describe la recopilación y revisión de los antecedentes relacionados con la infraestructura de servicios básicos existentes en la ciudad de Antofagasta, como lo son las redes de agua potable y aguas servidas, tendido eléctrico, vialidad, etc., que resultan de interés para definir la viabilidad de las obras de aguas lluvias propuestas en la actualización del Plan Maestro de Aguas Lluvias de Antofagasta.

4.1. REDES DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE Y REDES DE AGUAS SERVIDAS

La información de las redes sanitarias analizadas fue obtenida de la empresa Aguas Antofagasta.

La red de agua potable cubre de norte a sur la ciudad, teniendo una extensión mayor a la de la red primaria de aguas lluvias, propuesta en el PM-26.

Por su parte, la red de recolección de aguas servidas tiene cobertura más limitada en comparación con la anterior, abarcando desde el sector de la quebrada la Chimba hasta el sector de la quebrada Huáscar, quedando el sector de Roca Roja fuera del área cubierta por la empresa sanitaria.

Para la presentación de la información de la red de agua potable, se compararon los trazados de las redes de distribución de agua potable con los 21 sistemas de drenaje y evacuación de aguas lluvias definidos para el PM-26, destacando en que sectores se producirían eventuales coincidencias de los trazados. De manera paralela se realizó una comparación análoga a la anterior respecto a las redes de recolección de aguas servidas.

4.2. RED DE AGUAS LLUVIAS EXISTENTE

Como se ha señalado antes, durante la visita de reconocimiento a terreno la red de aguas lluvias existente en la ciudad, se constató que los únicos sistemas colectores de aguas lluvias construidos a la fecha, corresponden al del sector Salar del Carmen, a lo largo de la Avenida Salvador Allende, y a la descarga del colector La Negra, que atraviesa la Ruta 1 y la Ruta 28 (Anexo V).

Por su parte, algunas de las obras de control aluvional ya construidas a lo largo de la ciudad consideraron obras de descarga que en algunos casos coinciden con los sistemas colectores propuestos en el PM-26 y en otros casos deben hacerse modificaciones para asegurar la adecuada evacuación del escurrimiento proveniente de las quebradas hacia su descarga en el mar.

4.3. RED DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA

Según la información recopilada de la superintendencia de electricidad y combustibles (SEC), se tiene que Antofagasta presenta tendidos eléctricos solo mediante postes ubicados en toda la ciudad. Sin embargo, a partir de la misma fuente se detecta la presencia de cámaras de inspección subterráneas en ciertos sectores y avenidas de la ciudad, las que se concentran mayoritariamente en el sector Norte de la ciudad, lo que se atribuye a la expansión urbana en esa dirección.

De acuerdo a la sectorización adoptada en el presente estudio, los sectores donde se observa la presencia de estas cámaras se describen a continuación.

- En el sector de la Chimba se detecta la presencia de cámaras de inspección subterráneas a lo largo de la Avenida Pedro Aguirre Cerda.
- En el lado poniente del sector La Roca se detecta también la presencia de cámaras de inspección de redes subterráneas.
- En el sector de Farellones también se nota la presencia de trazados subterráneos a lo largo de la Avenida Pedro Aguirre Cerda, al igual que en la Chimba.
- Más al sur en el área de estudio, se observa también la presencia de cámaras subterráneas en el sector del Ancla, más específicamente en la Avenida Cardenal Carlos Oviedo Cavada como en la Avenida Edmundo Pérez Zujovic.

- Finalmente, en los sectores de Riquelme y Balmaceda se observa la misma situación descrita antes, asumiendo la presencia de redes subterráneas de electricidad.

4.4. GASODUCTOS

Se efectuó una solicitud a la Superintendencia de Electricidad y Combustibles (SEC) acerca de información sobre gasoductos construidos en la ciudad de Antofagasta, de la cual no se obtuvo respuesta.

Por otro lado, al indagar en el sitio de la Comisión Nacional de Energía (CNE) y su visor de sistemas de distribución de gas a lo largo del territorio nacional, se constató que la distribución de gas en la ciudad de Antofagasta se realiza mediante gas licuado (GLP) y no mediante gas natural (GN9300).

4.5. VIALIDAD ESTRUCTURANTE

Se revisaron los antecedentes relacionados con la vialidad proyectada de la ciudad de Antofagasta establecida en el Plan Regulador Comunal Vigente, que fue descrito y analizado en el Anexo IV.

De las vías declaradas como estructurantes de Antofagasta, en la actualidad falta la construcción de las Avenidas Circunvalación Norte y Avenida Circunvalación Sur, las que se ubican en la zona oriente de la Ciudad. Al sumar Las Avenidas Circunvalación norte y sur estipuladas en el PRC vigente se tiene una vía de longitud total 27 km.

Desde el SERVIU de la región de Antofagasta se obtuvieron los planos del estudio de ingeniería de la Avenida Circunvalación del año 2017, en el cual no existe la separación entre los tramos norte y sur. La longitud total de la vía es de 21,2 km, iniciándose su trazado en la Ruta 28 y finalizando al intersectar la Ruta 1.

En dicho proyecto se considera el atraveso de las quebradas y las obras de control aluvional proyectadas y construidas a lo largo de la ciudad. Los únicos colectores que son interceptados por el trazado de esta vía estructurante de la ciudad de Antofagasta corresponden a La Chimba, Salar del Carmen, La Cadena, Riquelme, Uribe y Caliche.

5. ACTIVIDADES DE TERRENO

5.1. RECONOCIMIENTO DE TERRENO

El Anexo V “Visita de Reconocimiento de Terreno” detalla todos los antecedentes recopilados en terreno durante las visitas al área de estudio que se resumen a continuación.

Las visitas a terreno se focalizaron en el reconocimiento de las condiciones actuales del terreno, y en obtener información para apoyar la revisión y validación de los antecedentes, tomando conocimiento de características tales como topografía, morfología de los cauces y quebradas existentes, infraestructura existente, información con respecto a población formal e informal en la zona del estudio y zonas de riesgo, etc.

5.1.1. Quebradas N1 y N2

Estas quebradas se sitúan en el extremo norte de la zona de estudio.

En la quebrada N1 el cauce principal alberga parte del camino de acceso, para finalmente abrirse y desaparecer como flujo difuso en la llanura, constituida por un suelo arenoso fino constatándose que aguas abajo del punto de descarga existe un loteo de instalaciones semi-industriales que pudiesen verse afectadas por flujos difusos que pudieran bajar por la llanura.

La imagen satelital de la Figura 5.1 ilustra con flechas amarillas el sentido del flujo de la quebrada hacia su descarga.

Figura 5.1 Imagen satelital de los flujos principales de la quebrada N1



Por su parte la quebrada N2 que se ubica al sur de la anterior, cuenta con una gran cantidad de casas e instalaciones, algunas en condiciones bastante precarias, posiblemente en situación irregular (tomas de terreno), emplazadas en la ladera de gran pendiente, sin aparentemente contar con servicios básicos y según DOH de muy reciente data.

La Figura 5.2 muestra una imagen satelital de la quebrada N2 con los flujos principales señalados mediante flechas amarillas que bajan por un cauce para luego abrirse en un abanico.

Figura 5.2 Imagen satelital de los flujos principales de la quebrada N2



5.1.2. Quebrada La Chimba

La quebrada se enmarca principalmente en el sector de la Reserva Nacional La Chimba, con acceso restringido a vehículos, posee una excavación realizada para control aluvional y se compone de 2 brazos principales. La Figura 5.3 muestra una imagen satelital de la quebrada La Chimba en su trayecto final hacia la ciudad.

Figura 5.3 Imagen satelital de los flujos principales de la quebrada La Chimba



5.1.3. Quebrada La Roca¹

El cauce de la quebrada y la cuenca se muestra en la imagen satelital de la Figura 5.4.

Figura 5.4 Imagen satelital de los flujos principales de la quebrada La Roca



Según información de la DOH, la quebrada no cuenta actualmente con obras de control aluvional. Durante la visita se observó que originalmente la quebrada bajaba directamente por la calle Pablo Neruda, pero posteriormente el cauce fue desviado hacia el norte. En el extremo superior de la calle se construyeron algunos muros de protección de las viviendas. El curso de agua desviado finalmente se pierde en la explanada del costado norte de esta calle.

5.1.4. Quebrada Club Hípico

Inmediatamente al sur de la quebrada La Roca se desarrolla la quebrada Club Hípico, la que descarga en el sector de calles Hilda Cruz Colina y pasaje Mamalluca, para continuar por calle Chungungo. Según lo indicado por DOH, la quebrada no cuenta con obras de protección aluvional.

La Figura 5.5 muestra una imagen satelital de la quebrada con flechas de color amarillo que permiten visualizar la dirección y sentido de sus principales flujos.

¹ Se mantuvo esta denominación de la quebrada en atención a que ella se usó en el PM-26 y también aparece con ese nombre en el PRC de Antofagasta

Figura 5.5 Imagen satelital de los flujos principales de la quebrada Club Hípico



5.1.5. Quebrada Bonilla

La quebrada Bonilla se compone de dos brazos que se unen en un cauce único con descarga de directa a la calle Guardiamarina Arturo Fernández continuando por la Avda. Nicolás Tirado.

En la Figura 5.6 se muestra una imagen satelital de la quebrada con flechas de color amarillo que permiten visualizar la dirección y sentido de sus principales flujos en los brazos mencionados y en el brazo principal después de la confluencia.

La cuenca no cuenta actualmente con obras de control aluvional, sin embargo, se encuentra en desarrollo el estudio de actualización de diseño de obras de control aluvional en dicha quebrada.

La foto anterior muestra el camino habilitado para la construcción de la subestación eléctrica y que también es usado por los vehículos y maquinarias que transitan hacia el cono de deyección del brazo sur donde actualmente se desarrolla una intensa actividad extractiva de áridos.

Figura 5.6 Imagen satelital de los flujos principales de la quebrada Bonilla



5.1.6. Quebrada Farellones

La Figura 5.7 muestra una imagen satelital de la quebrada con flechas de color amarillo que permiten visualizar la dirección y sentido de sus principales flujos, y su descarga directa en calle Circunvalación, continuando por calle Puerto Natales, ambas contando con muros de protección laterales.

Esta quebrada posee 3 brazos principales y cuenta con obras de control aluvional recientemente construidas como se aprecia en la foto de la Figura 5.8 para dos brazos.

Figura 5.7 Imagen satelital de los flujos principales de la quebrada Farellones



Figura 5.8 Muros estabilizadores y rápidos de descarga de pozas de la quebrada Farellones



5.1.7. Quebrada Salar del Carmen

La Figura 5.9 muestra una imagen satelital de la quebrada con flechas de color amarillo que permiten visualizar la dirección y sentido de sus principales flujos, mientras que la Figura 5.10 corresponde a una foto que permite visualizar las obras de control aluvional sobre la quebrada.

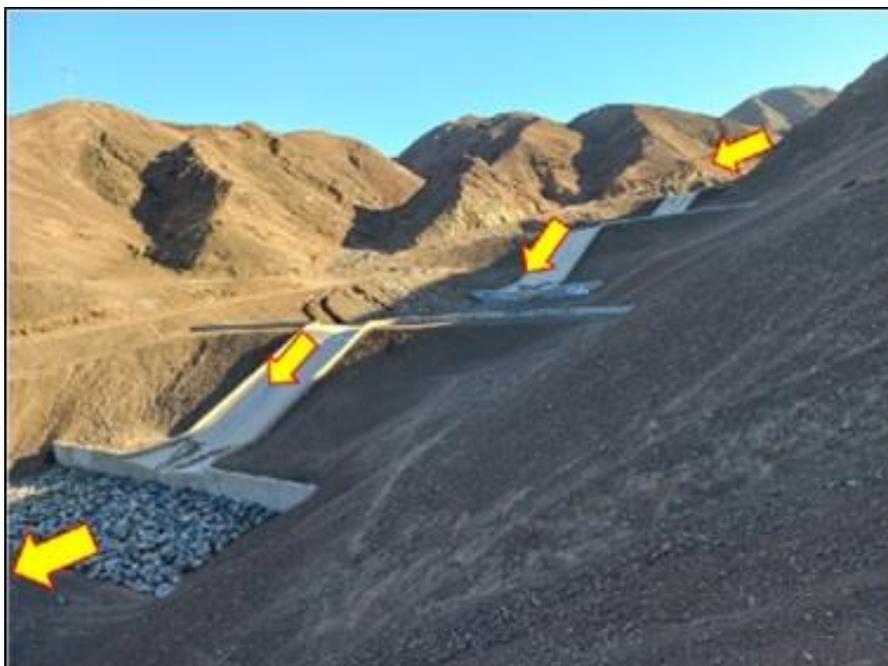
Como parte de la solución de la evacuación de las aguas de la quebrada, en el PM-26 se proyectó un colector por Avda. Salvador Allende para conducir las aguas de esta quebrada al mar, recibiendo también los aportes del colector proyectado que evacúa las aguas de la quebrada La Cadena.

La obra de captación del colector, así como las obras de control aluvionales, se encuentran construidas a ambos costados de la Carretera N°26 (acceso a Antofagasta), aguas arriba del inicio de la Av. Salvador Allende.

Figura 5.9 Imagen satelital de la quebrada Salar del Carmen y obras aluvionales



Figura 5.10 Obras de control aluvional de la quebrada Salar del Carmen



5.1.8. Quebrada La Cadena

La quebrada cuenta con una serie de obras de control aluvional construidas en todos sus afluentes y en el punto de descarga en la calle Quito existen muros de protección lateral, que permiten controlar posibles desbordes hacia viviendas.

La Figura 5.11 muestra una imagen satelital de la quebrada con flechas de color amarillo que permiten visualizar la dirección y sentido de sus principales flujos.

Figura 5.11 Imagen satelital de los flujos principales de la quebrada La Cadena



Durante el recorrido de terreno, se visitaron las obras de control aluvional construidas y el punto de descarga en la calle Quito. Debido al libre tránsito de vehículos por el camino de servicio de las obras, las pozas de decantación se han transformado en vertederos de basura, como lo ilustra la Figura 5.12.

Figura 5.12 Uso de las pozas de decantación como basural (vista hacia aguas abajo)



5.1.9. Quebrada El Ancla

La quebrada cuenta con obras de control aluvional construidas en ambos brazos, los que se juntan en una obra de captación de un colector que cruza bajo la Avda. Padre Alberto Hurtado y que cae directamente a la calle Buenos Aires. En la obra disipadora aguas arriba del atraveso de la Avda. Padre Hurtado, se observa la acumulación de basuras.

La Figura 5.13 muestra una imagen satelital de la quebrada con flechas de color amarillo que permiten visualizar la dirección y sentido de sus principales flujos, en tanto en la Figura 5.14 y Figura 5.15 incluyen fotos de la obra de cruce bajo la Avda. Padre Hurtado que descarga directamente a la calle Buenos Aires.

Figura 5.13 Imagen satelital de los flujos principales de la quebrada El Ancla



Figura 5.14 Obra disipadora y entrada a alcantarilla de cruce de la Avda. Padre Hurtado



Figura 5.15 Obra de descarga de la quebrada El Ancla en calle Buenos Aires



5.1.10. Quebrada Schneider

Durante la visita, la DOH planteó la necesidad de evaluar esta quebrada, debido a que presenta riesgos para la población instalada irregularmente en la zona, sin que sea clara la vía de evacuación de los flujos que puedan presentarse.

La Figura 5.16 muestra una imagen satelital de la quebrada con flechas de color amarillo que permiten visualizar la dirección y sentido de sus principales flujos, con viviendas ubicadas en la ladera, que podrían estar más directamente expuestas a riesgos por flujos o desprendimientos de las laderas colindantes.

Figura 5.16 Imagen satelital de los flujos principales de la quebrada Schneider



5.1.11. Quebrada Riquelme

La Figura 5.17 muestra una imagen satelital de la quebrada con flechas de color amarillo que permiten visualizar la dirección y sentido de sus principales flujos.

Figura 5.17 Imagen satelital de los flujos principales de la quebrada Riquelme



En esta quebrada se construyeron recientemente las obras de control aluvial consistentes en muros estabilizadores de pendiente y canales colectores y una obra disipadora, como muestra la Figura 5.18, con salida a un canal con gradas de bajada que descarga a la calle Teniente Ernesto Riquelme.

Figura 5.18 Batería de muros estabilizadores y a la derecha viviendas irregulares



En el entorno de las obras se han instalado viviendas irregulares y hacia el sur, el muro tipo guardarradier construido para contener el flujo difuso de la ladera e interceptarlo mediante un canal colector conectado al canal de descarga de la obra disipadora paralelo a calle Martin Luther King, fue ocupado por viviendas.

5.1.12. Quebrada Baquedano

La Figura 5.19 muestra una imagen satelital de la quebrada con flechas de color amarillo que permiten visualizar la dirección y sentido de sus flujos en dos brazos, en los cuales se construyó una batería de muros estabilizadores. Como lo muestra la Figura 5.20, estas obras descargan directamente al lecho móvil aguas abajo de la confluencia, sin ningún tipo de obra de control aluvional, lo que conlleva el peligro que este lecho móvil se socave y obstruya la descarga, lo cual se ve agravado por la instalación irregular de viviendas precarias en ambas ramas.

La descarga de la quebrada se realiza mediante un colector, alrededor del cual se han construido viviendas, que cruza bajo la Av. Padre Alberto Hurtado y continúa por un total de 120 m, hasta descargar más abajo en la continuación del cauce donde se aprecia abundante basura.

Figura 5.19 Imagen satelital de los flujos principales de la quebrada Baquedano



Figura 5.20 Acumulación de basura aguas abajo del colector de la quebrada Baquedano



5.1.13. Quebrada Uribe

La Figura 5.21 muestra una imagen satelital de la quebrada con flechas de color amarillo que permiten visualizar la dirección y sentido de sus principales flujos, para los cuales se ha construido un conjunto de muros estabilizadores de pendiente que terminan en un vertedero y rápido que finalmente descarga sus aguas a un pozón de acumulación, delimitada por aguas abajo por medio de un vertedero que entrega las aguas hacia calle Uribe, según se observa en la Figura 5.22.

Figura 5.21 Imagen satelital de los flujos principales de la quebrada Uribe



Figura 5.22 Obras de acumulación y descarga del flujo a calle Uribe



5.1.14. Quebrada El Toro

La Figura 5.23 muestra una imagen satelital de la quebrada con flechas de color amarillo que permiten visualizar la dirección y sentido de sus principales flujos, para cuyo control recientemente se construyó una batería de pozas de decantación que terminan en un canal evacuador, a continuación del cual continúa la calle Manuel Bulnes. Dado que estas obras están recién terminadas, en la actualidad (noviembre 2021) se encuentran aún limpias y no han sido empleadas para el emplazamiento de nuevas viviendas irregulares. La Figura 5.24 permite visualizar la situación.

Figura 5.23 Imagen satelital de los flujos principales de la quebrada El Toro



Figura 5.24 Vista desde aguas arriba de pozas de acumulación y descarga en Manuel Bulnes



5.1.15. Quebrada Caliche

La Figura 5.25 muestra una imagen satelital de la quebrada con flechas de color amarillo que permiten visualizar la dirección y sentido de sus principales flujos, siendo 2 sus cauces principales.

La Figura 5.26 muestra una vista del cauce del brazo norte y su descarga a la calle Radoslav Razmilic, en tanto en la Figura 5.27 se aprecia el brazo sur cuya descarga se verifica en la calle Los Changos.

Figura 5.25 Imagen satelital de los flujos principales de la quebrada Caliche



Figura 5.26 Descarga del cauce norte de la quebrada Caliche a la calle Radoslav Razmilic



Figura 5.27 Descarga del cauce norte de la quebrada Caliche a la calle Los Changos



5.1.16. Quebrada La Negra

La Figura 5.28 muestra una imagen satelital de la quebrada con flechas de color amarillo que permiten visualizar la dirección y sentido de sus principales flujos.

La infraestructura instalada por minera Escondida, incluye un complejo de edificaciones e instalaciones, con unas obras de conducción de la quebrada y un colector doble que cruza la ruta costera y descarga al mar, como se observa en la Figura 5.29.

Se observan viviendas construidas en el cauce aguas arriba del complejo de minera escondida.

Figura 5.28 Imagen satelital de los flujos principales de la quebrada La Negra



Figura 5.29 Canalización en hormigón de la quebrada La Negra



5.1.17. Quebrada Universidad de Antofagasta

Esta quebrada tiene 2 cuencas principales y su red de drenaje se caracteriza por un conjunto de cauces menores, como lo grafica la Figura 5.30 la cual corresponde a una imagen satelital de la quebrada donde las flechas de color amarillo que permiten visualizar la dirección y sentido de sus principales flujos.

Las cuencas norte y sur, descargan hacia la calle Lullaillaco.

Debe hacerse notar que las edificaciones existentes del entorno de aguas debajo de la descarga, no cuentan con sistema de protección ante crecidas.

Figura 5.30 Imagen satelital de los flujos principales de la quebrada U. de Antofagasta



5.1.18. Quebrada Jardín del Sur

La Figura 5.31 muestra una imagen satelital de los flujos principales de la quebrada, señalados con flechas de color amarillo que muestran que el antiguo cauce norte fue desviado hacia el sur, para juntarlo con el del brazo sur, en un solo cauce, que conduce las aguas hacia una vía aluvional que además es un área verde, hasta descargar las aguas al mar cruzando antes la Ruta 1.

La solución de control aluvional construida en esta quebrada, consiste en una batería de muros de reducción de pendiente, como puede apreciarse en la Figura 5.32, que conducen las aguas hasta el cauce móvil de desvío hacia el sur, formado por un pretil protegido por shotcrete con enrocado al pie.

Figura 5.31 Imagen satelital de los flujos principales de la quebrada Jardín del Sur



Figura 5.32 Obra de control aluvional del cauce de la cuenca sur de la quebrada Jardín del Sur



5.1.19. Quebrada Huáscar

La Figura 5.33 muestra una imagen satelital de la quebrada con flechas de color amarillo que permiten visualizar la dirección y sentido de sus principales flujos. Las obras de control aluvional de esta quebrada, recientemente construidas, están conformadas por un conjunto de muros de estabilización de pendiente del cauce, y un canal con gradas de bajada que en definitiva descarga sus aguas hacia la calle Baja como se aprecia en la Figura 5.34.

Figura 5.33 Imagen satelital de los flujos principales de la quebrada Huáscar



Figura 5.34 Descarga hacia Calle Baja de la quebrada Huáscar



5.1.20. Quebradas S1, S2 y S3

Estas 3 quebradas, al igual que las del norte del área de estudio (N1 y N2), fueron identificadas y propuestas en la Metodología por el Consultor para ser consideradas como posibles cauces para hacer levantamiento de perfiles transversales y estudios de ejes hidráulicos, se sitúan en el extremo sur de la zona de estudio, al norte de la quebrada Roca Roja.

La Figura 5.35 muestra una imagen satelital de las cuencas aportantes de estas 3 quebradas.

En cuanto a las condiciones de flujo, en terreno se apreció que las quebradas S1 y S2 presentan un comportamiento similar, con un cauce medianamente definido que refleja escurrimiento concentrado hasta cierto sector.

La quebrada S3 no presenta una continuación de su cauce, distribuyéndose en múltiples hilillos que reflejan un flujo difuso sobre la ladera en forma de abanico. Las descargas de cada una de estas quebradas se hacen directamente al plano costero con poblaciones situadas en estos entornos.

5.1.21. Quebrada Roca Roja

La Figura 5.36 muestra una imagen satelital de la quebrada con flechas de color amarillo que permiten visualizar la dirección y sentido de sus principales flujos.

El control aluvional de esta quebrada se realiza mediante la descarga del tramo bajo de su cauce en una piscina de acumulación de sólidos, evitando que corrientes de barro caigan directamente hacia la ruta costera.

La obra se encuentra cercada para una adecuada mantención y para evitar la descarga de basura o escombros según se observa en la Figura 5.37.

Figura 5.35 Imagen satelital de los flujos principales de las quebradas S1, S2 y S3



Figura 5.36 Imagen satelital de los flujos principales de la quebrada Roca Roja



Figura 5.37 Vista de la zona baja de la quebrada Roca Roja y obras de decantación



5.1.22. Comentarios finales del reconocimiento de terreno

- El reconocimiento de terreno permitió constatar que la infraestructura de control aluvional existente en las quebradas de la zona costera de Antofagasta ha experimentado un gran cambio en relación a la situación considerada en el PM-26, principalmente por la materialización de un gran número de obras.
- Estas obras han sido construidas con un estándar de seguridad alto y las descargas a calles de la ciudad adecuadamente diseñadas, salvo casos aislados donde la entrega al término de la obra ubicada en el extremo de aguas se hace directamente a un cauce de lecho móvil que, al ser socavado por un flujo de agua durante una crecida, puede causar una regeneración del aluvión justo a la entrada de la ciudad. Esos casos, requieren revisarse.
- En cuanto a colectores de la red primaria de aguas lluvias propuestos en el PM-26, solo se ha construido el colector que evacúa las aguas de la quebrada Salar del Carmen y áreas tributarias urbanas incluido la del sector La Cadena, cuyo trazado sigue la Avda. Salvador Allende y descarga al mar.
- Además, la empresa minera La Escondida ha construido infraestructura en la faja original del cauce de la quebrada La Negra, desviando y canalizando el curso de agua, construyendo un colector bajo la Ruta 1.
- Desde el punto de los asentamientos humanos, el principal problema observado radica en que más allá del crecimiento explosivo y no regulado de viviendas de familias de bajos recursos y de inmigrantes instaladas a lo largo del piedemonte de Antofagasta, las obras de control aluvional y sus caminos de servicio se han constituido en polos de atracción para la instalación descontrolada de nuevas viviendas y desarrollo de actividades, algunas expuestas severamente a riesgos al estar emplazadas dentro de las quebradas y de las mismas obras aluvionales.
- Además, como consecuencia de lo anterior, la densificación sin control de estos sectores ha traído consigo problemas colaterales como botaderos de basura en cauces y dentro de las propias obras, siendo uno de los casos más dramáticos y preocupantes el de las pozas de decantación de la quebrada La Cadena, inmediatamente aguas arriba de su descarga en calle Quito.
- La acumulación de basura en los sistemas de aguas lluvias, no solo pueden afectar su operación y ser causante de un desastre medioambiental toda vez que los residuos serían arrastrados hacia el mar durante una crecida, además que la infiltración de las aguas contaminaría las napas.

5.2. LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO

En el Anexo VI “Informe Topográfico”, se describen en detalle los trabajos topográficos llevados a cabo durante este proyecto, los que incluyeron: monumentación y georreferenciación de los PR de las poligonales primarias y secundarias de apoyo terrestre del levantamiento Aerofotogramétrico; levantamiento RTK de las principales intersecciones y cruces de calles de Antofagasta; y levantamiento de los perfiles transversales de 5 quebradas seleccionadas por la DOH para caracterizar hidráulicamente los tramos finales de estas quebradas.

5.2.1. Poligonales primarias y secundarias

La poligonal primaria se conformó con una red de 18 PR's, separados 2 km entre sí, aproximadamente, los que se distribuyeron relativamente equiespaciados a lo largo de la ciudad de Antofagasta, cubriendo algunos conos de deyección de las quebradas más importantes.

Para monumentar los PR's de la red, se utilizó el monolito tipo (DOH) para zonas urbanas en casi toda la red, si bien en sectores de cerros como lo existente al norte del estudio, se utilizaron monolitos de hormigón DOH.

La vinculación planimétrica y altimétrica de los PR's denominados, PMA1, PMA7, PMA13 y PMA18 de la poligonal primaria se realizó a la estación IGM PMEJ. El objetivo de vincular a puntos medios (PMA7 y PMA13) además de los extremos, fue atenuar y aminorar errores al tener poligonales de menores dimensiones.

Para los PR's intermedios de la red primaria, el transporte de coordenadas se realizó por medio de mediciones con receptores GNSS de clase geodésico, con observación de las fases portadoras, de manera a obtener figuras cerradas que permitieran el control de precisión, es decir, que los vectores observados posibilitaran ecuaciones independientes. Para el transporte de coordenadas mediante GNSS se emplearon observaciones estáticas diferenciales de doble frecuencia.

Se definieron 3 poligonales: PMA1-PMA7, PMA7-PMA13 y PMA13-PMA18 siendo su disposición una que permite controlar las precisiones de cierre de la poligonal geodésica, de forma de dar cumplimiento a lo establecido en Manual de Carreteras, Volumen 2, que indica que para una poligonal de orden secundario de 1:20.000, es de 50 partes por millón (PPM).

Se midió en terreno el resto de los PR's, y con el software específico, se determinaron las coordenadas UTM para cada uno de los 18 PRs de la Red Principal.

Se definió adicionalmente, una red secundaria de PR's que persigue el objetivo de obtener intervisibilidad entre estos puntos, distribuidos estratégicamente entre par de PR's de la red primaria.

Los PR's de esta red secundaria se establecieron avanzando hacia el norte comenzando en el extremo sur (PMA1) y, posicionándolos de modo que entre ellos fueran intervisibles, con distanciamientos en lo posible cada 500 m.

En cuanto a la vinculación altimétrica, al igual que para la red primaria se realizó un traslado de referenciación altimétrica a través de las observaciones GNSS con GPS de doble frecuencia, con la utilización del modelo geoidal EGM08.

5.2.2. Levantamiento intersecciones y cruces de calles y avenidas

A partir de puntos entregados en un kmz donde se representaron 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, se procedió a llevar a cabo el levantamiento de puntos aislados con metodología RTK.

En un vehículo con un dispositivo adosado a la estructura de este, se posicionó un receptor móvil GPS, el cual se desplazó por la ciudad levantando cada punto solicitado.

Se utilizó como base la estación activa de la empresa Geométrica, ligada a vértices del IGM, modificándose el levantamiento a partir de nuestros propios PRs levantados con este sistema.

Cabe destacar que la posición planimétrica de estos puntos puede tener una cierta discrepancia con el cruce definitivo, pues es muy difícil determinar la exacta posición del cruce desde el vehículo en movimiento.

Algunos de los puntos tomados se levantaron a modo de levantamiento continuo, en tanto otros en forma individual.

5.2.3. Levantamiento perfiles transversales quebradas

Para definir las quebradas donde las bases técnicas del estudio estipulan que debe realizarse el levantamiento de perfiles transversales para realizar una modelación HEC RAS del tramo final de estos cauces, con el fin de caracterizar su comportamiento hidráulico durante el paso de crecidas e identificar las zonas de desbordes e inundación, se presentó al PNUD-DOH una propuesta donde se detallaron los criterios principales adoptados para seleccionar los cauces, basados en la importancia y efectos o consecuencias que pudiera tener el comportamiento hidráulico de ellos al descargar al plano urbano, y que además se encuentren en condiciones “naturales” sin obras aluvionales.

Finalmente, la DOH determinó hacer los levantamientos en las quebradas: N1, La Roca, Schneider, S2 y S3.

Los perfiles transversales se levantaron uno por uno utilizando estación total, midiéndose con y sin asistencia de alarifes, en este último caso en lugares en los cuales no fue posible acceder se utilizó la medición laser.

Dada la necesidad de representar gráficamente las secciones de escurrimiento de las quebradas, es decir, secciones perpendiculares al flujo, el levantamiento de los perfiles se hizo con transectas normales al eje del cauce. El levantamiento de los perfiles de cada quebrada se vinculó a PRs de poligonales primaria y secundaria descritas antes.

5.3. LEVANTAMIENTO AEROFOTOGRAMÉTRICO

El levantamiento aerofotogramétrico y la correspondiente restitución que se describe detalladamente en el Anexo VII “Aerofotogrametría y Restitución” del presente informe, consistió, inicialmente en la recopilación de antecedentes para el análisis y planificación de los vuelos aerofotogramétricos, tomando en consideración las diferencias de altura, condiciones de acceso a los diferentes sectores y condiciones climáticas presentes en toda el área de estudio.

Posteriormente, para la ejecución de los vuelos y su correcta georreferenciación, se utilizó Red GNSS de vértices principales distribuidos a lo largo de toda la zona de interés, permitiendo una buena planificación de las labores, un correcto desarrollo de las mediciones, registro de información y vuelo aerofotogramétrico.

El levantamiento abarcó el área aproximada delimitada en la Figura 5.38, comprendiendo una superficie total de 172 km² (17.200 ha) dentro de la cual quedó incluida toda la zona urbana de la ciudad de Antofagasta y la mayoría de las cuencas aportantes al plano urbano.

Figura 5.38 Límites del área del levantamiento de la ciudad de Antofagasta.



Se definieron 20 polígonos de vuelo para abarcar todo el polígono de interés de 17.220 ha de superficie, los que tienen una superficie variable de 400 ha a 1.100 ha.

Para la georreferenciación de los vuelos y la información resultante del post-procesamiento, se utilizó la Red Primaria de apoyo descrita en acápite anteriores.

Para el análisis estadístico de los resultados y como método de autocontrol, se procedió registrar puntos de levantamiento mediante metodología RTK levantando puntos foto-identificables y de relleno a lo largo de todo el polígono de vuelo, esto con la finalidad de verificar la metodología y validación de los productos entregables resultantes del post-proceso realizado.

En definitiva se tomaron 10 puntos de relleno y 31 puntos foto-identificables para verificar el modelo generado con la nube de puntos y ortomosaico.

Se destaca que los puntos de validación se registraron con una precisión bajo 2 cm en la componente vertical y 1 cm en la horizontal, por lo que permiten validar la información generada.

El desarrollo de los vuelos Aerofotogramétricos de escala 1:1.000 se realizó utilizando el equipo DJI Matrice 300 RTK, el que tiene la cualidad de ser un Dron Multi rotor capaz de realizar ascensos verticales en sectores en los que se dispone de superficies acotadas para despegue y aterrizaje.

Al dron se le incorporó el sensor Zenmuse P1, especialmente diseñado para el desarrollo de vuelos Aerofotogramétricos. Esta cámara permite obtener imágenes de 45 megapíxeles y cuenta con un sensor fullframe, especialmente diseñado para el desarrollo de trabajos de este tipo.

Los parámetros con los que fueron configurados los vuelos, de manera de asegurar el resultado en el procesamiento, fueron los siguientes:

- Altura de vuelo de 400 pies, lo que permitió obtener una resolución de imagen con un tamaño de píxel de 6 cm promedio.
- Traslape Frontal de 80% y lateral de 70%.
- Velocidad para la captura de la información de 10 m/s.
- Corrección a la distorsión esférica.
- Calibración del foco al infinito.

Es importante considerar que previo al desarrollo de los vuelos, se realizó la instalación del equipo base para el apoyo de georreferenciación de los vuelos, correspondiente a un receptor Geodésico Leica Viva GS15, instalado en los puntos coordinados pertenecientes a la Red GNSS Principal.

El post-procesamiento de los vuelos y determinación de trayectorias de vuelo precisas se realizó con el software Trimble Business Center 5.20 (TBC), mientras que para la aerotriangulación y generación de entregables brutos se utilizó el software UAS Master.

A continuación, las nubes de puntos fueron filtradas de manera automática inicialmente, y luego aplicando ajustes manuales, para el filtrado exhaustivo de información que no perteneciese al terreno, eliminando todos los elementos “extraños”, como edificaciones, construcciones y otros.

Con las nubes una vez filtradas, fueron generadas las mallas TIN, DEM y línea de tierra, obteniendo las curvas de nivel finales, las que fueron revisadas y ajustadas para una correcta representación del terreno.

Desde las ortofotos brutas, fueron generados los ortomosaicos de cada polígono, los que posteriormente fueron reducidos, sin perjudicar la calidad de imagen, para tener un mejor manejo de la información.

Una vez obtenida la información recabada en terreno y realizado el post-procesamiento de los vuelos aerofotogramétricos, obtenidos las nubes de puntos y ortomosaicos, se procedió con la verificación de las superficies generadas, procedimiento que permitió validar las metodologías aplicadas y verificar el correcto desarrollo de los trabajos.

El análisis estadístico para la validación del post-procesamiento para los productos entregables indica que el error medio cuadrático para la componente horizontal (RMSE_r) 5,3 cm (planimétricamente) y 9,2 cm para la componente vertical (RMSE_z), se enmarcan ampliamente dentro de las precisiones esperadas para un levantamiento aerofotogramétrico de escala 1:1.000.

Para la generación y delimitación de los archivos entregables, se definieron 58 polígonos de corte de toda el área de estudio, mediante cortes ortogonales del área, los cuales fueron denominados de norte a sur y de mar a cordillera con números correlativos.

Los archivos entregables generados son los siguientes:

- Plano topográfico: Curvas de nivel cada 1 m de toda el área de estudio. Formato DWG y PDF.
- Malla TIN: Modelo digital de elevación (DEM) que representa la superficie de terreno, luego de un proceso de filtrado de ruido, como vegetación, construcciones, entre otros, de cada polígono. Formato DXF y GEOTIFF.
- Nube de puntos bruta y filtrada: Archivo de nube de puntos del terreno levantado, obtenido de la restitución fotogramétrica y filtrada de ruido, de cada polígono. Formato LAS.
- Ortomosaicos: Imágenes planimétricas georreferenciadas de los sectores de interés, que conserva distancias horizontales, de cada polígono. Formato GEOTIFF y KMZ.
- Layout topográfico: Polígonos de corte, con curvas de nivel, singularidades y Red GNSS Topográfica, de fácil visualización en Google Earth. A este formato es recomendable cargar los Ortomosaicos en formato KMZ, para la visualización. Formato KMZ.
- Informe técnico: Documento con el respaldo técnico, metodologías, resultados y validación de los productos generados. Formato PDF.

5.4. RESTITUCIÓN AEROFOTOGRAMÉTRICA

El trabajo de restitución se realizó en base al ortofotomosaico georreferenciado generado a partir del levantamiento Aerofotogramétrico de la ciudad de Antofagasta, realizado conforme a lo detallado en el capítulo precedente.

El manejo y compilación de la información se realizó mediante el uso de QGIS y AUTOCAD, generando los respectivos archivos digitales (.dwg) considerados dentro de los entregables.

Para complementar la información de los diferentes elementos que componen dicha restitución, se consultaron diferentes fuentes para la determinar la toponimia, ejes de calles, hidrografía, etc., entre las cuales cabe destacar las siguientes:

- Instituto Geográfico Militar (IGM): Cartas digitalizadas en escala 1:25000.
- OpenStreetMap (OSM): Proyecto colaborativo para la generación de mapas editables de libre acceso.
- Google Earth.
- Plan Regulador Comunal vigente para la ciudad de Antofagasta.
- Restitución utilizada en el PM-26.

En la Tabla 5.1 se detallan las capas que forman parte de la restitución junto con las fuentes de información utilizadas para su digitalización.

Tabla 5.1 Fuentes de información utilizadas en la restitución

Capa	Fuente de Información
Red de PRs.	Topografía
Curvas de nivel	Aerofotogrametría
Cotas de intersecciones de calles, puntos bajos y altos relevantes con precisión de 0,1 m.	Topografía
Trazado de manzanas.	Aerofotogrametría
Subdivisión predial a nivel de manzanas.	Aerofotogrametría
Línea de solera.	Aerofotogrametría
Eje de las calles	IGM
Red vial	IGM - Aerofotogrametría
Huellas y senderos.	IGM - OSM - Aerofotogrametría
Construcciones importantes.	OSM - Google Earth
Puntos de servicio (bomberos, hospitales, etc.).	OSM - Google Earth
Red ferroviaria.	OSM - Aerofotogrametría
Hidrografía	IGM
Arborización y áreas verdes.	Aerofotogrametría OSM
Toponimia (nombre de lugares, calles y otros).	OSM - Google Earth
Límite urbano actual.	PRC Antofagasta

Luego de recopilada toda la información a partir de las diferentes fuentes y su complemento mediante la digitalización de ciertas capas de los ortomosaicos (ajustados al Datum utilizado en el proyecto (WGS84, H19S), se generaron los planos donde se incluyen todas las capas mencionadas.

Para la correcta visualización de la restitución, y según lo estipulado en los términos de referencia del proyecto, se generó un laminado en escala 1:2.000 que abarca un total de 92 láminas para cubrir en su totalidad el levantamiento realizado sobre la ciudad de Antofagasta.

6. ANÁLISIS HIDROLOGICO CON PROYECCIONES DE CAMBIO CLIMÁTICO

En el Anexo VIII “Análisis Hidrológico con Proyecciones de Cambio Climático” del presente informe, se presentan detalladamente los antecedentes, metodología, cálculos, resultados, análisis y conclusiones del análisis hidrológico realizado del área de estudio incorporando las proyecciones de cambio climático en las precipitaciones y caudales de las cuencas que descargan sus escorrentías al plano urbano de la ciudad de Antofagasta.

6.1. ALCANCE DEL ANÁLISIS

El análisis hidrológico que se describe a continuación, incorpora la variable de cambio climático teniendo como horizonte el período 2035-2065, bajo el escenario RCP 8.5, considerando los siguientes alcances:

- Evaluación de las estadísticas de precipitaciones extremas históricas, para distintas duraciones, en el periodo 1979-2020, derivadas del producto CR2MET y análisis de su probabilidad de recurrencia.
- Análisis de proyecciones futuras de la magnitud de eventos de precipitación máxima en un contexto de cambio climático hacia el periodo 2035-2065 en el área de estudio.
- Determinación de las curvas intensidad-duración-frecuencia (IDF) representativas del dominio de estudio en el periodo histórico 1979-2020 y futuro 2035-2065.
- Estimación de la probabilidad de excedencia anual de eventos de precipitación en la zona de estudio y análisis de la distribución espacial de algunos eventos extremos registrados.
- Cálculo de hietogramas representativos de la precipitación en la zona de estudio.
- Estimación de los caudales máximos instantáneos de crecida a partir de las estadísticas del periodo histórico 1979-2020 y proyección para el periodo futuro 2035-2065 evaluando los cambios asociados.

Conforme a lo solicitado en las bases, la información de precipitaciones de periodo de retorno $T=10$ años se sintetizó en un plano escala 1:20.000 titulado “Plano de Isoyetas Asociadas a Duración 24h - $T=10$ Años”.

6.2. RECOPIACIÓN REVISIÓN Y ANÁLISIS DE ANTECEDENTES DE CAMBIO CLIMÁTICO

Como paso previo al desarrollo de la metodología para la incorporación de cambio climático en las precipitaciones extrema a emplearse en el análisis y/o diseño del sistema de evacuación y drenaje de aguas lluvias de Antofagasta, el presente acápite tiene como objetivo presentar una recopilación, revisión y análisis de los antecedentes disponibles a nivel nacional en materia de cambio climático y su relación con el diseño y operación de infraestructura hidráulica y, en particular, de infraestructura relativa a la evacuación y drenaje de aguas lluvias.

La recopilación y revisión de antecedentes sobre cambio climático incluyó los documentos que se listan a continuación.

- [1] Ministerio de Medio Ambiente, 2014. Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático.
- [2] Ministerio de Obras Públicas, 2016. Política de Sustentabilidad Ambiental del Ministerio de Obras Públicas.
- [3] Ministerio de Obras Públicas, 2017. Plan de Adaptación y Mitigación de los servicios de infraestructura al cambio Climático 2017-2022.
- [4] Ministerio de Obras Públicas, 2018. Diagnóstico de la vulnerabilidad de las obras del MOP y medidas de adaptación al cambio climático.
- [5] Ministerio del Medio Ambiente, 2020. Atlas de Riesgos Climáticos para Chile.
- [6] DGA, 2018. Aplicación de La Metodología de Actualización del Balance Hídrico Nacional en las Cuencas de la Macrozona Norte y Centro.
- [7] DGA, 2017. Actualización del Balance Hídrico Nacional, SIT N° 417, Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación, Santiago, Chile. Realizado por: Universidad de Chile & Pontificia Universidad Católica de Chile.
- [8] IPCC, 2013. Summary for Policymakers, in: Intergovernmental Panel on Climate Change (Ed.), Climate Change 2013 - The Physical Science Basis. Cambridge University Press, Cambridge, pp. 1–30. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- [9] IPCC, 2001. Climate Change 2001: Synthesis Report. A Contribution of Working Groups I, II, and III to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press. Cambridge, United Kingdom.

En cuanto a proyecciones de cambio climático para Chile [2], se anticipan aumentos de temperatura generalizados para todo el territorio continental para el periodo 2011-2030 y 2031-2050, con un gradiente de mayor a menor, de norte a sur y de Cordillera a Océano, mientras que, en términos de precipitación anual promedio, se reporta una señal de disminución generalizada respecto al periodo de referencia para la mayor parte de Chile continental, tanto en el periodo 2011-2030 como 2031-2050.

En general, se pueden identificar tres amenazas climáticas que tienen impactos directos en el ciclo hidrológico y los recursos hídricos [3], las cuales corresponden a:

- Cambios en el patrón de precipitaciones y aumento en intensidad y frecuencia de sequías: se considera que el cambio climático juega un rol fundamental sobre el ciclo hidrológico y en los patrones de disponibilidad de agua, por lo que cambios en, por ejemplo, la temperatura y precipitación afectarían directamente la magnitud y estacionalidad de los caudales.

- Aumento en intensidad en inundaciones fluviales: dado que el cambio climático proyecta episodios más intensos de precipitación que, sumado a intervenciones antrópicas (obras hidráulicas, caminos, etc.) causantes de alteraciones en el régimen natural de muchos ríos, se prevé un aumento en las inundaciones y costos asociados en las próximas décadas.
- Aumento en intensidad en inundaciones costeras: tomando en cuenta que las proyecciones globales coinciden en que las alturas de oleaje extremas como el nivel del mar podrían aumentar en el futuro, se estima que cambios en los patrones de oleaje, tanto en aumentos de altura significativas como en su dirección, se podrían traducir en problemas a nivel de operación de infraestructura y erosión de sistemas costeros.

En particular, para la ciudad de Antofagasta, dadas las características climáticas y fisiográficas, las amenazas primera y tercera serían las que potencialmente condicionarían el diseño de obras hidráulicas en un contexto de resiliencia y adaptación climática.

La tabla de matriz de amenazas para el caso de Antofagasta, se resume en la Tabla 6.1 según la cual se verifica que la precipitación futura asociada a los períodos de retorno T=5, T=10 y T=20 años proyecta un leve aumento de la amenaza futura, siendo mayor para períodos de retorno más bajos (17,4% para T=5 años).

Tabla 6.1 Matriz de amenaza de inundaciones urbanas de Antofagasta

Periodo de retorno (años)	Precipitación (mm)	Índice de Amenaza		Cambio
		Clima Actual (-)	Clima Futuro (-)	
5	4,4	0,46	0,54	17,4%
10	8,9	0,58	0,61	5,2%
20	18,1	0,81	0,84	3,4%

Fuente: Adaptado de Plataforma web ARClím (https://arclim.mma.gob.cl/atlas/view/inundaciones_urbanas/).

A partir de lo analizado, se sugiere que, para lograr la adaptabilidad al cambio climático, ante condiciones de inundaciones en zonas urbanas, se deben tomar diversas acciones, como las siguientes [5]:

- Mejorar y fortalecer las redes de recolección, conducción y restitución de aguas lluvias, especialmente en sectores donde aún no se tiene un saneamiento de aguas lluvias efectivo.
- Aumentar la capacidad de porteo (caudal máximo que es capaz de conducir un canal).
- Establecer espacios aprovechables sin población instalada, en donde se pueda almacenar la escorrentía durante las crecidas y que también cumplan con una función de espacio recreativo como, por ejemplo, parques fluviales y canchas deportivas.

Como medidas de adaptación al cambio climático se sugiere invertir más recursos materiales, humanos y financieros en el desarrollo de estudios hidrológicos de cuencas con el fin de ampliar la cobertura territorial y poder generar la actualización de hidrogramas de eventos de tormentas, para

así comprender de manera más apropiada el patrón de lluvias según su duración, intensidad y composición desde un punto de vista global.

Para ello, se propone la reformulación de metodologías de diseño de servicios de infraestructura [4], aplicando, por ejemplo, algunas de las alternativas presentadas en la Tabla 6.2 para la estimación caudales máximos.

Tabla 6.2 Resumen de comparación de alternativas de reformulación de caudales de diseño

Método convencional	Descripción/principio	Antecedentes	Herramientas
Modelamiento de escenarios futuros bajo un enfoque determinístico	Desarrollar varias simulaciones de distintos escenarios, favorables y desfavorables para eventos de precipitaciones y/o sequías. espacial tanto en latitud y/o longitud como en el sentido de altitud.	Incorporar la variabilidad isoterma cero o línea de nieves en dichos escenarios y data hidrometeorológica prospectiva de alta resolución (5 km)	CR2, INH, Universidades, tesis de pre y posgrado, publicaciones
Zonificar el territorio con curvas de IDF calibradas	Caracterización detallada de la dinámica de las precipitaciones en diferentes lugares del territorio (Macrozonas, cuencas), sin necesidad de tener que llegar a aproximación de valores o interpolaciones	Data hidrometeorológica prospectiva de alta resolución (5 km)	CR2 INH, Universidades, tesis de pre y posgrado, publicaciones
Generación de hidrogramas de eventos de tormentas	Desarrollo de hidrogramas de eventos y tormentas que permitan comprender de manera más apropiada el patrón de lluvias según su duración, intensidad y composición.	Data hidrometeorológica prospectiva de alta resolución (5 km)	CR2 INH, Universidades, tesis de pre y posgrado, publicaciones
Generación de hidrogramas unitarios sintéticos de precipitación	Desarrollo de hidrogramas unitarios sintéticos que representen la simulación de precipitaciones escorrentía acorde a la geomorfología, clima, uso del suelo, ecosistemas propios del país	Data hidrometeorológica prospectiva de alta resolución (5 km)	CR2 INH, Universidades, tesis de pre y posgrado, publicaciones
Generación de hidrogramas unitarios sintéticos de escorrentía	Desarrollo de hidrogramas unitarios sintéticos que representen la simulación escorrentía acorde a la geomorfología, clima, uso del suelo, ecosistemas propios del país, con coeficientes calibrados y ajustados para cuencas hidrográficas del territorio nacional.	Data hidrometeorológica prospectiva de alta resolución (5 km)	CR2 INH, Universidades, tesis de pre y posgrado, publicaciones
Aplicación de factores o coeficientes de calibración a la fórmula racional de cálculo de caudales	Desarrollo de factores de calibración de fórmulas racionales de caudales de acuerdo a las grandes macrozonas hídricas y/o cuencas del territorio nacional	Data hidrometeorológica prospectiva de alta resolución (5 km)	CR2 INH, Universidades, tesis de pre y posgrado, publicaciones

Fuente: DOH, 2018

6.3. CARACTERIZACIÓN FISIAGRÁFICA DE LA ZONA DE ESTUDIO

Los parámetros morfométricos que sirven para caracterizar las cuencas para el análisis hidrológico, corresponden al área de la cuenca de estudio, el rango de elevación, la pendiente, la longitud del cauce principal, entre otros, los que son empleados para estimar, por ejemplo, el tiempo de concentración de la cuenca de interés.

En la Tabla 6.3 se resumen los principales parámetros morfométricos de las quebradas de interés y el tiempo de concentración adoptado para cada una.

Tabla 6.3 Parámetros morfométricos y tiempo de concentración de las cuencas

Quebrada	Área (km ²)	Largo cauce principal (km)	Pendiente media cuenca (m/m)	Rango elevación (m)	Tiempo concentración (min)	
					Rango*	Valor adoptado
N0	14,05	9,75	0,213	763	63 ± 1,5	60
N1	19,5	9,48	0,263	785	60 ± 0,9	60
N2	1,86	2,72	0,193	358	19 ± 0,4	19
Varas Norte	2,51	2,83	0,289	489	18 ± 0,1	18
Varas Sur	0,59	1,8	0,39	494	10 ± 1	10
La Chimba	25,74	10,6	0,309	952	64 ± 0,2	64
La Roca	1,63	2,78	0,33	661	16 ± 0,8	15
Club Hípico	3,86	4,92	0,401	942	27 ± 0,1	27
Bonilla Norte	3,25	4,29	0,319	821	24 ± 0,1	24
Bonilla Sur	5,64	5,72	0,313	1024	31 ± 0,6	30
Farellones	4,4	6,37	0,269	937	36 ± 0,5	35
La Cadena	21,4	8,98	0,233	784	57 ± 0,9	56
El Ancla	1,15	2,97	0,194	355	21 ± 0,3	21
Riquelme	0,16	1	0,317	250	7 ± 0,1	10
Baquadano	0,75	1,96	0,3	356	13 ± 0,3	13
Uribe	0,68	1,86	0,279	280	13 ± 0,6	12
El Toro	4,61	5,91	0,28	658	37 ± 0,8	36
Caliche Norte	1,1	2,37	0,259	383	16 ± 0,2	16
Caliche Sur	0,7	1,75	0,21	243	13 ± 0,2	13
Jardín del sur	7,73	6,6	0,184	554	45 ± 1	44
Huáscar	2,33	3,8	0,145	433	26 ± 0,6	25
Roca Roja	187,26	27,3	0,161	1136	183 ± 4,9	180
Universidad de Antofagasta	0,75	1,47	0,3	392	10 ± 0,4	10
S1	0,23	1,22	0,276	209	9 ± 0,3	10
S2	0,23	1,18	0,247	216	9 ± 0,1	10
S3	1,02	1,8	0,177	266	14 ± 0,1	14

*Corresponde al tiempo de concentración promedio derivado de aplicar la fórmula de Kirpich y California Highways

Con el fin de caracterizar la cobertura de suelo de las quebradas de interés, se utilizó el mapa de cobertura de suelo de Chile 2014², que cuenta con una resolución espacial de 30 m x 30 m y abarca todo Chile continental.

La Tabla 6.4 resume las características principales de cobertura de suelo de las quebradas en estudio, mostrando que lo dominante en la zona de estudio corresponde principalmente a suelo desnudo del tipo rocoso que, según lo reportado en la tabla, en general para todas las quebradas se puede clasificar como rocas (~77% de los casos). Sólo en 6 quebradas predomina el tipo de cobertura de suelo rocoso tipo gravas.

Tabla 6.4 Cobertura de suelo por quebrada de interés

Quebrada	Matorrales			Superficies impermeables	Tierras desnudas		
	Matorrales	Suculentas	Otros matorrales áridos		Suelos arenosos	Suelos rocosos	
						Rocas	Gravas
N0	0,01%	0,01%	1,38%	1,54%	0,00%	74,48%	22,58%
N1	0,03%	0,00%	2,10%	0,51%	0,01%	83,63%	13,70%
N2	0,00%	0,00%	0,58%	0,77%	0,00%	70,83%	27,82%
Varas Norte	0,00%	0,00%	8,17%	2,96%	0,00%	73,44%	15,43%
Varas Sur	0,15%	0,00%	5,39%	0,62%	0,00%	78,43%	15,41%
La Chimba	0,19%	0,00%	2,01%	0,58%	0,00%	91,62%	5,58%
La Roca	0,06%	0,00%	1,16%	3,88%	0,00%	85,38%	9,52%
Club Hípico	0,60%	0,00%	1,84%	0,67%	0,00%	88,40%	8,44%
Bonilla Norte	0,22%	0,00%	1,25%	0,42%	0,00%	91,15%	6,93%
Bonilla Sur	0,08%	0,00%	0,77%	0,64%	0,00%	89,17%	9,32%
Farellones	0,02%	0,00%	0,20%	3,47%	0,00%	76,83%	19,44%
La Cadena	0,00%	0,00%	0,13%	1,61%	0,00%	86,15%	12,11%
El Ancla	0,00%	0,00%	0,55%	0,16%	0,00%	32,89%	66,40%
Riquelme	0,00%	0,00%	0,57%	1,14%	0,00%	69,15%	29,14%
Baquadano	0,00%	0,00%	0,24%	3,02%	0,00%	58,53%	38,21%
Uribe	0,00%	0,00%	0,40%	1,20%	0,00%	64,13%	34,27%
El Toro	0,06%	0,00%	0,43%	0,96%	0,00%	76,09%	22,46%
Caliche Norte	0,00%	0,00%	0,00%	3,93%	0,00%	83,71%	12,36%
Caliche Sur	0,00%	0,00%	0,00%	1,27%	0,00%	65,40%	33,33%
Jardín del Sur	0,01%	0,00%	0,09%	3,09%	0,00%	42,23%	54,58%
Huáscar	0,00%	0,00%	0,00%	3,14%	0,00%	36,80%	60,06%
Roca Roja	0,01%	0,00%	0,19%	1,04%	3,67%	75,30%	19,76%
U. de Antofagasta	0,12%	0,00%	0,00%	0,36%	0,00%	58,63%	40,89%
S1	0,00%	0,00%	0,00%	0,41%	0,00%	13,58%	86,01%
S2	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,39%	99,61%
S3	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	11,68%	88,32%

² Producto disponible para su descarga libre y gratuita en http://www.gep.uchile.cl/Landcover_CHILE.html

6.4. ANÁLISIS DE PRECIPITACIONES EN EL PERIODO HISTÓRICO 1979-2020

6.4.1. Corrección del producto grillado CR2MET V2.0

La corrección del producto de precipitación de CR2MET v2.0 se realizó a partir de la aplicación del método de Cressman (Cressman, 1959), el cual distribuye espacialmente el error de la estimación de un producto grillado respecto a una observación local a partir de un radio de influencia y la diferencia entre la observación y estimación.

Así, el método considera que una estación tiene influencia sobre un cierto radio en el cual se corrigen los montos de manera ponderada según un peso que depende de la distancia a la cual se ubica el punto de corrección respecto a la estación de control.

Dado lo anterior, resulta clave estimar un radio de influencia que permita corregir de la mejor forma los valores espacialmente distribuidos. Para ello se aplica un esquema de validación cruzada dejando uno afuera (LOOCV por sus siglas en inglés), donde se prueba de manera iterativa la aplicación de un cierto radio de influencia a todas las estaciones disponibles salvo una y se evalúa la habilidad de imponer dicho valor en la corrección de la estimación vinculada a aquella estación que fue extraída de la muestra durante el proceso de “entrenamiento” del método, pero que cuenta con información para evaluar.

Repitiendo el proceso de validación cruzada utilizando estaciones ubicadas en la Región de Antofagasta con registros de precipitación en al menos el 85% de los días en el periodo 1979-2020, se obtuvo un valor óptimo de 35 km, pues radios de influencia mayores no reportan necesariamente mejoras en las estimaciones e incluso la dispersión de los errores aumenta respecto al óptimo.

Aplicando la corrección de Cressman con el radio de influencia óptimo determinado según el esquema de evaluación descrito anteriormente, se evaluó a través de diferentes métricas y escalas temporales, el desempeño de CR2MET corregido respecto a los registros disponibles en las estaciones meteorológicas ubicadas cerca de la zona de estudio. Hay dos estaciones que por la extensión y continuidad de su registro fueron utilizadas para corregir el producto de precipitación de CR2MET v2.0 (Cerro Moreno Antofagasta Ap. y Antofagasta).

6.4.2. Desagregación horaria de las series de precipitación diaria

Una vez corregidos los valores diarios de precipitación de CR2MET se desagregaron temporalmente a nivel horario tomando como base la distribución subdiaria obtenida del reanálisis atmosférico ERA5, disponible en la base de datos de Copernicus (C3S; <https://cds.climate.copernicus.eu/>).

Para ello, se realizó una interpolación lineal desde la grilla ERA5 (0,25° latitud-longitud) a CR2Met (0,05° latitud-longitud) y, para cada píxel de la grilla, se procedió a la desagregación de la precipitación diaria a horaria ($Pr_{1h}^{CR2Met}(h, d)$).

En términos simples, se mantiene la distribución horaria de ERA5 ($Pr_{1h}^{ERA5}(h, d)$) y el monto de precipitación diario de CR2Met ($Pr_d^{CR2Met}(d)$).

6.4.2.1. Agregación espacial a escala de cuenca

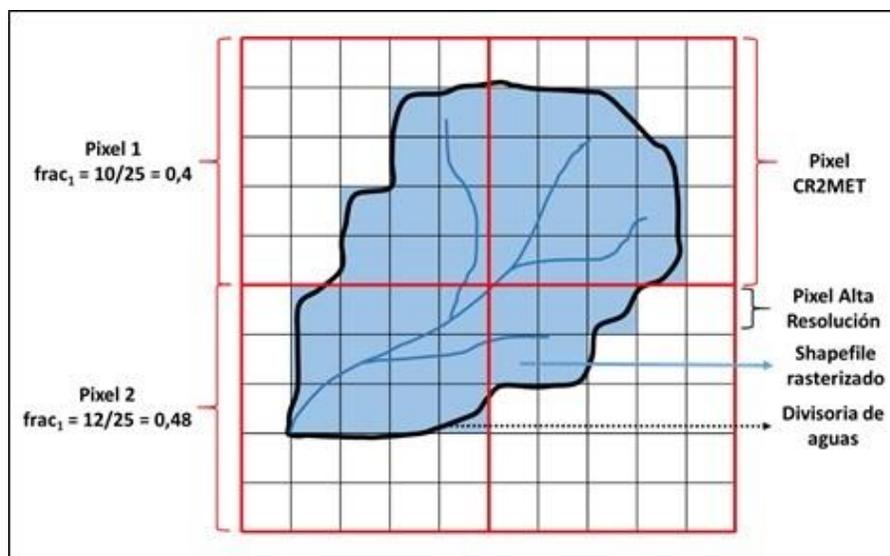
Para calcular el monto de precipitación agregado a escala de cuenca a partir del producto grillado CR2MET se utiliza, para cada paso de tiempo de interés, una expresión que depende del monto asociado a cada píxel ($Pr_i(t)$), la fracción del píxel que pertenece a la cuenca ($frac_{p_i}$) y el área del mismo (A_{p_i}).

Para estimar la fracción de cuenca perteneciente a cada píxel, se siguió un procedimiento similar al esquematizado en la Figura 6.1, donde el archivo vectorial (“shapefile”) de la cuenca fue rasterizado a una resolución mayor a la de CR2MET, usando la misma extensión de este último (alineado). Enseguida, a través de un proceso automatizado, se procedió a contabilizar la cantidad de pixeles de la cuenca que están contenidos en el píxel CR2MET y se calcula la fracción correspondiente.

6.4.3. Estimación de la recurrencia anual de eventos de precipitación

Con el objetivo de caracterizar la recurrencia anual de precipitaciones, se estimó la fracción de días con lluvia por año en el periodo 1979-2020. Para ello se definieron diferentes umbrales de precipitación a modo de dar cuenta de la detección de lluvia (eventos mayores a 0,1 mm) a eventos tipificados como lluvia ligera ($P > 1$ mm), moderada ($P > 5$ mm), fuerte ($P > 20$ mm) y violenta ($P > 40$ mm) según los valores propuestos por Báez-Villanueva et al. (2020).

Figura 6.1 Esquema del cálculo para la agregación espacial a escala de cuenca



Cabe mencionar que, dado la resolución de la grilla CR2MET, la cual corresponde a 0,05° latitud-longitud, cuencas pequeñas, como es el caso de la mayoría de las quebradas en estudio, que se

encuentren próximas pueden estar contenidas en el mismo píxel y, en consecuencia, tener las mismas estadísticas de precipitación asociada.

Los resultados muestran que, en promedio, se detecta precipitación en aproximadamente 7 días (equivalente al 2% de los días del año), con un máximo de 22 días, de los cuales solo 2 a 3 días sobrepasan 1 mm y, en general, se mantienen por debajo de los 20 mm.

Resulta interesante notar que 12 de las 27 quebradas (44% del dominio) registran eventos que sobrepasan el umbral de 40 mm.

Dichas quebradas se encuentran ubicadas en la parte sur del dominio de estudio y llegan hasta las quebradas vecinas a Roca Roja, quebrada que no muestra días con precipitaciones de la magnitud antes mencionadas.

6.4.4. Análisis de condiciones antecedentes en el periodo histórico 1979-2020

En términos de las condiciones de humedad antecedentes a los eventos de máxima precipitación anual, siguiendo la clasificación propuesta por el SCS para el método Curva Número, basada en la precipitación acumulada durante los cinco días precedentes a la tormenta, se obtienen resultados donde se aprecia que en todos los casos analizados (duraciones y quebradas) el 100% de los casos en el periodo 1979-2020 (42 de los 42 años) presentan condiciones antecedentes secas.

Según la formulación del método curva número, solo se generan crecidas cuando la precipitación acumulada supera el monto de la abstracción inicial hasta la saturación del suelo, desprendiéndose del análisis efectuado que, bajo 14 mm de precipitación diaria, no se generaría escorrentía.

Si se impone dicho umbral a la serie de máximos de precipitación diaria anual en el periodo 1979-2020, se desprende que la precipitación diaria máxima de los años 1991, 2015 y 2017 excede dicho umbral definido. Estos años coinciden con algunos de los eventos ocurridos en la zona en el periodo 1979-2020, reportados en los medios de comunicación por su magnitud en términos de los impactos sobre la comuna de Antofagasta y sus servicios a causa de, por ejemplo, flujos aluvionales^{3,4,5} y altas intensidades de precipitación⁶.

Resulta interesante notar que en la Tabla 6.2 donde se presentan las quebradas en una escala azul degradada ordenadas de norte a sur, particularmente en los eventos de los años 1991 y 2015 para los cuales a su vez ocurrieron eventos aluvionales, las magnitudes de precipitación por quebrada

³<https://www.adnradio.cl/nacional/2021/06/16/a-30-anos-aluvion-en-antofagasta-expertos-advierten-riesgo-deslizamiento.html>

⁴<https://emergenciaydesastres.mineduc.cl/aluvion-en-regiones-de-antofagasta-y-atacama/>

⁵https://www.bbc.com/mundo/noticias/2015/03/150327_lluvias_chile_porque_lp

⁶<https://www.duna.cl/noticias/2017/06/08/en-15-horas-antofagasta-recibio-las-lluvias-esperadas-para-12-anos/>

varían de manera creciente de norte a sur (precipitación en N0, graficada en color azul, es menor a S1, graficada en color gris), lo cual no se verifica en el año 2017, donde no ocurrieron aluviones.

Esto deja entrever las diferencias en los patrones espaciales de precipitación y cómo dichos patrones pueden condicionar hasta cierto punto la ocurrencia de eventos aluvionales pues, si se comparan los años 2015 y 2017, donde los montos de precipitación fueron similares, sólo uno tiene asociado un evento aluvional (2015) en la zona en estudio.

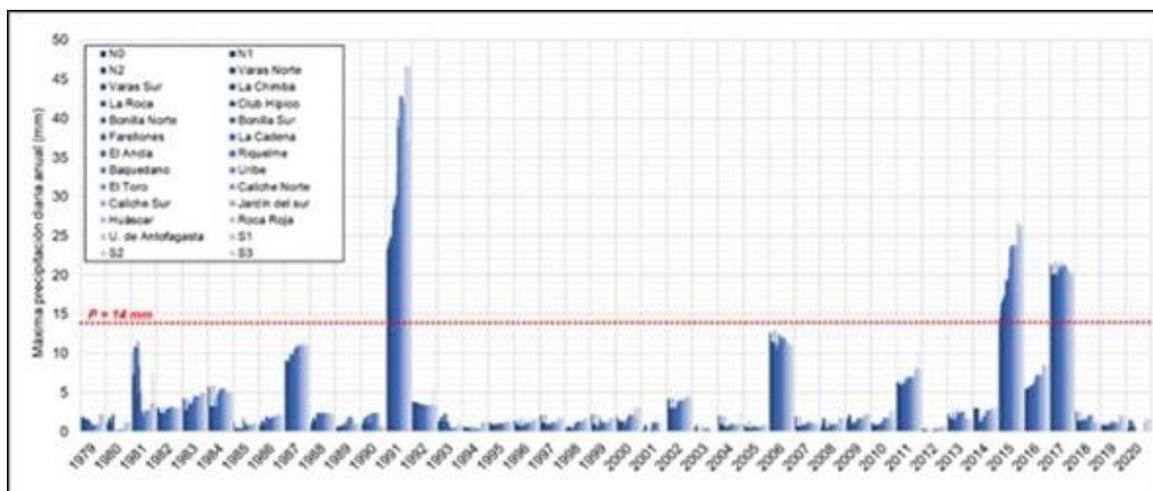
6.4.5. Análisis de las tormentas de mayor magnitud en la zona de estudio

Para la comuna de Antofagasta la mayoría de los eventos de máxima precipitación anual coinciden en el día en que ocurren, lo que se evidencia particularmente en los años 1991, 2015 y 2017, los cuales, registraron montos de máxima precipitación diaria significativos para la zona de estudio.

Tomando en cuenta los tres años mencionados (los cuales corresponden a los eventos de mayor magnitud en el periodo de estudio 1979-2020) y adicionalmente los años 1982 y 1987 donde según lo reportado por Vargas et al. (2000) también se reportan algunos flujos aluvionales, las isolíneas de la máxima precipitación diaria asociada a dichos eventos muestra que en general los eventos concentran las mayores magnitudes en la parte sur del dominio.

El plano de isoyetas de precipitación de 24 horas y periodo de retorno T=10 años, elaborado en el presente estudio como síntesis del análisis de distribución espacial de las lluvias en Antofagasta, muestra efectivamente la tendencia a mayor precipitación en la zona sur que en la zona norte del área de estudio (3 láminas escala 1:20.000).

Figura 6.2 Máxima precipitación diaria anual en el periodo 1979-2020



6.4.6. Análisis de hietogramas de precipitaciones anuales extremas

Para cada quebrada de interés y año en el periodo de estudio (42 años), se analizaron las distribuciones temporales normalizadas asociadas a los eventos de máximas precipitaciones en bloques efectivos de 3, 6, 12 y 24 horas.

Considerando que el dominio está compuesto por un total de 27 quebradas y de cada una de ellas se obtienen potencialmente 42 hietogramas por duración de tormenta (la cantidad total depende de la cantidad de años con eventos de precipitación), para efectos prácticos se combinaron las NT distribuciones de precipitación y a partir de ellas se determinaron las envolventes superior e inferior, la distribución asociada al promedio y un caso intermedio entre cada envolvente y el promedio (dos casos adicionales). Así, se derivan cinco distribuciones de precipitación, las cuales posteriormente fueron evaluadas por quebrada para determinar aquella que definía la condición más desfavorable a la cual se podría ver sometido el sistema durante eventos de precipitaciones extremas.

Resultó interesante constatar que las cinco distribuciones de precipitación propuestas se pueden comparar en términos de forma (cualitativamente) con otras distribuciones propuestas en la literatura nacional (Benítez and Verni, 1985; Varas, 1985), aun cuando fueron desarrolladas tomando como base registros de estaciones pluviométricas ubicadas en la zona centro-sur del país.

En consecuencia, el presente estudio proporciona, además de una metodología replicable para su obtención, una serie de distribuciones que incorporan por construcción los patrones climáticos locales de la comuna de Antofagasta, lo que, a pesar de tener asociado un alto grado de incertidumbre, provee de ideas respecto al comportamiento de las precipitaciones extremas.

Del análisis de 5 tipos de distribuciones (Tipo I a Tipo V), se desprende que, en general, el valor promedio estimado se aproxima a las duraciones de 6 y 12 horas. Por ejemplo, en la Distribución I, la curva propuesta se sobrepone a la asociada a 12 horas. Por otro lado, la forma de las curvas es, en general, similar, independiente de la duración asociada, lo cual valida la idea de combinarlas para definir un conjunto de curvas unificadas e independientes de la duración de los eventos de precipitación.

En la Tabla 6.5 se resumen las fracciones de precipitación acumuladas según la fracción de tiempo desde el inicio de la tormenta.

Tabla 6.5 Fracciones de precipitación adoptadas según Tipo de Distribución

t/T (hrs)	Tipo I	Tipo II	Tipo III	Tipo IV	Tipo V
0,00	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,05	0,172	0,100	0,029	0,014	0,000
0,10	0,313	0,186	0,057	0,028	0,000
0,15	0,463	0,276	0,086	0,043	0,000
0,20	0,579	0,350	0,116	0,059	0,000
0,25	0,669	0,408	0,149	0,073	0,000

t/T (hrs)	Tipo I	Tipo II	Tipo III	Tipo IV	Tipo V
0,30	0,758	0,469	0,182	0,091	0,000
0,35	0,827	0,521	0,219	0,110	0,000
0,40	0,862	0,560	0,260	0,132	0,000
0,45	0,892	0,596	0,302	0,153	0,000
0,50	0,924	0,634	0,348	0,174	0,000
0,55	0,938	0,666	0,398	0,199	0,000
0,60	0,948	0,697	0,449	0,226	0,000
0,65	0,959	0,729	0,503	0,253	0,000
0,70	0,966	0,761	0,559	0,293	0,025
0,75	0,972	0,793	0,619	0,339	0,063
0,80	0,978	0,831	0,689	0,392	0,100
0,85	0,983	0,871	0,762	0,460	0,163
0,90	0,988	0,913	0,840	0,556	0,275
0,95	0,995	0,959	0,922	0,706	0,487
1,00	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000

Considerando las múltiples alternativas que ofrecen las distribuciones presentadas en la figura anterior, y la forma en que se comparan respecto a las distribuciones analizadas por duración, para efectos prácticos puede utilizarse la distribución Tipo I como una única distribución independiente de la duración de la lluvia, o alternativamente emplear las siguientes según la duración de la lluvia:

- Para duraciones menores a 6 horas: Distribución Tipo I.
- Para duraciones entre 6 y 12 horas: Distribución Tipo II.
- Para duraciones entre 12 y 24 horas: Distribución Tipo III.
- Para duraciones mayores a 24 horas: Distribución Tipo IV.

6.4.7. Determinación de curvas intensidad-duración-frecuencia (IDF)

A partir de la experiencia reportada por Torres (2016), quien realiza un estudio para determinar curvas IDF en la región de Antofagasta y compara diferentes métodos y bases de datos, se adoptó el modelo de ajuste de curvas intensidad-duración-frecuencia (IDF) propuesto por Chow (1994), el cual se define la intensidad de precipitación para una cierta duración y periodo de retorno según la siguiente expresión:

$$i^T(D) = \frac{K \cdot T^m}{D^n + b}$$

Donde D es la duración de la tormenta de interés en horas, T el periodo de retorno en años y K , m , n y b coeficientes de ajuste de la expresión, los cuales dependen del periodo de retorno. Así, a partir de las intensidades medias derivadas del análisis de frecuencia por duración se ajustan a través de mínimos cuadrados los coeficientes requeridos para ajustar las curvas IDF de cada quebrada.

Dado que se cuenta con las distribuciones horarias de precipitación para las diferentes quebradas, se analizaron individualmente tormentas de diferentes duraciones, lo cual permitió realizar análisis de frecuencia sobre tormentas de diferente duración para ajustar las curvas IDF.

Para duraciones entre 1 y 24 horas y para periodos de retorno (T) de 2, 5, 10, 20, 25, 50, 75 y 100 años, se obtuvieron las curvas IDF cuyos coeficientes se resumen en la Tabla 6.6.

Tabla 6.6 Coeficientes de curvas IDF de zonas no urbanas para el periodo 1979-2020

Periodo de retorno (años)	Coeficiente ajuste curvas IDF			
	K	m	n	b
2	0,7460	0,5916	0,6088	1,1446
5	1,0319	0,9132	0,6405	1,2595
10	7,7658	0,1648	0,7388	2,3260
20	0,8149	1,0022	0,7279	2,0605
25	2,2961	0,6751	0,7619	2,3531
50	0,8613	0,8867	0,7700	2,3318
75	2,7137	0,5821	0,7856	2,4166
100	2,5034	0,6128	0,8070	2,7934

Las curvas IDF propuestas como representativas corresponden a la envolvente de las IDF individuales obtenidas para cada quebrada y da cuenta de la condición más desfavorable a la cual se podría ver sometido el sistema. Estas curvas son representativas de las áreas no urbanas.

Las curvas IDF propuestas como representativas de la zona urbana, corresponden a las que se derivan de los coeficientes de la Tabla 6.7. En el caso de separar IDF representativas de la zona norte del dominio (latitud 23,65°S) de aquel de la zona sur, se definieron las curvas IDF cuyos coeficientes se consignan en la Tabla 6.8 para la primera zona (norte) y en la Tabla 6.9 para la segunda (sur).

Tabla 6.7 Coeficientes de curvas IDF de la zona urbana para el periodo 1979-2020

Periodo de retorno (años)	Coeficiente ajuste curvas IDF			
	K	m	n	b
2	0,5242	0,4969	0,6385	2,4542
5	0,5811	0,4910	0,4974	0,0579
10	1,1432	0,5868	0,6600	0,9145
20	1,4691	0,6561	0,7851	1,9758
25	1,2625	0,6917	0,7824	1,9037
50	0,2864	1,0288	0,7780	1,8996
75	0,7801	0,7604	0,7849	2,2528
100	1,0971	0,6783	0,7649	2,5677

Tabla 6.8 Coeficientes de curvas IDF de la zona al norte de la latitud 23,65°S (1979-2020)

Periodo de retorno (años)	Coeficiente ajuste curvas IDF				Indicador de ajuste	
	K	m	n	b	r (-)	RMSE (mm)
2	0,3781	0,4391	0,4455	-0,0460	0,926	0,04
5	1,9919	0,4676	0,7433	1,0938	0,998	0,02
10	0,5768	1,1482	0,7759	1,3895	0,998	0,05
20	0,6002	1,0471	0,8075	1,8419	0,998	0,07
25	0,2544	1,2545	0,7808	1,6705	0,997	0,09
50	0,3896	1,0113	0,7904	1,8665	0,996	0,13
75	2,5395	0,5507	0,8031	2,368	0,991	0,22
100	1,9579	0,6214	0,7955	2,8112	0,981	0,35

Tabla 6.9 Coeficientes de curvas IDF de la zona al sur de la latitud 23,65°S (1979-2020)

Periodo de retorno (años)	Coeficiente ajuste curvas IDF				Indicador de ajuste	
	K	m	n	b	r (-)	RMSE (mm)
2	1,2869	0,9761	0,8565	5,6114	0,900	0,03
5	1,0918	1,0033	0,6820	2,0922	0,978	0,07
10	7,7658	0,1648	0,7388	2,3260	0,989	0,09
20	0,8149	1,0022	0,7279	2,0605	0,989	0,15
25	2,2961	0,6751	0,7619	2,3531	0,989	0,17
50	0,8613	0,8867	0,7700	2,3318	0,991	0,23
75	2,7137	0,5821	0,7856	2,4166	0,989	0,30
100	2,5034	0,6128	0,8070	2,7934	0,977	0,49

6.5. PROYECCIONES FUTURAS DE PRECIPITACIÓN EN EL PERIODO 2035-2065

6.5.1. Aspectos generales

De acuerdo con las bases del estudio, se ha seleccionado el escenario RCP 8.5, definido como el más desfavorable en término de las emisiones de gases de efecto invernadero, y las proyecciones de precipitación de cuatro modelos climáticos empleados en estudios como la Actualización del Balance Hídrico Nacional y ARClim para realizar proyecciones hacia el período 2035-2065.

Estos modelos tienen una resolución espacial gruesa (> 100 km), por lo que, a través de un proceso de escalamiento y corrección de sesgo, se proyectan las variables climáticas futuras para luego realizar los análisis que permitan derivar las curvas IDF futuras y evaluar los cambios respecto del período base.

6.5.2. Procedimiento seguido

El procedimiento seguido para determinar las series de tiempo proyectadas hacia el periodo 2035-2065 correspondientes al dominio de interés consistió en realizar un escalamiento de los MCG a partir de una interpolación lineal al centroide de la grilla CR2MET y en efectuar una corrección por

sesgo de los montos diarios de precipitación en el periodo 1980-2065, especialmente agregados a escala de cuenca.

En primer lugar, se descargó la información de precipitación diaria y temperaturas extremas para cuatro modelos de circulación general (MCG) en el periodo 1980-2065 y escenario RCP8.5.

Dichos MCG corresponden a CCSM4, CSIRO-Mk3-6-0, IPSL-CM5A-LR y MIROC-ESM, y se enmarcan en la quinta fase del Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados (CMIP5; Taylor et al., 2012).

La elección de los modelos antes indicados radica en su utilización en proyectos como la Actualización del Balance Hídrico Nacional (DGA, 2019a, 2019b, 2018, 2017) y ARClim (Pica-Télez et al., 2020), donde fueron seleccionados dada su buena representación de modos de variabilidad (e.g., El Niño Oscilación Sur), patrones climáticos locales y definir diferentes condiciones de sensibilidad climática a los aumentos en las concentraciones de gases de efecto invernadero (DGA, 2017).

Para adquirir las simulaciones asociadas a los diferentes MCG, se utilizó la base de datos de simulaciones climáticas del CR2 (<https://simulaciones.cr2.cl/>).

Así, una vez descargados, los MCG se escalaron estadísticamente a partir de una interpolación lineal al centroide de la grilla CR2MET y se estimaron los valores agregados a escala de cuenca.

Los montos diarios de precipitación en el periodo 1980-2065, especialmente agregados a escala de cuenca, se corrigieron por sesgo utilizando el método “Multivariate Bias Correction” (MBCn; Cannon, 2018), el cual utiliza como base el método “Quantile Delta Mapping” ((QDM; Cannon et al., 2015) pero representando de manera explícita la codependencia que existe entre variables meteorológicas a través de un análisis multivariado.

Así, se corrigieron de manera simultánea las precipitaciones en las diferentes cuencas y se incluye la temperatura mínima y la amplitud térmica como variables codependientes.

Para ello se definió el periodo 1980-2020 como base de corrección (periodo climatológico de referencia) y se aplica la corrección de manera secuencial agrupando por meses el análisis (e.g., se corrigen los sesgos en los registros de eneros sólo considerando la información del resto de los eneros en el periodo de análisis).

6.5.3. Desagregación horaria de la precipitación

Con los montos de precipitación diaria corregidos por sesgo se procedió a desagregar a nivel horario dichos valores, lo cual se realizó utilizando el enfoque del vecino más cercano (KNN; Wilks, 2011) o, en otras palabras, a partir de la búsqueda de símiles meteorológico.

Según dicho enfoque, para un valor de interés se busca dentro de una serie de datos de referencia (periodo histórico) el valor que más se acercan (vecino) en términos de, por ejemplo, monto de precipitación, mes de ocurrencia y temperatura y se asigna la distribución horaria asociada al símil.

Una de las observaciones derivadas de capítulos anteriores corresponde a la imposibilidad de atribuir un patrón de distribución de precipitaciones a la magnitud de la misma. En consecuencia, por consistencia, el método de símiles meteorológicos no puede basarse sólo en la precipitación para la búsqueda de los símiles.

Así, se divide el análisis según grupos mensuales (se comparan, por ejemplo, todos los abrils para la búsqueda) y se incorpora la temperatura máxima y mínima diaria como indicador de símiles climáticos bajo el supuesto de que los eventos de precipitación pueden tener un impacto sobre dichos valores (mayor precipitación disminuye la amplitud térmica diaria) y, por lo tanto, pueden condicionar la distribución de la precipitación.

Si bien el método propuesto tiene asociada una incertidumbre intrínseca y supone que las distribuciones del pasado pueden repetirse en el futuro, permite desagregar de manera coherente la variable, sin la necesidad de supuestos adicionales sobre la distribución (ajustar una función de probabilidad).

6.5.4. Ajuste de Análisis de Frecuencia en el periodo 1979-2020

De los resultados obtenidos del análisis de frecuencia de los máximos de precipitación anual en diferentes duraciones derivados de CR2MET y los cuatro MCG en estudio para una de las quebradas, se desprende la necesidad de aplicar una corrección, pues en algunos casos la estimación base (CR2MET) puede tener diferencias significativas respecto a los MCG (precipitación en 12 hrs).

Así, bajo el supuesto de que los sesgos detectados en el periodo histórico 1979-2020 entre CR2MET y el MCG son proporcionales y se preservan en el periodo futuro 2035-2065, se ajustaron los montos de precipitación acumulada en N horas para asegurar que en el periodo histórico 1979-2020 las estimaciones derivadas de CR2MET y los MCG fueran compatibles y equivalentes.

6.5.5. Estimación de la recurrencia anual de eventos de precipitación del periodo 2035-2065

Con el objetivo de caracterizar la recurrencia anual de precipitaciones, al igual que en el periodo histórico, se estimó la fracción de días con lluvia por año en el periodo 2035-2065 imponiendo diferentes umbrales de precipitación a modo de dar cuenta de la detección de lluvia (eventos mayores a 0,1 mm) a eventos tipificados como lluvia ligera ($P > 1$ mm), moderada ($P > 5$ mm), fuerte ($P > 20$ mm) y violenta ($P > 40$ mm) según los valores propuestos por Báez-Villanueva et al. (2020).

De este modo, la discretización anterior da cuenta de la fracción de días del año en que, en promedio, se excede o iguala el valor umbral.

Lo anterior se estima de manera individual según las estadísticas derivadas para cada MCG, según lo cual posteriormente se determina el promedio entre dichos modelos.

Los resultados obtenidos muestran una disminución de las precipitaciones mayores o iguales a 0,1 mm respecto al periodo histórico y, en general, de la mayoría de los eventos de precipitación según la discretización propuesta. También es interesante hacer notar que las estadísticas señalan eventos por sobre los 40 mm/día en cuencas donde, en el periodo histórico, no se registraban estos eventos.

Por ejemplo, el máximo de días con lluvias mayores o iguales a 0,1 mm se reduciría en prácticamente la mitad en quebradas como N0 y S3.

Las precipitaciones mayores o iguales a 1 mm/día tendrían una disminución del valor promedio en torno del 1% respecto al periodo histórico, es decir, disminuye en 3-4 días.

Las precipitaciones mayores o iguales a 5 mm/día se mantendría en términos del promedio en el periodo, pero la máxima recurrencia de este tipo de eventos disminuiría en torno a 0,1%-0,3% (~1 día).

Las precipitaciones mayores o iguales a 20 mm/día y 40 mm/día si bien no muestran cambios en el valor promedio en el periodo futuro respecto al periodo histórico, sí presentan una disminución en la máxima recurrencia anual de este tipo de eventos.

No obstante, eventos de 40 mm/día se observan en quebradas que en el periodo histórico no exhibían estas magnitudes de precipitación.

En consecuencia, si bien los resultados anteriores dejan entrever una potencial disminución de los eventos de precipitación, se desprende que éstos se podrían intensificar respecto a lo estimado en el periodo histórico.

Adicionalmente, se debe precisar que el análisis anterior se basa en las precipitaciones diarias, por lo que no se puede derivar ningún comentario respecto a cambios en la intensidad de precipitación asociada a eventos de duraciones menores.

6.5.6. Determinación de curvas IDF según estadísticas del periodo 2035-2065

A partir de la misma metodología presentada para determinar las 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.

Los resultados muestran que, en promedio, la intensidad de precipitación futura aumentaría entre aproximadamente 50% a 75% en la zona no urbana y, en menor grado, de 18% a 50% en la zona urbana respecto al periodo de referencia. Del mismo modo, el caso más desfavorable lo define el MCG MIROC-ESM, con cambios, incluso, por sobre el 100% dependiendo de la duración y el periodo de retorno comparado (se duplica la intensidad del periodo de referencia).

Por el contrario, el modelo CSIRO-Mk3-6-0 define el caso más optimista, con los cambios más favorables dentro del conjunto de MCG evaluados. Más aún, en general se observan disminuciones en las estimaciones de la intensidad de precipitación reportadas por el modelo en cuestión.

Adicionalmente, tanto para la zona no urbana como urbana, las proyecciones apuntan a un aumento de las intensidades medias de precipitación respecto a las reportadas para el periodo histórico 1979-2020.

Ahora bien, dicho valor resulta mayor en la zona no urbana en comparación a la zona urbana, donde el promedio de las proyecciones apunta a aumentos en torno al 20%-30% respecto al periodo histórico para duraciones cortas (1-3 hrs.), mientras que en la zona no urbana estos valores exceden el 50%.

A su vez, los resultados muestran que, a medida que aumenta la duración, en general, se intensifica el aumento en la intensidad de precipitación respecto al caso base (mayor aumento futuro en la intensidad media de precipitación a mayor duración).

Considerando las diferencias entre las proyecciones de cambio en las intensidades medias de precipitación derivadas los MCG, para efectos prácticos se utilizó el valor promedio de las intensidades derivadas de cada MCG según cada periodo de retorno.

En otras palabras, se supuso que el promedio de las curvas IDF derivadas para cada MCG en el periodo 2035-2065 es una buena aproximación de los potenciales cambios futuros.

La Tabla 6.10 y la Tabla 6.11 resumen los valores propuestos para evaluar los impactos sobre las intensidades medias de precipitación del cambio climático sobre la zona no urbana y urbana, respectivamente, para diferentes duraciones (D) y periodos de retorno (T).

Tabla 6.10 Curvas IDF promedio entre MCG para la zona no urbana en periodo 2035-2065

D (hrs)	Intensidad media de precipitación en mm/hr							
	T=2 años	T=5 años	T=10 años	T=20 años	T=25 años	T=50 años	T=75 años	T=100 años
1	1,077	3,246	5,513	8,487	9,486	12,746	14,740	16,193
2	0,688	2,464	4,379	6,755	7,558	10,134	11,738	13,104
3	0,537	2,064	3,761	5,803	6,492	8,688	10,078	11,386
4	0,452	1,810	3,353	5,170	5,782	7,724	8,972	10,233
5	0,396	1,629	3,055	4,707	5,262	7,019	8,164	9,384
6	0,356	1,492	2,825	4,349	4,860	6,474	7,538	8,723
7	0,326	1,384	2,641	4,061	4,536	6,035	7,034	8,188
8	0,302	1,296	2,488	3,823	4,267	5,671	6,616	7,743
9	0,282	1,222	2,359	3,621	4,040	5,364	6,263	7,365
10	0,265	1,159	2,248	3,447	3,844	5,099	5,959	7,038
11	0,251	1,104	2,151	3,295	3,674	4,868	5,694	6,752
12	0,239	1,056	2,065	3,161	3,523	4,664	5,460	6,498
13	0,229	1,014	1,989	3,042	3,388	4,483	5,251	6,271

D (hrs)	Intensidad media de precipitación en mm/hr							
	T=2 años	T=5 años	T=10 años	T=20 años	T=25 años	T=50 años	T=75 años	T=100 años
14	0,219	0,976	1,920	2,934	3,268	4,320	5,063	6,067
15	0,211	0,942	1,858	2,837	3,158	4,172	4,893	5,881
16	0,203	0,911	1,801	2,749	3,058	4,038	4,738	5,711
17	0,197	0,882	1,749	2,667	2,967	3,915	4,597	5,556
18	0,190	0,857	1,702	2,593	2,883	3,802	4,466	5,412
19	0,185	0,833	1,657	2,524	2,805	3,697	4,346	5,279
20	0,180	0,811	1,616	2,460	2,733	3,600	4,234	5,155
21	0,175	0,790	1,578	2,400	2,666	3,510	4,130	5,040
22	0,170	0,771	1,542	2,344	2,604	3,426	4,033	4,932
23	0,166	0,753	1,509	2,292	2,545	3,347	3,942	4,830
24	0,162	0,736	1,478	2,243	2,490	3,273	3,856	4,735

Tabla 6.11 Curvas IDF promedio entre MCG para la zona urbana en periodo 2035-2065

D (hrs)	Intensidad media de precipitación en mm/hr							
	T=2 años	T=5 años	T=10 años	T=20 años	T=25 años	T=50 años	T=75 años	T=100 años
1	0,398	1,658	2,949	4,308	4,896	6,459	7,480	8,130
2	0,268	1,115	2,254	3,549	4,011	5,409	6,303	6,927
3	0,219	0,912	1,917	3,093	3,486	4,742	5,544	6,150
4	0,189	0,795	1,701	2,775	3,121	4,260	4,993	5,580
5	0,169	0,717	1,546	2,534	2,848	3,889	4,567	5,136
6	0,154	0,660	1,428	2,344	2,632	3,591	4,226	4,777
7	0,142	0,615	1,333	2,188	2,456	3,345	3,943	4,479
8	0,132	0,579	1,254	2,056	2,309	3,138	3,705	4,226
9	0,124	0,549	1,188	1,944	2,184	2,961	3,501	4,008
10	0,117	0,523	1,131	1,847	2,076	2,807	3,324	3,818
11	0,111	0,502	1,081	1,762	1,981	2,671	3,167	3,650
12	0,106	0,482	1,037	1,686	1,896	2,551	3,029	3,501
13	0,101	0,465	0,998	1,619	1,821	2,444	2,904	3,367
14	0,097	0,450	0,963	1,558	1,753	2,347	2,793	3,246
15	0,093	0,437	0,932	1,502	1,692	2,260	2,691	3,136
16	0,090	0,424	0,903	1,452	1,636	2,180	2,598	3,036
17	0,087	0,413	0,877	1,405	1,584	2,107	2,514	2,944
18	0,084	0,403	0,852	1,363	1,537	2,040	2,435	2,859
19	0,082	0,393	0,830	1,323	1,493	1,977	2,363	2,780
20	0,079	0,385	0,809	1,287	1,452	1,920	2,296	2,707
21	0,077	0,376	0,790	1,253	1,414	1,866	2,234	2,640
22	0,075	0,369	0,772	1,221	1,379	1,817	2,176	2,576
23	0,073	0,362	0,755	1,191	1,346	1,770	2,121	2,517
24	0,072	0,355	0,739	1,163	1,315	1,726	2,070	2,461

6.6. CAUDALES DE CRECIDA DURANTE EVENTOS DE PRECIPITACIONES EXTREMAS

6.6.1. Crecidas calculadas con base en datos del periodo histórico 1979-2020

Considerando las características geomorfológicas de varias de las cuencas de estudio, las cuales corresponden principalmente a quebradas con área aportante menor a 15 km², los caudales líquidos máximos instantáneos se estimaron mediante método racional (DGA, 1995), definido según la siguiente expresión:

$$QMI (m^3/s) = \frac{c \cdot i(t_c) \cdot A}{3,6}$$

Donde c es el coeficiente de escorrentía, y la intensidad media “ i ” en el tiempo de concentración “ t_c ” está dada en mm/hr y el área aportante (A) en km².

Para quebradas donde el tiempo de concentración es mayor a 1 hora, la intensidad media de precipitación se obtuvo de la interpolación de las curvas IDF, pero dado que la mayoría de las quebradas tiene asociados tiempos de concentración menores a 60 minutos, se utilizó la fórmula de Bell para estimar la intensidad de precipitación en dicho tiempo.

Así, a partir de la precipitación en una hora asociada al periodo de retorno T ($P^T(D = 1 \text{ hr})$) y el tiempo (t minutos) en que ocurre la tormenta, se calculó la intensidad media en el tiempo de concentración (t_c) según la expresión:

$$i^T(t_c) = \frac{(0,54 \cdot t_c^{0,25} - 0,5) \cdot P^T(D = 1 \text{ hr})}{(t_c/60)}$$

Donde t_c está expresado en minutos y la intensidad en el tiempo de concentración para el periodo de retorno T ($i^T(t_c)$) queda expresada en mm/hr.

Las intensidades de precipitación estimadas para el tiempo de concentración se resumen en Tabla 6.12, para cada una de las quebradas de interés, y los caudales máximos instantáneos asociados, se resumen en la Tabla 6.13.

Tabla 6.12 Intensidad media de precipitación en quebradas periodo histórico 1979-2020

Quebrada	t_c (min)	Intensidad de precipitación en el tiempo de concentración indicado (mm/hr)							
		T=2 años	T=5 años	T=10 años	T=20 años	T=25 años	T=50 años	T=75 años	T=100 años
N0	60	0,5	2,0	3,4	5,4	6,0	8,3	9,8	11,1
N1	60	0,5	2,0	3,4	5,4	6,0	8,3	9,8	11,1
N2	19	1,0	4,0	6,7	10,7	11,9	16,4	19,4	22,0
Varas Norte	18	1,0	4,1	6,9	11,0	12,2	16,9	20,0	22,7
Varas Sur	10	1,4	5,5	9,4	14,9	16,6	22,9	27,1	30,7
La Chimba	64	0,5	1,9	3,3	5,2	5,8	8,0	9,4	10,7
La Roca	15	1,1	4,5	7,7	12,2	13,5	18,7	22,1	25,0

Quebrada	t _c (min)	Intensidad de precipitación en el tiempo de concentración indicado (mm/hr)							
		T=2 años	T=5 años	T=10 años	T=20 años	T=25 años	T=50 años	T=75 años	T=100 años
Club Hípico	27	0,8	3,2	5,5	8,8	9,7	13,5	15,9	18,0
Bonilla Norte	24	0,9	3,5	5,9	9,4	10,4	14,4	17,0	19,3
Bonilla Sur	30	0,8	3,1	5,2	8,2	9,2	12,7	15,0	17,0
Farellones	35	0,7	2,8	4,7	7,5	8,4	11,6	13,7	15,5
La Cadena	56	0,5	2,1	3,6	5,7	6,3	8,7	10,3	11,6
El Ancla	21	0,9	3,7	6,4	10,1	11,2	15,6	18,4	20,8
Riquelme	10	1,4	5,5	9,4	14,9	16,6	22,9	27,1	30,7
Baquedano	13	1,2	4,8	8,2	13,1	14,5	20,1	23,8	26,9
Uribe	12	1,3	5,1	8,6	13,6	15,2	21,0	24,7	28,0
El Toro	36	0,7	2,7	4,7	7,4	8,2	11,4	13,4	15,2
Caliche Norte	16	1,1	4,4	7,4	11,7	13,1	18,1	21,3	24,1
Caliche Sur	13	1,2	4,8	8,2	13,1	14,5	20,1	23,8	26,9
Jardín del sur	44	0,6	2,4	4,1	6,6	7,3	10,1	11,9	13,5
Huáscar	25	0,8	3,4	5,8	9,2	10,2	14,1	16,6	18,8
Roca Roja	180	0,4	1,0	1,7	2,7	3,0	4,1	4,8	5,5
Universidad de Antofagasta	10	1,4	5,5	9,4	14,9	16,6	22,9	27,1	30,7
S1	10	1,4	5,5	9,4	14,9	16,6	22,9	27,1	30,7
S2	10	1,4	5,5	9,4	14,9	16,6	22,9	27,1	30,7
S3	14	1,2	4,7	7,9	12,6	14,0	19,4	22,9	25,9

Tabla 6.13 Caudal máximo instantáneo en el periodo histórico 1979-2020

Quebrada	t _c (min)	Área (km ²)	C (-)	Caudal máximo instantáneo - Método Racional (m ³ /s)							
				T=2 años	T=5 años	T=10 años	T=20 años	T=25 años	T=50 años	T=75 años	T=100 años
N0	60	14,05	0,45	0,9	3,5	6,0	9,5	10,6	14,6	17,3	19,6
N1*	60	19,50	0,45	1,2	4,9	8,3	13,2	14,7	20,3	24,0	27,1
N2	19	1,86	0,55	0,3	1,1	1,9	3,0	3,4	4,7	5,5	6,2
Varas Norte	18	2,51	0,55	0,4	1,6	2,7	4,2	4,7	6,5	7,7	8,7
Varas Sur	10	0,59	0,50	0,1	0,5	0,8	1,2	1,4	1,9	2,2	2,5
La Chimba*	64	25,74	0,40	1,4	5,5	9,4	14,9	16,5	22,9	27,0	30,6
La Roca	15	1,63	0,60	0,3	1,2	2,1	3,3	3,7	5,1	6,0	6,8
Club Hípico	27	3,86	0,50	0,4	1,7	3,0	4,7	5,2	7,2	8,5	9,7
Bonilla Norte	24	3,25	0,50	0,4	1,6	2,7	4,2	4,7	6,5	7,7	8,7
Bonilla Sur	30	5,64	0,50	0,6	2,4	4,1	6,5	7,2	9,9	11,7	13,3
Farellones	35	4,40	0,60	0,5	2,0	3,5	5,5	6,1	8,5	10,0	11,4
La Cadena*	56	21,40	0,40	1,2	5,0	8,5	13,4	14,9	20,7	24,4	27,6
El Ancla	21	1,15	0,45	0,1	0,5	0,9	1,5	1,6	2,2	2,6	3,0
Riquelme	10	0,16	0,75	0,0	0,2	0,3	0,5	0,6	0,8	0,9	1,0
Baquedano	13	0,75	0,80	0,2	0,8	1,4	2,2	2,4	3,4	4,0	4,5
Uribe	12	0,68	0,85	0,2	0,8	1,4	2,2	2,4	3,4	4,0	4,5

Quebrada	t _c (min)	Área (km ²)	C (-)	Caudal máximo instantáneo - Método Racional (m ³ /s)							
				T=2 años	T=5 años	T=10 años	T=20 años	T=25 años	T=50 años	T=75 años	T=100 años
El Toro	36	4,61	0,60	0,5	2,1	3,6	5,7	6,3	8,7	10,3	11,7
Caliche Norte	16	1,10	0,80	0,3	1,1	1,8	2,9	3,2	4,4	5,2	5,9
Caliche Sur	13	0,70	0,80	0,2	0,8	1,3	2,0	2,3	3,1	3,7	4,2
Jardín del sur	44	7,73	0,60	0,8	3,1	5,3	8,5	9,4	13,0	15,3	17,4
Huáscar	25	2,33	0,60	0,3	1,3	2,2	3,6	4,0	5,5	6,5	7,3
Roca Roja*	180	187,2 6	0,12	2,5	6,2	10,5	16,6	18,5	25,5	30,1	34,1
U. de Antofagasta	10	0,75	0,55	0,2	0,6	1,1	1,7	1,9	2,6	3,1	3,5
S1	10	0,23	0,40	0,0	0,1	0,2	0,4	0,4	0,6	0,7	0,8
S2	10	0,23	0,45	0,0	0,2	0,3	0,4	0,5	0,7	0,8	0,9
S3	14	1,02	0,38	0,1	0,5	0,9	1,4	1,5	2,1	2,5	2,8

*Quebradas donde la aplicación del método racional escapa al rango de validez.

6.6.2. Crecidas calculadas con base en datos del periodo futuro 2035-2065

De manera análoga al periodo histórico 1979-2020, en la Tabla 6.14 se resumen las intensidades medias en el tiempo de concentración a partir del promedio de las curvas IDF obtenidas de los 4 MCG empleados.

Asimismo, la Tabla 6.15 detalla los caudales máximos instantáneos, promedio entre los MCG (promedio entre los cuatro QMI por quebrada y periodo de retorno), estimados mediante el método racional aplicado a las precipitaciones extremas en escenario de cambio climático.

Tabla 6.14 Intensidad media de precipitación en quebradas periodo futuro 2035-2065

Quebrada	Intensidad de precipitación en el tiempo de concentración promedio entre MCG (mm/hr)							
	T=2 años	T=5 años	T=10 años	T=20 años	T=25 años	T=50 años	T=75 años	T=100 años
N0	1,1	3,3	5,5	8,5	9,5	12,8	14,7	16,2
N1	1,1	3,3	5,5	8,5	9,5	12,8	14,7	16,2
N2	2,2	6,4	10,9	16,8	18,8	25,3	29,2	32,1
Varas Norte	2,2	6,6	11,3	17,3	19,4	26,1	30,1	33,1
Varas Sur	3,0	9,0	15,2	23,5	26,2	35,2	40,7	44,7
La Chimba	1,0	3,2	5,4	8,3	9,3	12,5	14,5	15,9
La Roca	2,4	7,3	12,4	19,1	21,4	28,7	33,2	36,4
Club Hípico	1,8	5,3	9,0	13,8	15,4	20,7	24,0	26,3
Bonilla Norte	1,9	5,7	9,6	14,8	16,5	22,2	25,6	28,2
Bonilla Sur	1,6	5,0	8,4	13,0	14,5	19,5	22,5	24,7
Farellones	1,5	4,5	7,7	11,9	13,2	17,8	20,6	22,6
La Cadena	1,1	3,4	5,8	8,9	9,9	13,4	15,4	17,0
El Ancla	2,0	6,1	10,4	15,9	17,8	23,9	27,6	30,4
Riquelme	3,0	9,0	15,2	23,5	26,2	35,2	40,7	44,7
Baquadano	2,6	7,9	13,4	20,6	23,0	30,9	35,7	39,3

Quebrada	Intensidad de precipitación en el tiempo de concentración promedio entre MCG (mm/hr)							
	T=2 años	T=5 años	T=10 años	T=20 años	T=25 años	T=50 años	T=75 años	T=100 años
Uribe	2,7	8,2	13,9	21,4	24,0	32,2	37,2	40,9
El Toro	1,5	4,5	7,6	11,7	13,0	17,5	20,2	22,2
Caliche Norte	2,4	7,1	12,0	18,5	20,6	27,7	32,1	35,2
Caliche Sur	2,6	7,9	13,4	20,6	23,0	30,9	35,7	39,3
Jardín del Sur	1,3	3,9	6,7	10,3	11,5	15,5	17,9	19,7
Huáscar	1,8	5,5	9,4	14,4	16,1	21,7	25,0	27,5
Roca Roja	0,6	2,1	3,8	5,8	6,5	8,7	10,1	11,4
U. de Antofagasta	3,0	9,0	15,2	23,5	26,2	35,2	40,7	44,7
S1	3,0	9,0	15,2	23,5	26,2	35,2	40,7	44,7
S2	3,0	9,0	15,2	23,5	26,2	35,2	40,7	44,7
S3	2,5	7,6	12,9	19,8	22,1	29,8	34,4	37,8

Tabla 6.15 Caudal máximo instantáneo en el periodo futuro 2035-2065

Quebrada	Caudal máximo instantáneo promedio entre MCG - Método Racional (m³/s)						
	T=5 años	T=10 años	T=20 años	T=25 años	T=50 años	T=75 años	T=100 años
N0	5,7	9,7	14,9	16,7	22,4	25,9	28,4
N1*	7,9	13,5	20,7	23,1	31,1	35,9	39,5
N2	1,8	3,1	4,8	5,3	7,2	8,3	9,1
Varas Norte	2,6	4,3	6,7	7,4	10,0	11,6	12,7
Varas Sur	0,7	1,3	2,0	2,2	2,9	3,4	3,7
La Chimba*	9,1	15,4	23,8	26,5	35,7	41,4	45,5
La Roca	2,0	3,4	5,2	5,8	7,8	9,1	9,9
Club Hípico	2,8	4,8	7,4	8,3	11,1	12,9	14,1
Bonilla Norte	2,6	4,4	6,7	7,5	10,0	11,6	12,7
Bonilla Sur	3,9	6,6	10,2	11,4	15,3	17,7	19,4
Farellones	3,4	5,6	8,7	9,7	13,0	15,1	16,6
La Cadena*	8,1	13,7	21,2	23,6	31,8	36,7	40,3
El Ancla	0,9	1,5	2,3	2,6	3,4	4,0	4,4
Riquelme	0,3	0,5	0,8	0,8	1,2	1,4	1,5
Baquedano	1,3	2,2	3,4	3,8	5,1	5,9	6,6
Uribe	1,4	2,2	3,4	3,9	5,1	6,0	6,5
El Toro	3,4	5,8	8,9	10,0	13,4	15,5	17,0
Caliche Norte	1,8	3,0	4,6	5,0	6,8	7,8	8,6
Caliche Sur	1,3	2,1	3,2	3,5	4,8	5,6	6,1
Jardín del sur	5,0	8,6	13,3	14,9	19,9	23,1	25,4
Huáscar	2,1	3,6	5,6	6,2	8,4	9,7	10,7
Roca Roja*	12,9	23,4	36,2	40,6	54,3	63,0	71,0
U. de Antofagasta	1,0	1,8	2,7	3,0	4,0	4,7	5,1
S1	0,2	0,4	0,6	0,7	0,9	1,0	1,2
S2	0,3	0,5	0,7	0,8	1,0	1,2	1,3
S3	0,8	1,4	2,1	2,4	3,2	3,7	4,1

*Quebradas donde la aplicación del método racional escapa al rango de validez.

6.6.3. Comparación entre crecidas con base en datos de periodos 1979-2020 y 2035-2065

A objeto de analizar el cambio del caudal máximo QMI atribuido a los eventos de precipitación extrema en un contexto de cambio climático, la Tabla 6.16 resume las diferencias porcentuales entre los valores estimados para el periodo histórico 1979-2020 y el promedio del QMI estimado por MCG del periodo 2035-2065.

La comparación permite constatar que los cambios proyectados corresponden principalmente a variaciones positivas por sobre el 50% en la mayoría de los casos comparados. A su vez se observa que los cambios en periodos de retorno altos son relativamente menores a los asociados a periodos bajos.

Lo anterior da cuenta de la posibilidad de que las lluvias más recurrentes tengan una mayor magnitud en el futuro y, en consecuencia, las crecidas generadas aumenten su magnitud. Por ejemplo, para el periodo de retorno 5 años, la quebrada N0 muestra un aumento de 2,2 m³/s, la cual se asociada a un aumento de 1,3 mm/hr en la intensidad de precipitación correspondiente.

Tabla 6.16 Cambio porcentual del QMI del periodo 2035-2065 respecto al periodo 1979-2020

Quebrada	Cambio porcentual QMI entre periodo 1979-2020 y 2035-2065						
	T=5 años	T=10 años	T=20 años	T=25 años	T=50 años	T=75 años	T=100 años
N0	62%	62%	57%	58%	53%	50%	45%
N1*	62%	62%	57%	57%	53%	50%	46%
N2	60%	62%	58%	57%	54%	50%	46%
Varas Norte	66%	62%	59%	58%	54%	51%	46%
Varas Sur	51%	60%	57%	56%	53%	51%	45%
La Chimba*	64%	65%	60%	60%	56%	53%	49%
La Roca	58%	60%	59%	58%	54%	52%	45%
Club Hípico	61%	62%	57%	59%	54%	50%	45%
Bonilla Norte	66%	65%	58%	59%	54%	51%	46%
Bonilla Sur	63%	62%	58%	59%	54%	51%	46%
Farellones	62%	64%	57%	57%	54%	51%	46%
La Cadena*	63%	62%	58%	58%	54%	50%	46%
El Ancla	67%	64%	58%	61%	52%	51%	47%
Riquelme	70%	66%	47%	51%	64%	50%	43%
Baquedano	63%	62%	58%	59%	54%	48%	47%
Uribe	65%	59%	57%	61%	50%	49%	46%
El Toro	63%	62%	56%	58%	53%	50%	46%
Caliche Norte	64%	65%	57%	58%	53%	50%	46%
Caliche Sur	72%	64%	57%	55%	53%	51%	46%
Jardín del sur	61%	62%	57%	59%	53%	51%	46%
Huáscar	59%	61%	58%	59%	53%	50%	46%
Roca Roja*	110%	124%	118%	120%	113%	109%	108%
Universidad de	64%	62%	59%	57%	53%	50%	46%

Quebrada	Cambio porcentual QMI entre periodo 1979-2020 y 2035-2065						
	T=5 años	T=10 años	T=20 años	T=25 años	T=50 años	T=75 años	T=100 años
Antofagasta							
S1	69%	59%	62%	57%	46%	51%	46%
S2	69%	59%	62%	57%	46%	51%	46%
S3	67%	60%	56%	55%	53%	51%	46%

7. PATRÓN DE DRENAJE E IDENTIFICACIÓN DE SISTEMAS

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, descargan directamente en el área urbana de la ciudad de Antofagasta alcanzando eventualmente el borde costero para descargar finalmente en el mar.

Por este motivo, las vías preferenciales de escurrimiento en la ciudad se asocian directamente con los sistemas de quebradas, las que en total suman 27 dentro del área de estudio.

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 de Antofagasta del año 2000 (PM-26), la información satelital actualizada (Google Earth) y los antecedentes obtenidos de terreno, particularmente el levantamiento aerofotogramétrico de Antofagasta cuya extensión fue establecida en las bases.

La Información recopilada, procesada y analizada fue plasmada en planos, separando las cuencas no urbanas de la zona urbana, empleando para las primeras una escala 1:20.000 y para las segundas, 1:5.000.

En estos planos se identificaron y delimitaron los distintos sistemas que conforman el patrón de drenaje del área de estudio, asociados directamente a las quebradas y ellos constituyeron la base para desarrollar el diagnóstico de la situación actual del drenaje urbano de Antofagasta, como también para caracterizar las inundaciones asociadas las 5 quebradas incluidas en el estudio según las bases: N0, La Roca, Schneider, S2 y S3.

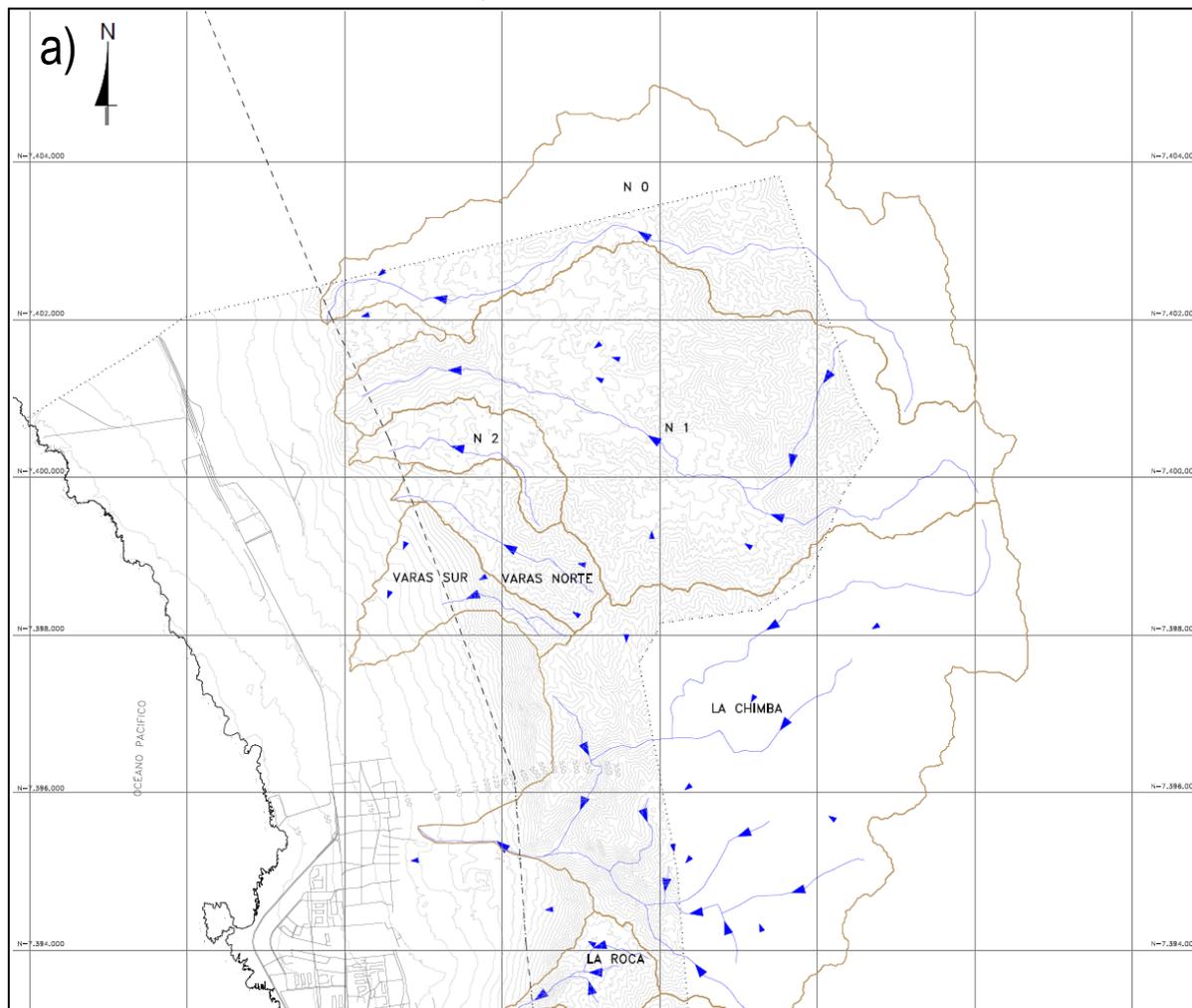
La Figura 7.1 se muestra un ejemplo del patrón de drenaje de cuencas no urbanas obtenido de planos 1:20.000 “Patrón de Drenaje de las Cuencas Aportantes”.

Por su parte, en la Figura 7.2 se muestra como ejemplo del patrón de drenaje de las cuencas urbanas, el de la cuenca de la quebrada Farellones, pero obtenido de los planos “Patrón de Drenaje de Cuencas Urbanas” en escala 1:5.000.

En la Figura 7.3, en tanto, se muestra como un segundo ejemplo de representación gráfica del patrón de drenaje de cuencas urbanas, el que corresponde a la cuenca de la quebrada Bonilla.

Figura 7.1 Patrón de drenaje de cuencas

a) Cuencas no urbanas



**Figura 7.1 Patrón de drenaje de cuencas
Cuencas no urbanas (continuación)**

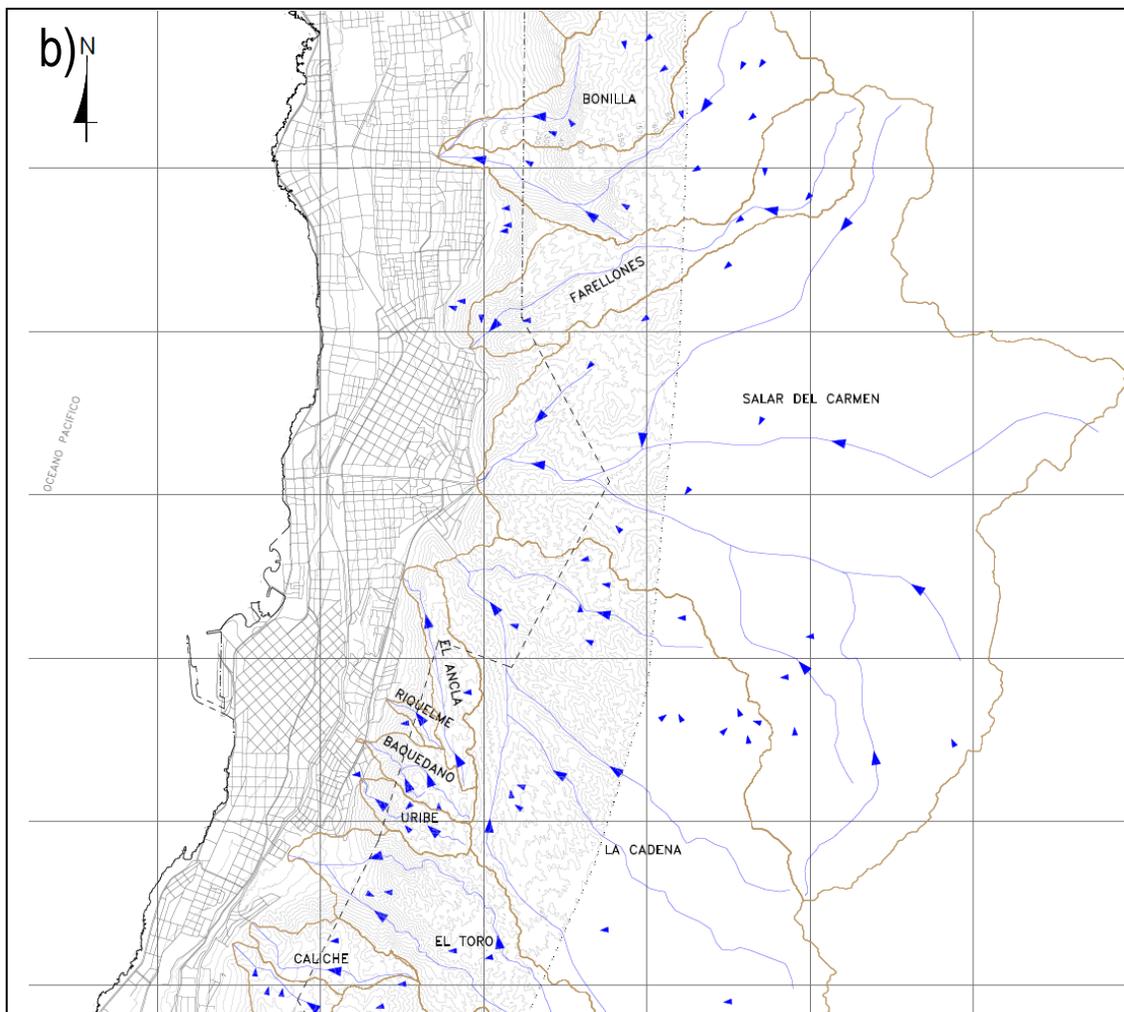
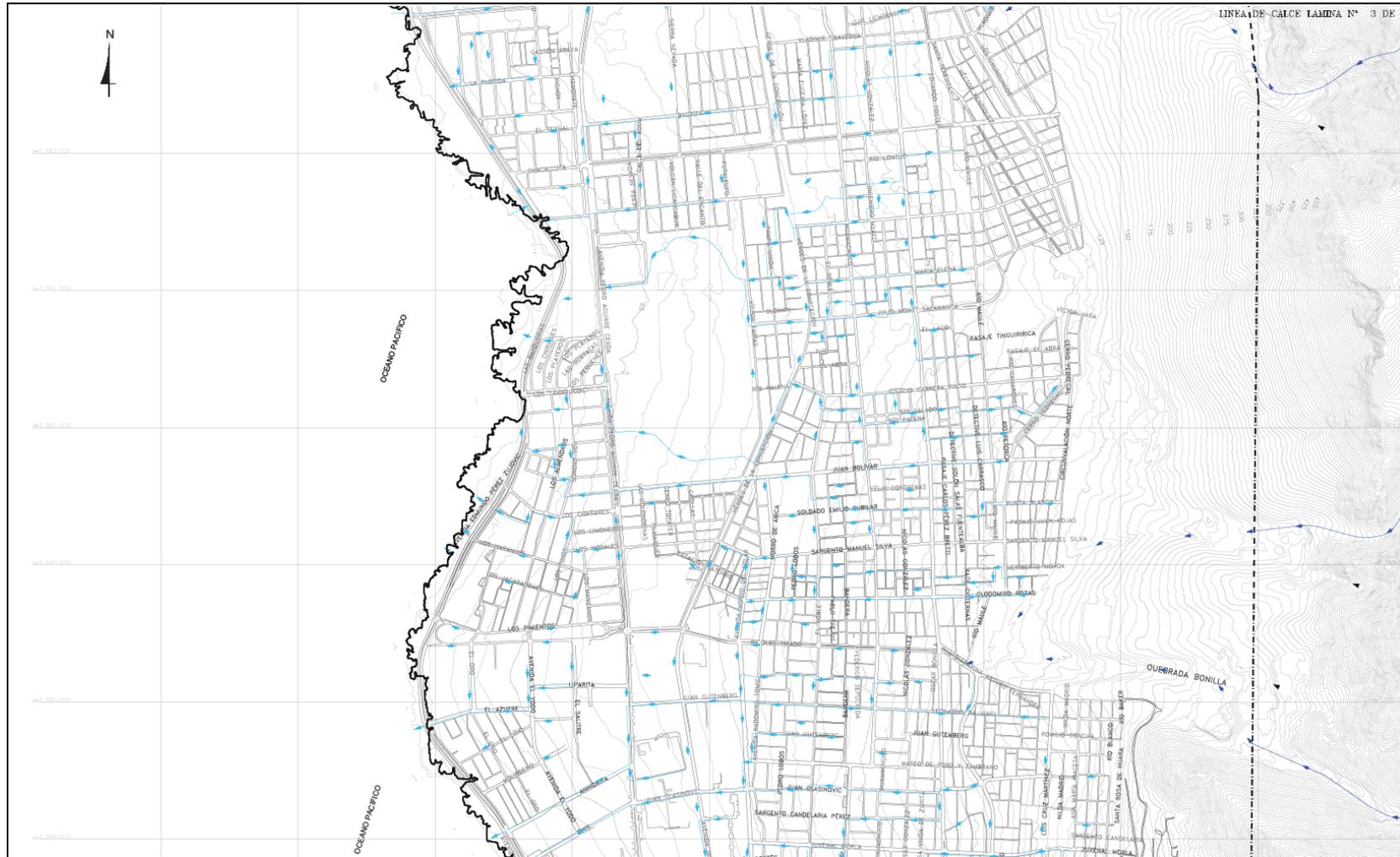


Figura 7.3 Patrón de drenaje de sistemas urbanos. Quebrada Bonilla y sectores aledaños



ACTUALIZACIÓN PLAN MAESTRO DE EVACUACIÓN Y DRENAJE DE AGUAS LLUVIAS DE ANTOFAGASTA

APRISA - AC INGENIEROS CONSULTORES LTDA

JOSE ANTONIO SOFFIA 2747 - OF. 011 - 012 - 013 - 014 - CODIGO POSTAL 6650363 – PROVIDENCIA, SANTIAGO, CHILE

TELEFONO (56-2) 2335 2252 – gerencia@aprisa.cl

Informe Final – Jun. 2022

8. MODELACIONES DEL ÁREA DE ESTUDIO PARA LA SITUACIÓN ACTUAL

8.1. MODELOS DESARROLLADAS

En el Anexo IX “Modelaciones HEC-RAS 2-D y EPA-SWMM del Área de Estudio para la Situación Actual”, se presenta la información de los modelos numéricos elaborados para realizar el diagnóstico de la situación actual del sistema de drenaje urbano de la ciudad de Antofagasta, los cuales fueron desarrollados para cada una de las 27 quebradas que descargan al plano urbano de la ciudad.

Considerando que del total de quebradas que atraviesan la ciudad, solo 2 de éstas cuentan con obras de drenaje de aguas lluvias construidas (Salar del Carmen y La Negra), se justifica el uso del software HEC-RAS–2D, donde la escorrentía generada durante las crecidas fluye superficialmente por las principales vías de drenaje en el plano urbano de Antofagasta, las que se conforman como ha sido señalado anteriormente, por las calles, avenidas, autopistas y en algunos casos, plazas y sitios baldíos o sitios y jardines de casas de la ciudad.

De esta manera, mediante las simulaciones realizadas con el software mencionado, se determinó por cuáles vías escurren las crecidas provenientes de las diferentes quebradas, identificando de esta manera las áreas afectas a inundación, profundidades del escurrimiento, velocidades del flujo, así como otras variables que permiten caracterizar los flujos de aguas lluvias sobre el plano urbano de la ciudad.

En cuanto al sistema Salar del Carmen, se cuenta con antecedentes básicos para verificar el dimensionamiento de las obras que consideran dos colectores subterráneos, estando el primero de ellos ubicado en la descarga de la quebrada del mismo nombre sobre el plano urbano de la ciudad, mientras que el segundo corresponde a un colector dispuesto en el extremo poniente de la Avenida Salvador Allende, el que permite el paso de las aguas lluvias por debajo de la Avenida Edmundo Pérez Zujovic (Costanera). Para analizar la situación de este sistema y elaborar el diagnóstico, se empleó aquí, además, el software EPA-SWMM.

En el presente capítulo se describe la metodología con la cual se elaboraron los modelos numéricos, y los datos de entrada utilizados con el objetivo de caracterizar los flujos detríticos y no detríticos (diluidos) generados por las diferentes quebradas que descargan hacia el plano urbano a lo largo de la ciudad de Antofagasta en la situación actual.

8.2. CARACTERIZACIÓN DE LAS CUENCAS EN ESTUDIO

8.2.1. Área de estudio

Como se ha señalado, forman parte del presente estudio las 27 cuencas identificadas que drenan hacia el plano urbano de la ciudad de Antofagasta.

Cabe mencionar que todas las quebradas se ubican al Este de plano urbano de la ciudad de Antofagasta, distribuyéndose entre los paralelos 23,45° y 23,74°.

8.2.2. Parámetros morfométricos

En la Tabla 8.1 se resumen los parámetros morfométricos de las cuencas que drenan hacia las quebradas analizadas, donde además del área se incluyó el Coeficiente de Escorrentía.

Tabla 8.1. Parámetros morfométricos de las cuencas

Quebrada	Área (km ²)	Coeficiente de escorrentía	Largo cauce principal (km)	Pendiente media cuenca (m/m)	Rango elevación (m)	Tiempo concentración (min)
N0	14,05	0,45	9,75	0,213	763	60
N1	19,5	0,45	9,48	0,263	785	60
N2	1,86	0,55	2,72	0,193	358	19
Varas Norte	2,51	0,55	2,83	0,289	489	18
Varas Sur	0,59	0,50	1,8	0,39	494	10
La Chimba	25,74	0,40	10,6	0,309	952	64
La Roca	1,63	0,60	2,78	0,33	661	15
Club Hípico	3,86	0,50	4,92	0,401	942	27
Bonilla Norte	3,25	0,50	4,29	0,319	821	24
Bonilla Sur	5,64	0,50	5,72	0,313	1024	30
Farellones	4,4	0,60	6,37	0,269	937	35
La Cadena	21,4	0,40	8,98	0,233	784	56
El Ancla	1,15	0,45	2,97	0,194	355	21
Schneider	0,13	0,75	0,67	0,29	211	10
Riquelme	0,16	0,75	1	0,317	250	10
Baquedano	0,75	0,80	1,96	0,3	356	13
Uribe	0,68	0,85	1,86	0,279	280	12
El Toro	4,61	0,60	5,91	0,28	658	36
Caliche Norte	1,1	0,80	2,37	0,259	383	16
Caliche Sur	0,7	0,80	1,75	0,21	243	13
Jardín del sur	7,73	0,55	6,6	0,184	554	44
Huáscar	2,33	0,60	3,8	0,145	433	25
Roca Roja	187,26	0,60	27,3	0,161	1136	180
Universidad de Antofagasta	0,75	0,12	1,47	0,3	392	10
S1	0,23	0,40	1,22	0,276	209	10
S2	0,23	0,45	1,18	0,247	216	10
S3	1,02	0,38	1,8	0,177	266	14

8.2.3. Precipitaciones máximas

A partir del análisis histórico realizado en el Anexo VIII, de las tormentas extremas en la ciudad de Antofagasta, se destaca el evento del año 1991, donde se registraron precipitaciones que tuvieron una intensidad media entre 5 mm/h y 14 mm/h. En total, las precipitaciones acumularon entre 14 mm y 42 mm según la estación pluviométrica consultada. La duración de la tormenta fue de 3 horas.

En cuanto a las intensidades, las conclusiones del Anexo VIII: “Análisis Hidrológico con Proyecciones de Cambio Climático”, existen patrones de precipitación sobre la zona de estudio,

donde se estima un aumento en las magnitudes de precipitación en la dirección sur, sectorizando el área en dos zonas, obteniendo un set de curvas IDF envolventes para cada una de estas.

Con el propósito de diagnosticar la situación actual del drenaje de las quebradas en el área de estudio, se analizaron las crecidas asociadas a los periodos de retorno de 25, 50 y 100 años, sin (basadas en registros pluviométricos del periodo histórico) y con la proyección de la variable de cambio climático al periodo 2035 -2065.

Para el periodo histórico, sin cambio climático, se determinaron curvas IDF representativas de todo el dominio de estudio, definida para el periodo de análisis histórico mediante la expresión siguiente:

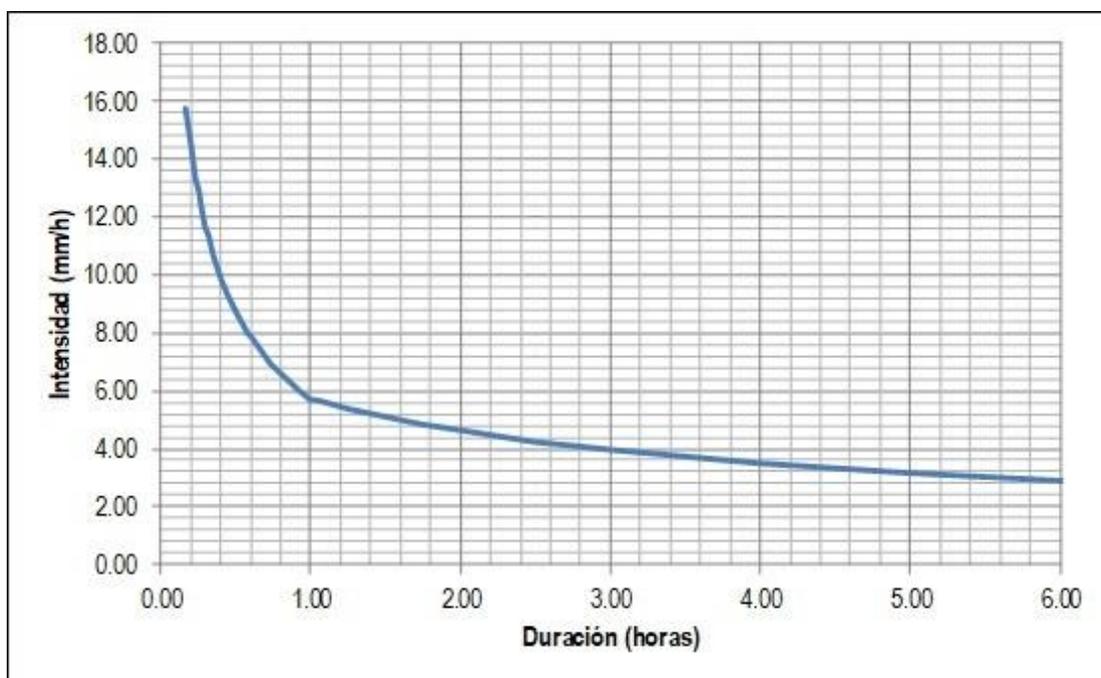
$$i^T(D) = \frac{K \cdot T^m}{D^n + b}$$

Donde, $I^T(D)$ es la intensidad de la lluvia de periodo de retorno T para una duración de la lluvia de D horas.

Por su parte, para la estimación de las curvas IDF asociadas al periodo 2035-2065 con proyección de cambio climático se utilizaron las curvas IDF correspondientes al promedio de los 4 modelos de circulación global aplicados (GCM), considerando los periodos de retorno de T=25, T=50 y T=100 años.

La Figura 8.1 ilustra gráficamente la curva IDF para T=25 años cuya determinación está asociada al periodo histórico sin cambio climático.

Figura 8.1 Curva IDF para T=25 años seleccionada para el periodo histórico



8.2.4. Caudales líquidos

Los caudales máximos líquidos se estimaron a partir del Método Racional, considerando el área aportante A (km^2) de cada cuenca, el coeficiente de escorrentía C correspondiente y las intensidades de precipitación I (mm/hr) obtenidas de las curvas IDF según lo detallado en la Tabla 8.1.

8.2.5. Caudales detríticos

A partir de los caudales máximos líquidos estimados mediante el Método Racional, se procedió a calcular los caudales máximos detríticos (Q_{det}), a partir de la siguiente expresión:

$$Q_{det} = \frac{Q_{liq}}{1 - C_v}$$

Donde Q_{liq} corresponde la caudal líquido de la crecida y C_v representa la concentración volumétrica de sólidos del flujo detrítico.

De acuerdo a lo que explica en el Anexo IX, analizando las características de la quebrada Bonilla y sus modelaciones, cuyo estudio se encontraba paralelamente en ejecución con el presente estudio, se adoptó un valor de $C_v = 0,30$ como representativo de la carga de sólidos asociados a un evento aluvional en dichas quebradas, y $C_v = 0,15$ en las quebradas con obras de control aluvional.

Los caudales máximos detríticos de $T=25$, $T=50$ y $T=100$ años para el periodo histórico y para el periodo 2035-2065 con proyecciones de cambio climático obtenidos para cada una de las quebradas se resumen en la Tabla 8.2.

Tabla 8.2 Caudales máximos detríticos (m^3/s). Periodo histórico y con cambio climático

Quebrada	C_v	Periodo histórico			Proyección con cambio climático		
		T=25 años	T=50 años	T=100 años	T=25 años	T=50 años	T=100 años
N0	0,30	14,3	19,3	25,2	23,8	32,0	40,6
N1	0,30	19,9	26,8	35,0	33,1	44,4	56,4
N2	0,30	4,6	6,2	8,1	7,6	10,3	13,0
Varas Norte	0,30	6,4	8,6	11,2	10,6	14,3	18,1
Varas Sur	0,30	1,9	2,5	3,3	3,1	4,1	5,2
La Chimba	0,30	22,9	31,0	40,5	38,2	51,4	65,3
La Roca	0,30	5,0	6,7	8,8	8,3	11,1	14,1
Club Hípico	0,30	7,1	9,6	12,5	11,8	15,9	20,1
Bonilla Norte	0,30	6,4	8,6	11,3	10,6	14,3	18,2
Bonilla Sur	0,30	9,8	13,2	17,2	16,2	21,8	27,7
Farellones	0,15	6,9	9,3	12,1	11,4	15,3	19,5
Salar del Carmen	0,15	26,1	35,2	45,8	43,3	58,2	73,9
La Cadena	0,15	16,7	22,6	29,4	27,8	37,3	47,4
El Ancla	0,15	1,8	2,4	3,2	3,0	4,0	5,1
Schneider	0,30	0,6	0,8	1,1	1,0	1,7	1,7

Quebrada	Cv	Período histórico			Proyección con cambio climático		
		T=25 años	T=50 años	T=100 años	T=25 años	T=50 años	T=100 años
Riquelme	0,15	0,6	0,8	1,1	1,0	6,1	1,8
Baquedano	0,15	2,7	3,7	4,8	4,5	6,1	7,7
Uribe	0,15	2,7	3,7	4,8	4,5	15,8	7,7
El Toro	0,15	7,1	9,5	12,4	11,8	8,0	20,1
Caliche Norte	0,30	4,3	5,9	7,6	7,2	6,9	12,3
Caliche Sur	0,30	3,1	4,2	5,4	5,1	28,5	8,7
Universidad de Antofagasta	0,30	2,6	3,5	4,5	4,3	12,0	7,3
Jardín del sur	0,15	10,5	14,2	18,5	17,5	39,4	29,8
Huáscar	0,15	4,4	6,0	7,8	7,4	4,8	12,6
S1	0,30	0,6	0,8	1,0	1,0	1,3	1,6
S2	0,30	0,7	0,9	1,1	1,1	1,5	1,8
S3	0,30	2,1	2,8	3,6	3,4	4,6	5,8

8.2.6. Hidrogramas líquidos y detríticos

Para la estimación de los hidrogramas de crecidas en la descarga de cada quebrada, se utilizó el software WMS de Aquaveo empleando el módulo hidrológico HEC-HMS. Mediante dicho software, se pueden simular las crecidas para las cuencas de interés considerando principalmente los parámetros morfométricos, tiempo de retardo del peak y un hietograma de tormenta según las distribuciones descritas en el Anexo VIII.

Para realizar la estimación de dicho hidrograma se utilizó el método de la SCS, calibrando el valor de la curva número de modo de obtener un peak idéntico al estimado por la fórmula racional mostrado en la Tabla 8.2 para cada periodo de retorno descrito.

En cuanto al tipo de hietograma utilizado y la duración de las tormentas, se consideró que la precipitación diaria se concentró en una tormenta de 3 horas de duración con distribución Tipo I.

Los hidrogramas detríticos de crecida para todas las quebradas en estudio corresponden a los estimados con los registros del periodo histórico y a aquellos calculados con la proyección de cambio climático, para los periodos de retorno T= 25, T=50 y T=100 años.

8.3. MODELACIÓN DE LAS QUEBRADAS Y DE SU ÁREA DE INFLUENCIA

La modelación HEC RAS de las quebradas y de sus áreas de influencia respectivas, incluyó los siguientes aspectos:

- Determinación del modelo digital de terreno (MDT).
- Establecimiento de las condiciones de borde.
- Estimación de los coeficientes de rugosidad (resistencia) de Manning.
- Elaboración de la malla de modelación y parámetros de simulación numérica.
- Definición de los escenarios de simulación.

8.3.1. Modelo digital de terreno (MDT)

El Modelo Digital de Terreno de la quebrada (en adelante denominado como “MDT”) se obtuvo a partir de la restitución aerofotogramétrica realizada para el área de estudio, la cual se encuentra disponible tanto en formato ráster (con un tamaño de píxel de 2 m x 2 m), como en formato CSV con la misma densidad de información que el ráster antes mencionado.

El levantamiento realizado se encuentra dividido en 58 polígonos para tener así un adecuado manejo de la información. Para la elaboración del MDT de cada quebrada se utilizaron aquellos polígonos específicos que abarcaban íntegramente dicha quebrada y su área de influencia.

8.3.2. Condiciones de borde

Para el modelo HEC-RAS de cada quebrada se emplearon como condiciones de borde en su descarga, los hidrogramas de crecida detríticos definidos para los periodos de retorno en análisis, mientras que para el extremo aguas abajo del dominio (en su descarga hacia el mar) se adoptó la condición de escurrimiento normal.

8.3.3. Coeficiente de rugosidad de Manning

Sobre los coeficientes de rugosidad adoptados para todas las quebradas, se tuvo como referencia las especificaciones del Manual del usuario 2D provisto por HEC-RAS, donde en el Capítulo 2 se especifican los valores a adoptar para diversas superficies de escurrimiento.

De manera más específica, en la Tabla 2.1 de dicho manual se recomiendan rugosidades distintas según si las superficies están “densamente ocupadas y edificadas”, aunque dichos valores se limitan a escurrimientos de profundidad “apreciable”, aunque para escurrimientos de baja profundidad los valores n de rugosidad serían “mucho mayores”.

Considerando los tipos de terrenos presentes en el dominio computacional definido para el MDT, se supuso distintos valores de coeficientes de rugosidad de Manning, acorde con la situación topográfica de la ciudad de Antofagasta y más específicamente, distinguiendo terrenos fuera del cauce de las quebradas, como suelo descubierto, terreno pavimentado compuesto principalmente por las calles y rutas o autopistas, sectores urbanizados y/o agrícolas que permiten el paso acotado o impiden el flujo donde existen edificaciones, obstáculos e infraestructura urbana sin flujo.

8.3.4. Malla de modelación y parámetros de simulación numérica

El dominio de cálculo definido para cada quebrada se esquematizó mediante una malla de modelación, cuyos parámetros para el modelo HEC-RAS, corresponden a los determinados para cada sistema.

Cabe señalar que el tamaño de las celdas mostradas usado fue de 2 m x 2 m en el sector urbano, donde se requiere obtener una mayor precisión en los resultados de las simulaciones, en tanto para

suelo correspondiente a cauces de las quebradas y suelo descubierto se definió una malla de 4 m x 4 m, optimizando de esta manera el rendimiento computacional durante las simulaciones.

8.3.5. Escenarios de simulación

Para la simulación se consideró un escenario de modelación basado en la situación actual de la quebrada y el área de influencia relacionada a ella, con los hidrogramas detríticos para cada quebrada asociados a los periodos de retorno de T=25, T=50 y T=100 años, tanto para los caudales determinados a partir del periodo histórico como para las proyecciones con cambio climático.

8.4. EJEMPLOS DE LOS INPUTS DE MODELACIÓN

8.4.1. Quebrada La Chimba y su área de influencia

8.4.1.1. Modelo digital de terreno (MDT)

El MDT de la quebrada se obtuvo a partir de la restitución aerofotogramétrica realizada para el área de estudio, la cual se encuentra disponible tanto en formato ráster (con un tamaño de píxel de 2 m x 2 m), como en formato CSV con la misma densidad de información que el ráster antes mencionado.

El levantamiento realizado se encuentra dividido en 58 polígonos para tener así un adecuado manejo de la información, considerando para la elaboración del MDT de la quebrada La Chimba los polígonos N°: 20, 21, 22, 23, 24 y 25.

8.4.1.2. Condiciones de borde

Para el modelo HEC-RAS de la quebrada La Chimba se emplearon como condiciones de borde en la descarga de la quebrada, los hidrogramas detríticos definidos para los periodos de retorno en análisis, mientras que para el extremo aguas abajo del dominio (en su descarga hacia el mar) se adoptó la condición de escurrimiento normal.

8.4.1.3. Coeficiente de rugosidad de Manning

Considerando los tipos de terrenos presentes en el dominio computacional definido para el MDT de la quebrada la Chimba, los coeficientes de Manning supuestos fueron: para el cauce de la quebrada y suelo descubierto, $n=0,200$; para suelo pavimentado compuesto principalmente por las calles y la Ruta 1, $n=0,015$; para sectores urbanizados y/o agrícolas que permiten el paso de cierto flujo, $n=0,500$. Para terrenos ocupados por edificios, obstáculos e infraestructura urbana sin flujo, se escogió un valor $n=10.000$, a fin de emular superficies impermeables y de esta manera, concentrar preferentemente el escurrimiento por las vías de drenaje existentes que corresponden a las calles en casi la totalidad de la ciudad.

8.4.1.4. Malla de modelación, parámetros y tiempos de simulación numérica

Los parámetros de la malla de modelación para incorporarla al software HEC-RAS y tiempos computacionales, se muestran resumidos en la Tabla 8.3.

Tabla 8.3 Parámetros de modelación HEC RAS de Quebrada La Chimba

Parámetro	Valor
Tamaño de celda	2 m x 2 m a 4 m x 4 m
Paso de tiempo	0,25 segundos
Tiempo de simulación	2 horas 50 minutos
Rugosidad de Manning*	0,015 – 10.000

8.4.1.5. Escenarios de modelación

Para la simulación se consideraron escenarios de modelación basados en la situación actual de la quebrada La Chimba y el área de influencia relacionada con ella, con los hidrogramas detríticos asociados a los periodos de retorno de T=25, T=50 y T=100 años para el periodo histórico y para las proyecciones con cambio climático.

8.4.2. Quebrada Bonilla y su área de influencia

8.4.2.1. Modelo digital de terreno (MDT)

Al igual que en ejemplo anterior, el MDT de la quebrada se obtuvo a partir de la restitución aerofotogramétrica realizada para el área de estudio, empleando de los 58 polígonos los designados como N°: 27, 28, 30 y 31.

8.4.2.2. Condiciones de borde

Igual que para el modelo HEC-RAS de la quebrada Bonilla se emplearon como condiciones de borde en la descarga de la quebrada los hidrogramas detríticos definidos para los periodos de retorno en análisis, mientras que para el extremo aguas abajo del dominio (en su descarga hacia el mar) se adoptó la condición de escurrimiento normal.

8.4.2.3. Coeficiente de rugosidad de Manning

Los coeficientes de Manning supuestos, similar a lo considerado para la quebrada La Chimba, fueron: para el cauce de la quebrada y suelo descubierto, $n=0,200$; para suelo pavimentado compuesto principalmente por las calles y la Ruta 1, $n=0,015$; para sectores urbanizados y/o agrícolas que permiten el paso de cierto flujo, $n=0,500$. Para terrenos ocupados por edificios, obstáculos e infraestructura urbana sin flujo, a fin de asimilarlos a superficies impermeables, se escogió un valor $n=10.000$.

8.4.2.4. Malla de modelación, parámetros y tiempos de simulación numérica

Los parámetros de la malla de modelación para incorporarla al software HEC-RAS y los tiempos de proceso computacional del modelo, se consignan resumidamente en la Tabla 8.4.

Tabla 8.4 Parámetros de modelación HEC RAS de Quebrada Bonilla

Parámetro	Valor
Tamaño de celda	2 m x 2 m a 4 m x 4 m
Paso de tiempo	0,25 segundos
Tiempo de simulación	2 horas 50 minutos
Rugosidad de Manning*	0,015 – 10.000

8.4.2.5. Escenarios de modelación

Para la simulación se consideraron escenarios de modelación basados en la situación actual de la quebrada Bonilla y el área de influencia relacionada con ella, con los hidrogramas detríticos asociados a los periodos de retorno de T=25, T=50 y T=100 años considerando también, igual que para quebrada La Chimba, el periodo histórico y las proyecciones con cambio climático.

8.4.3. Quebrada Universidad de Antofagasta y su área de influencia

8.4.3.1. Modelo digital de terreno (MDT)

En esta quebrada, de manera análoga a las quebradas La Chimba y Bonilla, el MDT de la quebrada se obtuvo a partir de la restitución aerofotogramétrica pero en esta caso se emplearon los polígonos N° 48 y 49 de los 58 disponibles.

8.4.3.2. Condiciones de borde

Similarmente al caso de las dos quebradas mencionadas anteriormente, para el modelo HEC-RAS se emplearon como condiciones de borde en la descarga de la quebrada los hidrogramas detríticos definidos para los periodos de retorno en análisis, mientras que para el extremo aguas abajo del dominio (en su descarga hacia el mar) se adoptó la condición de escurrimiento normal.

8.4.3.3. Coeficiente de rugosidad de Manning

También en esta quebrada, los coeficientes de Manning supuestos, al igual que para las quebradas La Chimba y Bonilla, fueron: para el cauce de la quebrada y suelo descubierto, $n=0,200$; para suelo pavimentado compuesto principalmente por las calles y la Ruta 1, $n=0,015$; para sectores urbanizados y/o agrícolas que permiten el paso de cierto flujo, $n=0,500$ y $n=10.000$ para terrenos ocupados por edificios, obstáculos e infraestructura urbana sin flujo.

8.4.3.4. Malla de modelación, parámetros y tiempos de simulación numérica

Los parámetros de la malla de modelación para incorporarla al software HEC-RAS, y tiempo computacional de proceso se resumen en la Tabla 8.5.

Tabla 8.5 Parámetros de modelación HEC RAS de Quebrada Universidad de Antofagasta

Parámetro	Valor
Tamaño de celda	2 m x 2 m a 4 m x 4 m
Paso de tiempo	0,25 segundos
Tiempo de simulación	2 horas 50 minutos
Rugosidad de Manning*	0,015 – 10.000

8.4.3.5. Escenarios de modelación

Para la simulación se consideraron escenarios de modelación basados en la situación actual de la quebrada Universidad de Antofagasta y el área de influencia relacionada con ella, con los hidrogramas detríticos asociados a los periodos de retorno de T=25, T=50 y T=100 años para el periodo histórico y para las proyecciones con cambio climático.

8.5. MODELACIÓN EPA SWMM DEL SISTEMA QUEBRADA SALAR DEL CARMEN

8.5.1. Antecedentes sobre el sistema

La elaboración del modelo EPA SWMM del sistema de drenaje de aguas lluvias asociado a la quebrada Salar del Carmen, se basó principalmente en la información de proyecto proporcionada por la DOH que consistió en presentaciones PowerPoint (PPT). En estas presentaciones se sintetiza la información general del proyecto, incluyendo aspectos tales como la disposición de las obras, longitudes y dimensiones básicas de las secciones adoptadas para los colectores en el inicio y fin del sistema, pero donde no se detallan las cotas a la que se ubican dichas obras ni las dimensiones finales con que se redefinió la geometría de los bandejones y calzadas de la Avenida Salvador Allende. Para completar la información necesaria para el modelo, se recurrió a la información generada a partir del levantamiento aerofotogramétrico, considerando principalmente el ortomosaico, los puntos levantados con sistema RTK, el modelo de elevación digital y las curvas de nivel obtenidas, como también a los resultados del análisis hidrológico del Anexo VIII del presente informe.

El sistema de drenaje de aguas lluvias asociado a la quebrada Salar del Carmen está compuesto principalmente por los siguientes 3 tramos:

- El tramo inicial consiste en un colector subterráneo de sección rectangular 2,5 m de ancho y 2,0 m de alto, que se extiende por cerca de 265 m y descarga hacia dos canales paralelos abiertos también de sección rectangular ancho 2,0 m y alto 1,2 m que descargan sobre la avenida Salvador Allende.
- El tramo intermedio considera las calzadas y bandejón central de la Avenida Salvador Allende y se extiende por 2,1 km.
- El tramo final considera un colector subterráneo de sección rectangular con una base de 4,0 m y una altura de 1,5 m que capta el agua proveniente de la avenida mencionada antes para

descargar al mar, atravesando la Avenida Edmundo Pérez Zujovic (Costanera) y una plaza adyacente a esta.

8.5.2. Caracterización de las subcuencas aportantes

Para la modelación hidrológica del sistema colector Salar del Carmen se caracterizaron las subcuencas que drenan al sistema las cuales corresponden a las definidas en el PM-26, cuyos límites, áreas y valores de curva número fueron verificados en función del levantamiento aerofotogramétrico. En la Tabla 8.6 se resumen estos parámetros para las distintas las áreas consideradas

Tabla 8.6 Parámetros de las subcuencas aportantes al sistema Salar del Carmen

Subcuenca	Nodo de descarga	Área (ha)	Porcentaje impermeable (%)	Ancho promedio (m)	CN
SC-0-A	SSC1	2964	25	3000	75
SC-0-B+SC-03	SSC1	215,8	25	760	77
SC-02	SSC1	67,5	25	541	77
SC04	SSC-3	88,0	25	547	79
SC-01	SSC-3	13,0	25	100	77
SC-05-B	SSC-10	17,4	25	160	83
SC-06	SSC-29	25,6	25	290	85
SC-07	SSC-38	6,8	25	140	85
FS-06-B	SSC-26	3,8	25	100	85

Cabe destacar que en esta tabla, las 3 primeras subáreas corresponden a la escorrentía generada por la quebrada Salar del Carmen, mientras que el resto considera las subcuencas urbanas que drenan hacia el sistema colector analizado. En la Figura 8.2 se muestran las áreas aportantes y nodos de a modelación EPA-SWMM.

8.6. MODELACIÓN

La elaboración del modelo hidráulico se realizó mediante el uso del software WMS versión 11.1, desarrollado por Aquaveo, cuyo uso permitió un fácil y rápido manejo de la información topográfica proveniente del levantamiento aerofotogramétrico (ortofotos y modelos de elevación digital) para configurar la distribución espacial de los distintos elementos hidráulicos del modelo, obteniendo, por ejemplo, la ubicación y cotas de los nodos, longitudes de calles, intersecciones y puntos de interés.

8.6.1. Nodos

En la Tabla 8.7 se identifican los 37 nodos definidos para la elaboración del modelo, cada uno de los cuales se caracteriza por la cota de radier, flujo base y si corresponden o no a un nodo de descarga. Cabe mencionar que dadas las características del sistema, se supone que el flujo base dentro del sistema es nulo, debido a las condiciones climáticas de la ciudad de Antofagasta, donde se tiene que

el escurrimiento sobre las quebradas y vías principales de drenaje ocurre solo durante eventos de precipitación.

Figura 8.2 Áreas aportantes definidas para el modelo EPA SWMM

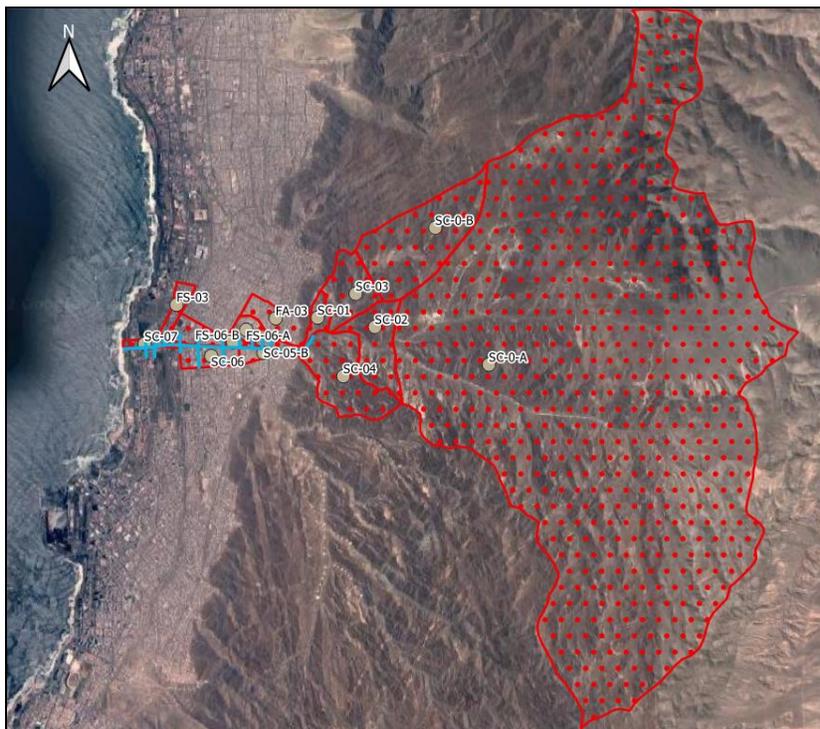


Tabla 8.7. Definición de los nodos para el sistema Salar del Carmen

Nodo	Cota Radier	Flujo base	Nodo de descarga
	(msnm)	(m ³ /s)	
SSC1	168,0	0	No
SSC-2	163,0	0	No
SSC-3	150,0	0	No
SSC-4	139,0	0	No
SSC-5	138,0	0	No
SSC-6	125,0	0	No
SSC-7	114,0	0	No
SSC-8	107,0	0	No
SSC-9	97,0	0	No
SSC-10	84,7	0	No
SSC-11	70,0	0	No
SSC-12	51,0	0	No
SSC-13	38,0	0	No
SSC-14	32,0	0	No
SSC-15	26,0	0	No
SSC-16	22,0	0	No
SSC-17	15,0	0	No
SSC-18	7,0	0	No
SSC-37	15,1	0	No

Nodo	Cota Radier	Flujo base	Nodo de descarga
	(msnm)	(l/s)	
SSC-38	15,0	0	No
SSC-35	22,0	0	No
SSC-36	22,1	0	No
SSC-34	26,1	0	No
SSC-33	27,0	0	No
SSC-30	39,0	0	No
SSC-32	38,1	0	No
SSC-31	38,2	0	No
SSC-28	51,1	0	No
SSC-27	51,2	0	No
SSC-29	56,0	0	No
SSC-25	82,0	0	No
SSC-26	70,1	0	No
SSC-24	85,0	0	No
SSC-23	97,1	0	No
SSC-22	107,0	0	No
SSC-21	117,0	0	No
SSC-20	114,1	0	No
SSC-19	2,0	0	Si

8.6.2. Links

En la Tabla 8.8 se resume la definición de los links requeridos para el modelo, donde se define la topología del modelo, con indicación de los nodos de inicio y fin de cada link, la forma de la sección, dimensiones y el número de secciones consideradas para cada link.

Tabla 8.8 Definición de los links del modelo del sistema Salar del Carmen

Link	Nodo de entrada	Nodo de salida	Longitud (m)	Manning (-)	Tipo de sección	Alto (m)	Ancho (m)	Z (-)	Nº secciones
SSCL-1	SSC1	SSC-2	99,56	0,015	Trapezoidal	5,0	5,0	1	1
SSCL-9	SSC-10	SSC-11	233,04	0,015	Irregular	-	-	-	1
SSCL-10	SSC-11	SSC-12	343,85	0,015	Irregular	-	-	-	1
SSCL-11	SSC-12	SSC-13	247,62	0,015	Irregular	-	-	-	1
SSCL-12	SSC-13	SSC-14	107,07	0,015	Irregular	-	-	-	1
SSCL-13	SSC-14	SSC-15	104,59	0,015	Irregular	-	-	-	1
SSCL-14	SSC-15	SSC-16	144,52	0,015	Irregular	-	-	-	1
SSCL-15	SSC-16	SSC-17	121,12	0,015	Irregular	-	-	-	1
SSCL-16	SSC-17	SSC-18	92,55	0,015	Irregular	-	-	-	1
SSCL-17	SSC-18	SSC-19	204,78	0,015	Rectangular	1,5	4,0	-	1
SSCL-36	SSC-37	SSC-17	126,70	0,015	Rectangular	-	-	-	1
SSCL-2	SSC-2	SSC-3	122,43	0,015	Rectangular	2,0	2,5	-	1
SSCL-35	SSC-38	SSC-17	114,26	0,015	Irregular	-	-	-	1
SSCL-33	SSC-35	SSC-16	120,91	0,015	Irregular	-	-	-	1
SSCL-34	SSC-36	SSC-16	129,80	0,015	Irregular	-	-	-	1
SSCL-32	SSC-34	SSC-15	97,88	0,015	Irregular	-	-	-	1
SSCL-31	SSC-33	SSC-15	95,03	0,015	Irregular	-	-	-	1
SSCL-30	SSC-30	SSC-13	93,72	0,015	Irregular	-	-	-	1
SSCL-29	SSC-32	SSC-13	94,94	0,015	Irregular	-	-	-	1
SSCL-28	SSC-31	SSC-32	49,57	0,015	Irregular	-	-	-	1
SSCL-26	SSC-28	SSC-12	136,56	0,015	Irregular	-	-	-	1
SSCL-25	SSC-27	SSC-28	157,86	0,015	Irregular	-	-	-	1
SSCL-3	SSC-3	SSC-4	141,78	0,015	Rectangular	2,0	2,5	-	1
SSCL-27	SSC-29	SSC-12	293,41	0,015	Irregular	-	-	-	1
SSCL-24	SSC-25	SSC-11	253,97	0,015	Irregular	-	-	-	1
SSCL-23	SSC-26	SSC-11	131,05	0,015	Irregular	-	-	-	1
SSCL-22	SSC-24	SSC-10	129,43	0,015	Irregular	-	-	-	1
SSCL-21	SSC-23	SSC-9	109,39	0,015	Irregular	-	-	-	1
SSCL-20	SSC-22	SSC-8	217,18	0,015	Irregular	-	-	-	1
SSCL-19	SSC-21	SSC-7	104,13	0,015	Irregular	-	-	-	1
SSCL-18	SSC-20	SSC-7	168,00	0,015	Irregular	-	-	-	1
SSCL-3a	SSC-4	SSC-5	66,50	0,015	Rectangular	1,2	2,0	-	2
SSCL-4	SSC-5	SSC-6	163,71	0,015	Irregular	-	-	-	1
SSCL-5	SSC-6	SSC-7	130,02	0,015	Irregular	-	-	-	1
SSCL-6	SSC-7	SSC-8	91,38	0,015	Irregular	-	-	-	1
SSCL-7	SSC-8	SSC-9	132,49	0,015	Irregular	-	-	-	1
SSCL-8	SSC-9	SSC-10	178,09	0,015	Irregular	-	-	-	1

8.6.2.1. Malla de modelación adoptada

La Figura 8.3 ilustra en un esquema el modelo numérico en EPA SWMM del sistema Salar del Carmen, donde se señala en color rojo los tramos que corresponden a colectores subterráneos de los tramos inicial y final.

9. MODELACIÓN HEC-RAS PARA ESTUDIO DE INUNDACIONES EN 5 QUEBRADAS

Atendido que las quebradas denominadas como N1, La Roca, Schneider, S2 y S3 no presentan actualmente obras de control aluvional en su descarga sobre el plano urbano, como tampoco poseen estudios por la DOH para encauzar y controlar los flujos detríticos generados en estas cuencas, dentro del presente estudio se incluyó como parte de los trabajos de terreno la toma de perfiles transversales en los cursos inferiores de estas quebradas, aguas arriba de su descarga al plano urbano.

En el Anexo X “Modelaciones HEC-RAS Para la Situación Actual de las Quebradas N1, La Roca, Schneider, S2 y S3”, se describe detalladamente la modelación HEC RAS-2D desarrollada en base a la información levantada, complementada con el levantamiento aerofotogramétrico de Antofagasta.

9.1. CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA DE LAS QUEBRADAS EN ESTUDIO

9.1.1. Parámetros morfométricos

Las quebradas poseen en general una pequeña superficie aportante y cauces principales de escaso recorrido, haciendo que los tiempos de concentración se concentren entre 4 y 16 minutos, exceptuando la Quebrada N1, la cual presenta una mayor extensión tanto de su área aportante como su cauce principal.

Para la modelación hidrológica, se adoptaron tiempos de concentración de 10 minutos para las cuencas que presentaron valores inferiores a este umbral.

Además se consideraron los coeficientes de escorrentía actualizados determinados en el presente estudio. En la Tabla 9.1 se resumen los principales parámetros morfométricos considerados en la modelación de las hoyas hidrográficas de las 5 quebradas en estudio.

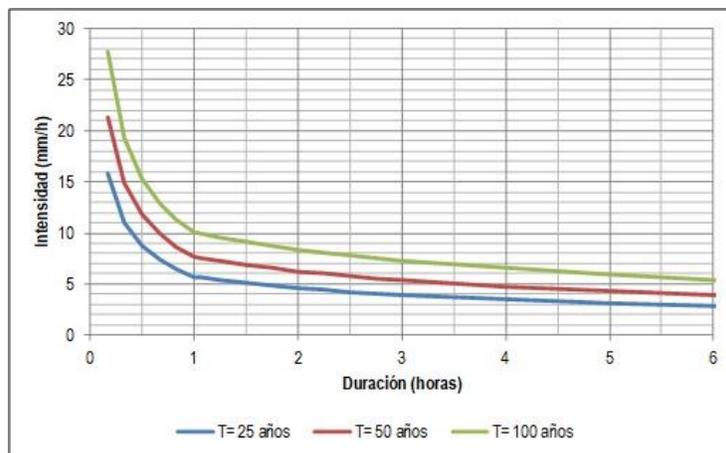
Tabla 9.1 Parámetros morfométricos de las 5 quebradas en estudio

Nombre cuenca	Área (km ²)	Coefficiente de escorrentía	Largo de cauce principal (km)	Pendiente media del cauce (%)	Desnivel entre cotas máximas (m)	Tiempo de concentración (minutos)
N1	19,50	0,45	9,48	7,9	785	60
La Roca	1,63	0,60	2,78	17,8	661	16
Schneider	0,13	0,75	0,67	29,9	211	10
S2	0,23	0,45	1,80	16,9	216	10
S3	1,02	0,38	0,71	13,6	266	14

9.1.2. Intensidades de lluvia

Las intensidades de lluvia fueron obtenidas de las curvas IDF representativas de la ciudad de Antofagasta, para periodos de retorno de T=25, T=50 y T=100 años., de acuerdo con el análisis hidrológico del Anexo VIII del presente informe. La Figura 9.1 ilustra gráficamente las 3 curvas utilizadas.

Figura 9.1 Curvas IDF seleccionadas para el periodo histórico



En base a las curvas IDF descritas y los tiempos de concentración respectivos, se determinaron las intensidades de precipitación de cada quebrada que se resumen en la Tabla 9.2.

Tabla 9.2 Intensidades de precipitación (mm/hr)

Quebrada	T=25 años	T=50 años	T=100 años
N1	5,71	7,70	10,04
La Roca	12,85	17,33	22,60
Schneider	15,77	21,27	27,73
S2	15,77	21,27	27,73
S3	13,32	17,97	23,43

9.2. CAUDALES DE CRECIDA LÍQUIDOS Y DETRÍTICOS

Los caudales máximos líquidos se estimaron a partir del Método Racional, y los caudales máximos detríticos se determinaron de la misma forma explicada en el Capítulo 8, a partir de la concentración volumétrica de sólidos del flujo detrítico, con un $C_v = 0,30$ como representativo de la carga de sólidos asociados a un evento aluvional. Estos caudales que se resumen en la Tabla 9.3.

Tabla 9.3 Caudales máximos líquidos y detríticos

Quebrada	Caudal líquido (m ³ /s)			Caudal detrítico (m ³ /s)		
	T= 25 años	T= 50 años	T= 100 años	T= 25 años	T= 50 años	T= 100 años
N1	13,92	18,77	24,47	19,88	26,81	34,96
La Roca	3,49	4,71	6,14	4,99	6,73	8,77
Schneider	0,43	0,58	0,75	0,61	0,82	1,07
S2	0,45	0,61	0,80	0,65	0,87	1,14
S3	1,43	1,93	2,52	2,05	2,76	3,60

9.3. HIDROGRAMAS LÍQUIDOS Y DETRÍTICOS

Para la determinación de los hidrogramas de crecidas generados en la descarga de cada quebrada se utilizó el software WMS de Aquaveo.

Los modelos hidrológicos de las cuencas se generaron con la componente HEC-HMS de este software, considerando los correspondientes parámetros morfométricos, tiempos de retardo del peak y un hietograma de tormenta para el cual se supuso que la precipitación diaria se concentra en una tormenta de 3 horas de duración con distribución Tipo I según la definición del Anexo VIII.

Los hidrogramas de crecida líquidos y detríticos asociados a periodos de retorno de T=25, T=50 y T=100 años, generados para las quebradas La Roca y Schneider, se muestran graficados a modo de ejemplo en la Figura 9.2 y Figura 9.3.

Figura 9.2 Hidrogramas líquidos y detríticos de Quebrada La Roca

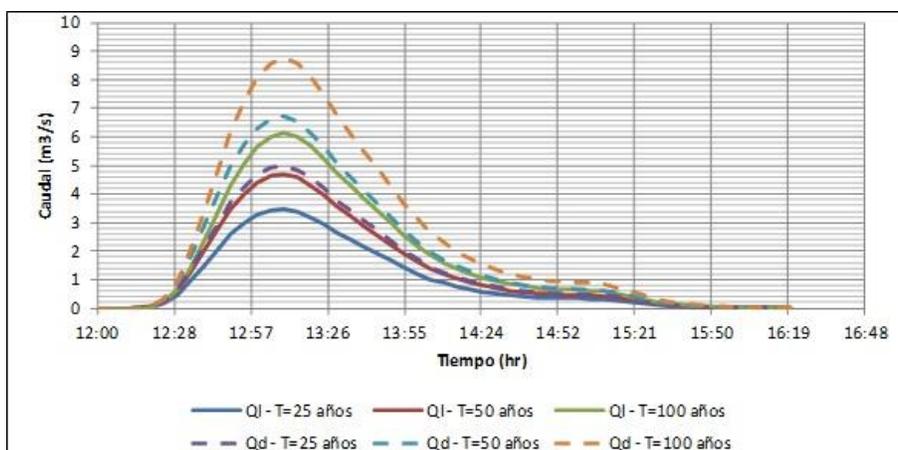
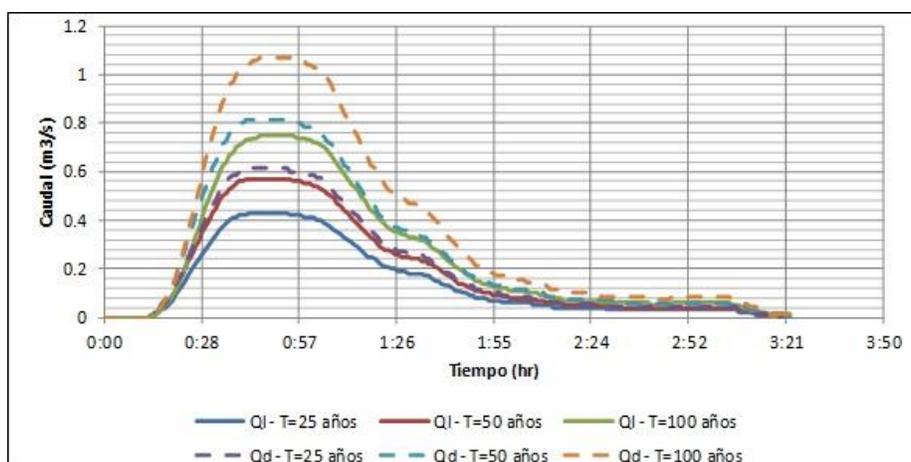


Figura 9.3 Hidrogramas líquidos y detríticos en Quebrada Schneider



9.4. INPUTS PARA LA MODELACIÓN HEC-RAS 2D

Al igual que para la modelación HEC RAS de las quebradas y de sus áreas de influencia, descritas en el Capítulo 8, para las 5 quebradas en estudio dicha modelación se abordó considerando los siguientes pasos:

- Determinación del modelo digital de terreno (MDT).
- Establecimiento de las condiciones de borde.
- Estimación de los coeficientes de rugosidad (resistencia) de Manning.
- Elaboración de la malla de modelación y parámetros de simulación numérica.
- Definición de los escenarios de simulación.

En los siguientes dos acápite se presentan ejemplos de los inputs de modelación de las quebradas La Roca y Schneider.

9.5. EJEMPLO 1 DE LOS INPUTS DE MODELACIÓN: QUEBRADA LA ROCA

9.5.1. Modelo digital de terreno (MDT)

El MDT se obtuvo del levantamiento topográfico realizado en el cauce de la quebrada La Roca, como parte del presente estudio, consistente en 27 perfiles transversales tomados cada 20 m aproximadamente, a lo largo del tramo final del cauce, aguas arriba de su descarga al plano urbano.

La anterior información se completó con la restitución aerofotogramétrica disponible tanto en formato ráster (con un tamaño de pixel de 2 m x 2 m), como en formato CSV con la misma densidad de información que el ráster antes mencionado.

Entre los 58 polígonos elaborados en la aerofotogrametría, para el MDT de la quebrada La Roca se consideraron los polígonos N° 23, 24 y 25.

En definitiva el MDT se generó interpolando entre ambas fuentes de datos: aguas arriba del plano urbano los perfiles transversales levantados en terreno se montaron por sobre la aerofotogrametría, mientras que en las zonas fuera del alcance de dichos levantamientos topográficos, se utilizó la aerofotogrametría para elaborar el MDT.

9.5.2. Condiciones de borde

Para el modelo HEC-RAS de la quebrada La Roca se empleó como condiciones de borde en la descarga de la quebrada, el hidrograma de la crecida detriticos de la quebrada para los distintos periodos de retorno, a saber T=25, T=50 y T=100 años, ilustrados en la Figura 9.1 del acápite precedente, mientras que para el extremo aguas abajo se adoptó la condición de escurrimiento en régimen uniforme o normal.

9.5.3. Coeficiente de rugosidad de Manning

Considerando los tipos de terrenos presentes en el dominio computacional definido para el MDT de la quebrada La Roca, los coeficientes de Manning supuestos fueron análogos a los considerados para las quebradas analizadas en el Capítulo 8: para el cauce de la quebrada y suelo descubierto, $n=0,200$; para suelo pavimentado compuesto principalmente por las calles y la Ruta 1, $n=0,015$; para sectores urbanizados y/o agrícolas que permiten el paso de cierto flujo, $n=0,500$. Para terrenos ocupados por edificios, obstáculos e infraestructura urbana sin flujo, se adoptó un valor $n=10.000$.

Los distintos tipos de rugosidad asociada a diferentes terrenos y obstáculos se representan en forma gráfica en la Figura 9.4.

9.5.4. Malla de modelación y parámetros de simulación numérica

La malla de escurrimiento adoptada para la quebrada La Roca se muestra en la Figura 9.5.

En el modelo HEC-RAS, dentro de la malla de modelamiento se emplearon los parámetros mostrados en la Tabla 9.5.

Figura 9.4 Coeficientes de rugosidad en Quebrada La Roca

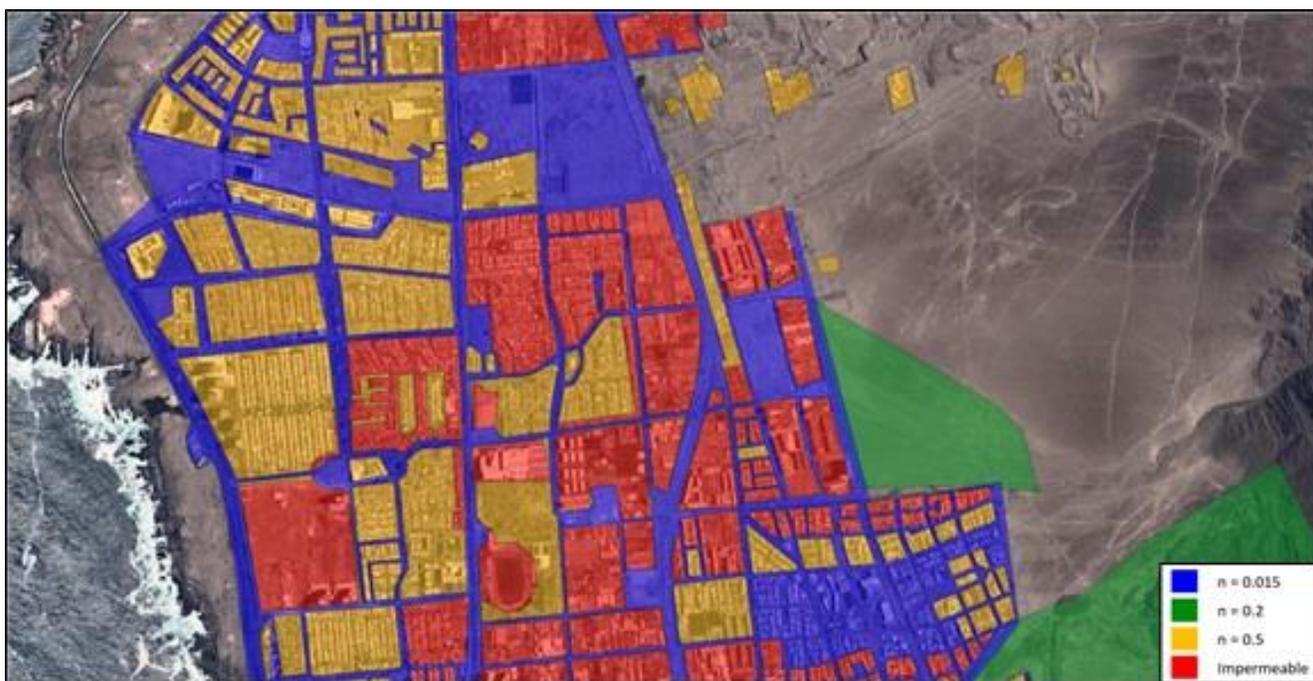


Figura 9.5 Malla de escurrimiento y condiciones de borde en Quebrada La Roca



Tabla 9.4 Parámetros de modelación en malla de escurrimiento de Quebrada La Roca

Parámetro	Valor
Tamaño de celda	2 m x 2 m
Paso de tiempo	0,25 segundos
Tiempo de simulación	3 horas
Superficie de escurrimiento	32 hectáreas
Rugosidad de Manning	0,015 – 10000

9.5.5. Escenarios de modelación

Basados en la situación actual de la quebrada La Roca y el plano urbano relacionado a ella, se modelaron tres escenarios correspondientes a las inundaciones ocasionadas por crecidas detríticas asociadas a los períodos de retorno T=25, T=50 y T=100 años, cuyos hidrogramas se encuentran graficados en la Figura 9.2 del acápite precedente.

9.5.6. Malla de modelación y parámetros de simulación numérica

Los parámetros de la malla de modelación para incorporarla al software HEC-RAS, corresponden a los resumidos en la Tabla 9.5.

Tabla 9.5 Parámetros de modelación HEC RAS de Quebrada Universidad de Antofagasta

Parámetro	Valor
Tamaño de celda	2 m x 2 m a 4 m x 4 m
Paso de tiempo	0,25 segundos
Tiempo de simulación	2 horas 50 minutos
Rugosidad de Manning*	0,015 – 10.000

9.6. EJEMPLO 2 DE LOS INPUTS DE MODELACIÓN: QUEBRADA SCHNEIDER

9.6.1. Modelo digital de terreno (MDT)

En este caso el MDT se obtuvo del levantamiento topográfico realizado en el cauce de la quebrada Schneider, consistente en 9 perfiles transversales cada 15 m aproximadamente a lo largo del tramo final del cauce, aguas arriba de su descarga al plano urbano.

La anterior información se completó con la restitución aerofotogramétrica considerando los polígonos N° 36, 39 y 40.

En definitiva el MDT se generó interpolando entre ambas fuentes de datos: aguas arriba del plano urbano los perfiles transversales levantados en terreno se montaron por sobre la aerofotogrametría, mientras que en las zonas fuera del alcance de dichos levantamientos topográficos, se utilizó la aerofotogrametría para elaborar el MDT.

9.6.2. Condiciones de borde

Para las condiciones de borde se emplearon los hidrogramas de crecida detriticos mencionados antes, considerando los periodos de retorno de T=25, T=50 y T=100 años. También se consideró la condición de flujo normal en el extremo aguas abajo del modelo.

Los distintos tipos de rugosidad asociada a diferentes terrenos y obstáculos se representan en forma gráfica en la Figura 9.6, considerando para el cauce de la quebrada y suelo descubierto, $n=0,200$; para suelo pavimentado compuesto principalmente por las calles y la Ruta 1, $n=0,015$; para sectores urbanizados y/o agrícolas que permiten el paso de cierto flujo, $n=0,500$. Para terrenos ocupados por edificios, obstáculos e infraestructura urbana sin flujo, se escogió un valor $n=10.000$.

9.6.3. Malla de modelación y parámetros de simulación numérica

La malla de escurrimiento adoptada para la quebrada Schneider se muestra en la Figura 9.6.

En el modelo HEC-RAS, dentro de la malla de modelamiento se aplicaron los siguientes parámetros:

Tamaño de celda: 2 m x 2 m; paso de tiempo: 0,25 segundos; tiempo de simulación: 3 horas; superficie de escurrimiento: 229 hectáreas; rugosidad de Manning: 0,015 – 10.000.

Figura 9.6 Coeficientes de rugosidad en Quebrada Schneider



Figura 9.7 Malla de escurrimiento y condiciones de borde en Quebrada Schneider



9.6.4. Escenarios de modelación

Basados en la situación actual de la quebrada Schneider y el plano urbano relacionado a ella, se modelaron tres escenarios correspondientes a las inundaciones ocasionadas por crecidas detríticas asociadas a los períodos de retorno $T=25$, $T=50$ y $T=100$ años, cuyos hidrogramas se encuentran graficados en la Figura 9.3, del acápite precedente.

10. DIAGNÓSTICO DE LA RED DE DRENAJE DE AGUAS LLUVIAS EN LA SITUACIÓN ACTUAL Y EN SITUACIÓN ACTUAL OPTIMIZADA

En el Anexo XI “Diagnóstico de la Red de Drenaje de Aguas Lluvias para la Situación Actual y La Situación Actual Optimizada”, se entregan todos los detalles de los diagnósticos del sistema de drenaje de aguas lluvias de la ciudad de Antofagasta, llevado a cabo en el presente estudio, los que incluyeron las consideraciones que se señalan a continuación.

- El diagnóstico se realizó considerando flujo detrítico en aquellas quebradas que no disponen de obras de control aluvional, y flujo detrítico “diluido” con 15% de concentración volumétrica de sólidos en las quebradas que tienen construidos sistemas de control aluvional actualmente. Se consideraron periodos de retorno de $T=25$, $T=50$ y $T=100$ años en base a las estimaciones para el periodo histórico.
- Se desarrolló además, un análisis sobre el efecto de las proyecciones de cambio climático en el diagnóstico del drenaje de aguas lluvias en situación actual, considerando los mismos periodos de retorno antes mencionados de $T=25$, $T=50$ y $T=100$ años, pero re-evaluada con la proyección hecha en el Anexo VIII al periodo 2035-2065, lo que implicó un aumento cercano al 65% en los caudales de las quebradas.
- El diagnóstico elaborado sirvió de base también, para llevar a cabo el análisis optimizado de la situación actual del sistema de drenaje, mediante la identificación de puntos críticos por inundación o acumulación de aguas lluvias, y proposición de soluciones de mejoramiento local, de bajo costo y que puedan ser más fácilmente implementadas en el corto plazo.
- El diagnóstico se complementó con la elaboración de “Planos de Diagnóstico de la Situación Actual del Sistema de Drenaje Urbano de Antofagasta y Situación Optimizada” en los cuales se graficaron las áreas de inundación obtenidas de la modelación e identificaron los puntos críticos y las soluciones de corto plazo comentadas antes.

10.1. DIAGNÓSTICO DE LA SITUACIÓN ACTUAL

Los objetivos específicos de las simulaciones para realizar el diagnóstico de la situación actual del sistema de drenaje de aguas lluvias de la ciudad de Antofagasta, pueden resumirse como sigue:

- Determinación de las áreas de inundación y de las vías preferenciales de escurrimiento superficial en el área de estudio para las crecidas de $T=25$, $T=50$ y $T=100$ años, las cuales

fueron sintetizadas en mapas de inundaciones, con profundidades y velocidades del escurrimiento.

- Identificación de sectores de inundación críticos producidos por los flujos detríticos de cada quebrada, producidos por puntos bajos en la red vial, obstáculos con la infraestructura urbana u otras interferencias.

El diagnóstico abarcó las quebradas que descargan directamente al plano urbano de la ciudad, constituyendo sus cauces y el área de influencia urbana, los sistemas de drenaje de aguas lluvias, específicamente las quebradas: N0, N1, N2, Varas Norte, Varas Sur, La Chimba, La Roca, Club Hípico, Bonilla, Farellones, Salar del Carmen, La Cadena, El Ancla, Schneider, Riquelme, Baquedano, Uribe, El Toro, Caliche, Universidad de Antofagasta, Jardín del Sur, Huáscar, S1, S2 y S3.

Los resultados de las simulaciones y análisis hidráulicos de las quebradas N1, La Roca, Schneider, S2 y S3, que fueron estudiadas aparte, ya que por bases se estableció que debían levantarse topográficamente para caracterizar el comportamiento hidráulico de los tramos finales sus cauces, se presentan en forma separada en el siguiente capítulo de este informe.

Las quebradas La Negra y Roca Roja no fueron incluidas en el diagnóstico, por corresponder a cuencas con un extenso desarrollo fuera del área de estudio, además que la primera cuenta en la actualidad con obras de control aluvional y descarga de manera directa hacia el mar, en tanto la segunda, dispone de un colector con descarga directa al mar del cual no se dispone de información por haber sido construido por un privado.

10.1.1. Variables de diagnóstico de las inundaciones

Las áreas de inundación constituyen una de las variables centrales empleadas en el diagnóstico de las inundaciones asociadas a las descargas directas al plano urbano de las quebradas estudiadas.

En razón de ello, el diagnóstico de cada quebrada en la situación actual y en la situación optimizada, se focalizó en los siguientes aspectos:

- Delimitación de la superficie inundada aguas abajo de la descarga en el plano urbano de la ciudad de Antofagasta, como también en la cuantificación del área inundada.
- Identificación de sectores y puntos críticos afectados por la inundación.
- Determinación de las profundidades alcanzadas por el escurrimiento en el área inundada.
- Basado en lo anterior, identificación de zonas críticas con mayores profundidades o extensiones de inundación.
- Mapas de velocidades del flujo de inundación.
- Basado en lo anterior, cuantificación de las velocidades medias en los distintos sectores inundados.

- Elaboración de los "Planos de Diagnóstico de la Situación Actual del Sistema de Drenaje Urbano de Antofagasta y Situación Optimizada" en escala 1:5.000 (10 láminas).

En los siguientes acápite se presentan ejemplos extraídos del Anexo XI que sirven para ilustrar los aspectos más relevantes del diagnóstico del sistema de drenaje de las aguas lluvias de la ciudad de Antofagasta.

10.2. EJEMPLO 1. DIAGNÓSTICO DE LA QUEBRADA LA CHIMBA

10.2.1. Áreas de inundación

En la Figura 10.1 se muestran las áreas de inundación generadas sobre el plano urbano de la ciudad de Antofagasta, por las crecidas para los periodos de retorno de T=25 y T=100 años para la quebrada La Chimba. En total, la superficie anegada es de aproximadamente 40 ha para T=25 años, mientras que para T=100 años la superficie anegada se duplica, alcanzando el valor de 82 ha.

Para la crecida con T=25 años, se observa que el escurrimiento se bifurca por el norte y sur del vertedero municipal, el que presenta una serie de movimientos de tierra que son alcanzados por la crecida generada por la quebrada.

Se observa que el brazo norte escurre principalmente por las calles quebrada La Chimba y Los Topacios hasta alcanzar y atravesar la Avenida Pedro Aguirre Cerda, donde la crecida inunda el paso bajo nivel para posteriormente canalizarse a través del cauce ubicado de dicho punto, mientras que otra parte del flujo escurre a través de la avenida Edmundo Pérez Zujovic (Costanera).

Para el brazo sur de la inundación se observa que este inunda parte de los sitios en los que se han realizado movimientos de tierra y hacia aguas abajo, el escurrimiento alcanza el plano urbano en la calle Abichita, pasando luego por las calles Limonita, Caparrosa y Santiago Humberstone, alcanzando su descarga en el mar al atravesar la Avenida Edmundo Pérez Zujovic.

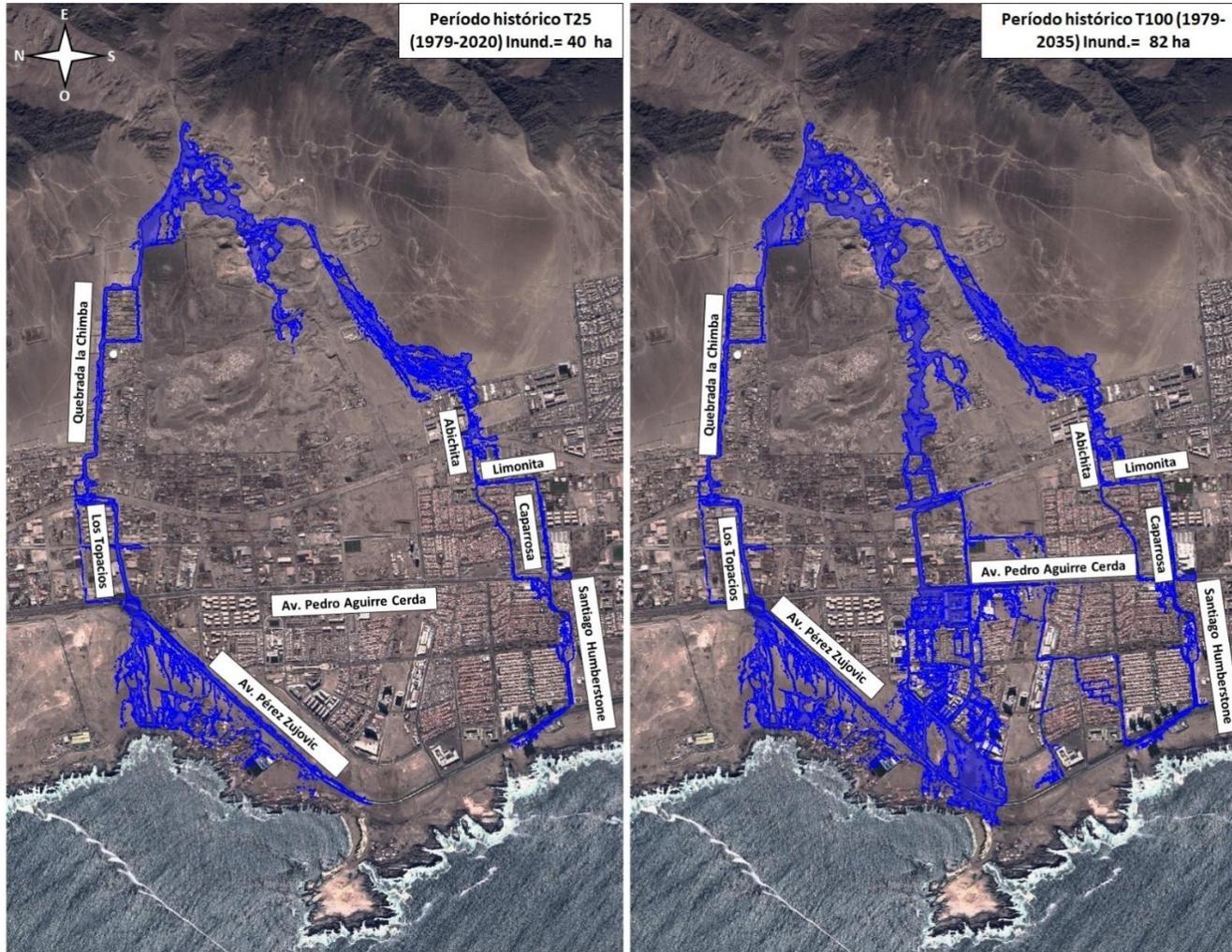
En cambio, para la crecida con T=100 años, a los brazos mencionados anteriormente se agrega un tercer brazo que anega el sector industrial ubicado aguas abajo del Vertedero de la Chimba, el cual confluye con el brazo norte sobre la Avenida Edmundo Pérez Zujovic.

Estos resultados están graficados en el plano "Planos de Diagnóstico de la Situación Actual del Sistema de Drenaje Urbano de Antofagasta y Situación Optimizada".

10.2.2. Profundidad de inundación

En cuanto a las profundidades alcanzadas por el escurrimiento generado por la quebrada La Chimba, estas se muestran en la Figura 10.2 para T=25 años.

Figura 10.1 Áreas de inundación en Quebrada La Chimba, para T= 25 y T=100 años



ACTUALIZACIÓN PLAN MAESTRO DE EVACUACIÓN Y DRENAJE DE AGUAS LLUVIAS DE ANTOFAGASTA

APRISA - AC INGENIEROS CONSULTORES LTDA

JOSE ANTONIO SOFFIA 2747 - OF. 011 - 012 - 013 - 014 - CODIGO POSTAL 6650363 – PROVIDENCIA, SANTIAGO, CHILE

TELEFONO (56-2) 2335 2252 – gerencia@aprisa.cl

Informe Final – Jun. 2022

Figura 10.2 Profundidades en flujos detríticos en Quebrada La Chimba, Para T=25 años



ACTUALIZACIÓN PLAN MAESTRO DE EVACUACIÓN Y DRENAJE DE AGUAS LLUVIAS DE ANTOFAGASTA

APRISA - AC INGENIEROS CONSULTORES LTDA

JOSE ANTONIO SOFFIA 2747 - OF. 011 - 012 - 013 - 014 - CODIGO POSTAL 6650363 – PROVIDENCIA, SANTIAGO, CHILE
TELEFONO (56-2) 2335 2252 – gerencia@aprisa.cl

Informe Final – Jun. 2022

En esta última figura cabe destacar la presencia de puntos bajos en los sectores cercanos al vertedero municipal de la ciudad, donde se alcanzan profundidades de hasta 15,6 m.

También es destacable el punto bajo generado por la presencia del paso bajo nivel en la intersección de la Avenida Pedro Aguirre cerca con la calle Los Topacios antes mencionada, anegando totalmente el paso bajo nivel, con una profundidad máxima de 8,1 m.

10.2.3. Mapa de velocidades

El mapa de velocidades de la Quebrada La Chimba se muestra en la Figura 10.3 para T=25 años, a partir de lo que se observa que las máximas velocidades se concentran en el brazo norte de la mancha de inundación, donde se tienen valores de 5,7 m/s y 4,5 m/s sobre las calles Quebrada La Chimba y Los Topacios, respectivamente.

Por su parte, para el brazo sur de la mancha de inundación, se observan velocidades significativamente menores, que alcanzan valores de 1,4 m/s.

10.3. EJEMPLO 2. DIAGNÓSTICO DE LAS QUEBRADAS SALAR DEL CARMEN Y LA CADENA

10.3.1. Áreas de inundación

En la Figura 10.4 se muestran las áreas de inundación generadas por las crecidas con períodos de retorno T=25 y T=100 años en las quebradas Salar del Carmen y La Cadena, y las correspondientes áreas de influencia. En total, la superficie anegada es de aproximadamente 24 ha para T=25 años, mientras que para T=100 años la superficie aumenta a 34 ha.

Para la crecida de T=25 años se observa que el escurrimiento de la quebrada Salar del Carmen se concentra sobre la Avenida Salvador Allende, desde el punto de descarga de los canales colectores existentes hasta el colector que existente en la intersección entre la Avenida Salvador Allende y la calle Bellavista.

Por otra parte, para el escurrimiento de la quebrada La Cadena, se observa que el flujo inunda la Avenida Padre Alberto Hurtado en su intersección con la calle Quito en una extensión de 300 m de la avenida. Aguas abajo de la calle Quito, el flujo se dispersa sobre la red vial, para unirse al escurrimiento de la Quebrada Salar del Carmen en la Avenida Salvador Allende, entre la calle Soncor y la Avenida Antonio Rendic. Finalmente, el flujo es captado por el colector existente en el cruce entre la Avenida Salvador Allende y la calle Bellavista.

Para la crecida con T=100 años, si bien el patrón de drenaje es similar en gran parte del plano urbano, se tiene que el colector ubicado en la descarga del sistema tiene una capacidad de aproximadamente 43 m³/s, viéndose superado por la crecida generada por las Quebradas Salar del Carmen y La Cadena en conjunto. De esta forma, el flujo detrítico escurre hasta alcanzar el océano, cruzando la Avenida Edmundo Pérez Zujovic en varios tramos.

Figura 10.3 Mapa de velocidades en Quebrada La Chimba, para T=25 años



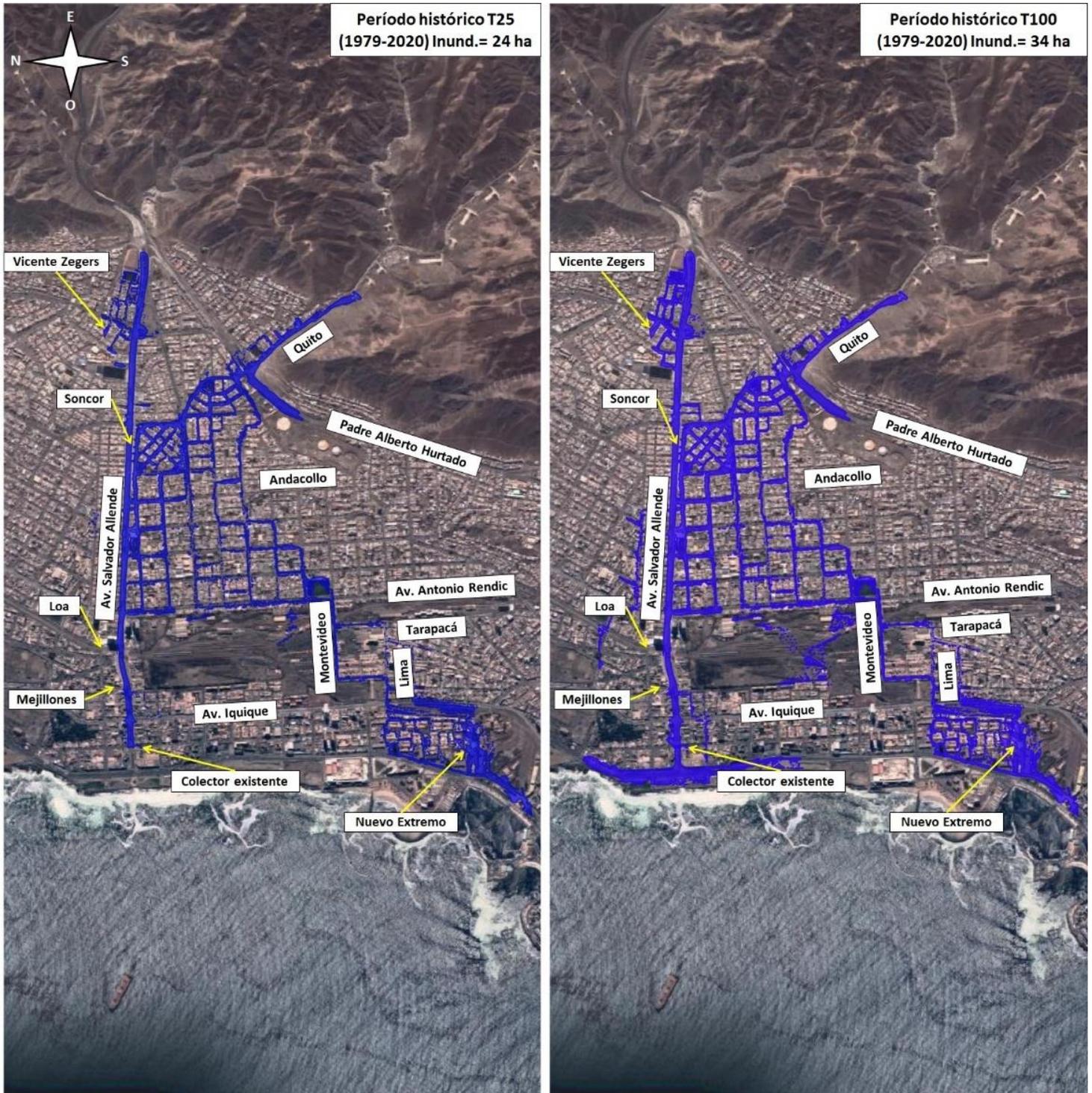
ACTUALIZACIÓN PLAN MAESTRO DE EVACUACIÓN Y DRENAJE DE AGUAS LLUVIAS DE ANTOFAGASTA

APRISA - AC INGENIEROS CONSULTORES LTDA

JOSE ANTONIO SOFFIA 2747 - OF. 011 - 012 - 013 - 014 - CODIGO POSTAL 6650363 – PROVIDENCIA, SANTIAGO, CHILE
TELEFONO (56-2) 2335 2252 – gerencia@aprisa.cl

Informe Final – Jun. 2022

Figura 10.4 Áreas de inundación quebradas Salar del Carmen y La Cadena T=25 y T=100 años



10.3.2. Profundidad de inundación

En la Figura 10.5 se muestran las profundidades máximas alcanzadas por el escurrimiento de la crecida en las quebradas Salar del Carmen y La Cadena para el T=25 años y las áreas de influencia relacionadas con ellas.

Para el escurrimiento de la Quebrada Salar del Carmen se detecta la presencia de puntos bajos en la calle Vicente Zegers, con una profundidad máxima de 2,5 m y, aguas abajo, en el bandejón central de la Avenida Salvador Allende entre las calles Mejillones y Loa.

En este sector las profundidades máximas alcanzan los 0,7 m.

Por otra parte, el escurrimiento detrítico de la quebrada La Cadena posee un punto bajo sobre el deslinde de la Dirección de Obras Sanitarias en la Avenida Padre Alberto Hurtado, donde se registran profundidades de hasta 6 m en una extensión de 300 m de la avenida, pero esa profundidad debe entenderse como una exageración del modelo, ya que este deslinde posee aproximadamente 2 m de altura y, por lo tanto, ésta sería la máxima profundidad que podría adoptar el escurrimiento.

Aguas abajo, existen puntos bajos en la calle Andacollo entre las calles México y Venezuela, y sobre la Avenida Antonio Rendic sobre el deslinde del patio de ferrocarriles, entre la calle Colombia y el pasaje Uruguay. En estos puntos las profundidades máximas alcanzan entre 1,5 m y 2,3 m respectivamente.

10.3.3. Mapa de velocidades

El mapa de velocidades de las quebradas Salar del Carmen y La Cadena se muestra en la Figura 10.6 para el periodo de retorno T=25 años.

A partir de dicho mapa se observa que la velocidad máxima se experimenta en los flujos detríticos de las quebradas Salar del Carmen se encuentra sobre la Avenida Salvador Allende, alcanzando valores de 8 m/s.

En el escurrimiento de La Cadena, en cambio, las velocidades máximas se alcanzan sobre la calle Quito, inmediatamente aguas abajo de la descarga de las obras de control aluvional, con valores de hasta 7,6 m/s.

10.4. EJEMPLO 3 DIAGNÓSTICO DE LAS QUEBRADAS RIQUELME, BAQUEDANO Y URIBE

10.4.1. Áreas de Inundación

En la Figura 10.7 se muestran las áreas de inundación generadas las crecidas con períodos de retorno T=25 y T=100 años, en las quebradas Riquelme, Baquedano y Uribe junto su área de influencia. En total, la superficie anegada es de aproximadamente 30 ha para la crecida con T=25 años, mientras que para la crecida con T=100 años el área anegada es de 39 ha.

Figura 10.5 Profundidades en flujos detríticos en Salar del Carmen y La Cadena. T=25 años



Figura 10.6 Mapa de velocidades en quebradas Salar del Carmen y La Cadena para T=25 años



Figura 10.7 Áreas de inundación en quebradas Riquelme, Baquedano y Uribe para T=25 y T=100 años



ACTUALIZACIÓN PLAN MAESTRO DE EVACUACIÓN Y DRENAJE DE AGUAS LLUVIAS DE ANTOFAGASTA

APRISA - AC INGENIEROS CONSULTORES LTDA

JOSE ANTONIO SOFFIA 2747 - OF. 011 - 012 - 013 - 014 - CODIGO POSTAL 6650363 – PROVIDENCIA, SANTIAGO, CHILE
TELEFONO (56-2) 2335 2252 – gerencia@aprisa.cl

Informe Final – Jun. 2022

Para la quebrada Riquelme se puede observar que la crecida escurre por las calles Covadonga Nueva y Riquelme hasta alcanzar la calle San Martín, donde cambia su dirección hacia el suroeste y confluye con la inundación provocada por la quebrada Baquedano.

Por su parte, la quebrada Baquedano aguas abajo de la descarga de la alcantarilla existente escurre principalmente por la calle del mismo nombre, alcanzando luego las calles Maipú y Arturo Prat. Aguas abajo, parte de su escurrimiento se bifurca en la calle Condell hacia el suroeste para confluir con la crecida de la quebrada Uribe, mientras que la otra parte escurre hacia el noreste para finalmente retomar la calle Antonio José de Sucre y finalmente atravesar la Avenida Balmaceda y descargar en el mar. Por último, el flujo proveniente de la quebrada Uribe se divide en la parte alta por las calles Quebrada Uribe, Uribe, Teniente Orella y Lientur, alcanzando luego la calle 21 de Mayo y Maipú.

Al acercarse a la costanera, el flujo alcanza las calles Condell, Latorre, y San Martín, para luego atravesar la Avenida Balmaceda y descargar hacia el mar en la zona del puerto de Antofagasta.

En general, el patrón de drenaje no se ve alterado por la crecida con $T=100$ años, y la superficie anegada aumenta principalmente sobre el plano urbano cercano al borde costero.

10.4.2. Profundidad de inundación

En la Figura 10.8 se muestran las profundidades máximas alcanzadas por el escurrimiento de la crecida $T=25$ años en las quebradas Riquelme, Baquedano y Uribe y en sus áreas de influencia, observándose la presencia de puntos bajos en las intersecciones de algunas calles, las que se mencionan a continuación.

Para la quebrada Riquelme se detecta un punto bajo en la intersección de las calles Arturo Prat con Washington.

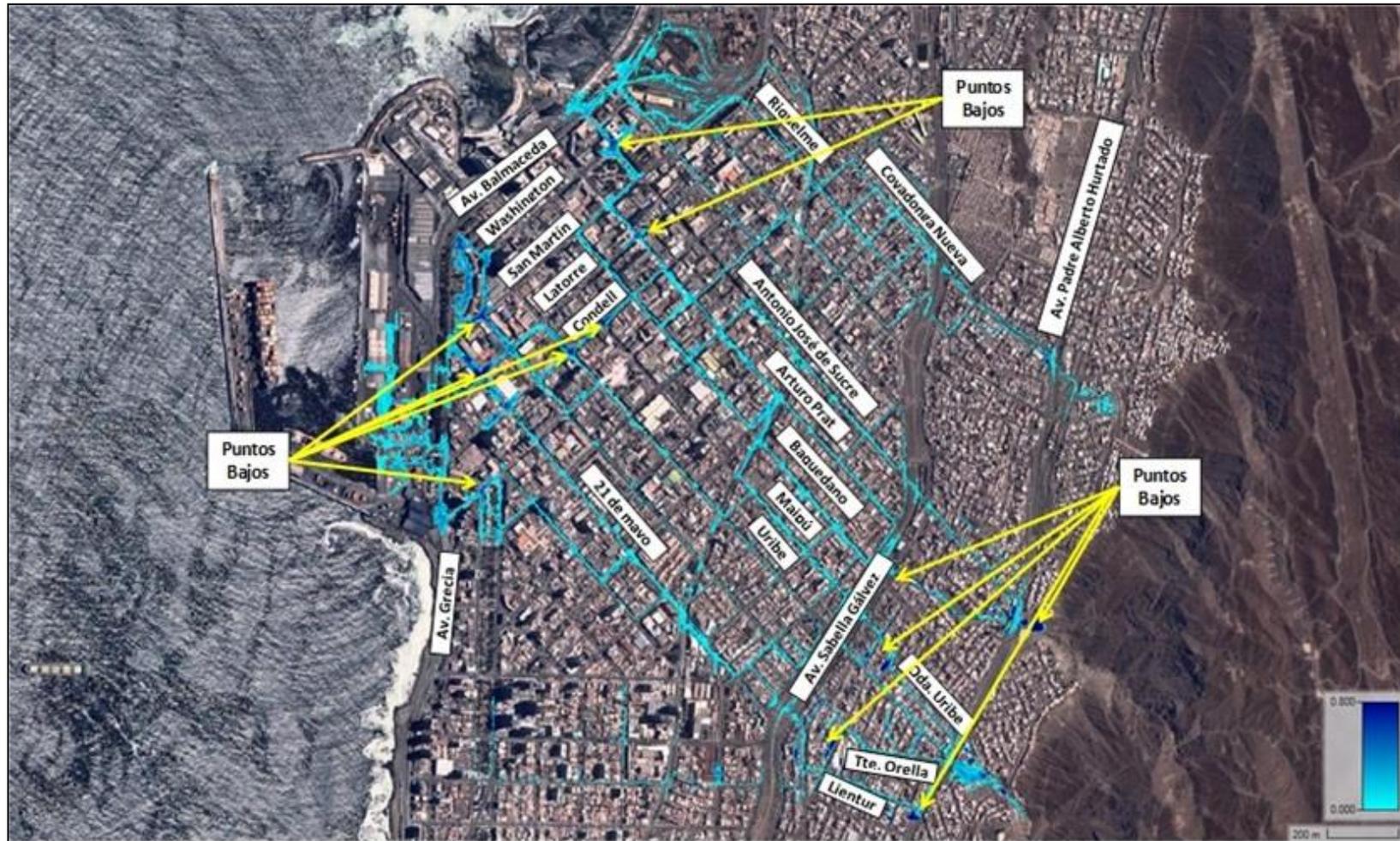
Por su parte para la quebrada Baquedano se revelan puntos bajos en las intersecciones de las calles Latorre con Arturo Prat, Avenida Padre Alberto Hurtado en la descarga de la quebrada sobre el plano urbano de la ciudad, Baquedano con Andrés Sabella y Condell con Maipú.

Para la quebrada Uribe se aprecian problemas de drenaje en las intersecciones de Lientur con Avenida Padre Alberto Hurtado, Quebrada Uribe, Uribe, Teniente Orella, Uribe con Condell, Latorre con 21 de Mayo, San Martín con Teniente Orella y Carrera con Mata junto a la avenida Grecia.

10.4.3. Mapa de velocidades

El mapa de velocidades de las quebradas Riquelme, Baquedano y Uribe se muestra en la Figura 10.9 para el periodo de retorno $T=25$ años, donde se observa que las mayores velocidades se dan en las calles Covadonga Nueva y Riquelme para la quebrada del mismo nombre, con valores que alcanzan los 4,5 m/s.

Figura 10.8 Profundidades en flujos detriticos en quebradas Riquelme, Baquedano y Uribe, para T=25 años



ACTUALIZACIÓN PLAN MAESTRO DE EVACUACIÓN Y DRENAJE DE AGUAS LLUVIAS DE ANTOFAGASTA

APRISA - AC INGENIEROS CONSULTORES LTDA

JOSE ANTONIO SOFFIA 2747 - OF. 011 - 012 - 013 - 014 - CODIGO POSTAL 6650363 – PROVIDENCIA, SANTIAGO, CHILE

TELEFONO (56-2) 2335 2252 – gerencia@aprisa.cl

Informe Final – Jun. 2022

Figura 10.9 Mapa de velocidades en quebradas Riquelme, Baquedano y Uribe, para T=25 años



ACTUALIZACIÓN PLAN MAESTRO DE EVACUACIÓN Y DRENAJE DE AGUAS LLUVIAS DE ANTOFAGASTA

APRISA - AC INGENIEROS CONSULTORES LTDA

JOSE ANTONIO SOFFIA 2747 - OF. 011 - 012 - 013 - 014 - CODIGO POSTAL 6650363 – PROVIDENCIA, SANTIAGO, CHILE
TELEFONO (56-2) 2335 2252 – gerencia@aprisa.cl

Informe Final – Jun. 2022

Para la quebrada Baquedano los mayores valores de velocidad ocurren en las calles Antonio José de Sucre, Baquedano y Maipú, con máximas que varían entre 4 m/s y 8,5 m/s. El peak entre estas vías de drenaje se verifica en la calle Baquedano, aguas abajo de la descarga del colector existente.

Por su parte, para la inundación generada por la quebrada Uribe, las máximas velocidades se dan en las calles Quebrada Uribe, Uribe, Teniente Orella, 21 de Mayo y Lientur, con máximas de 4,5 m/s, las cuales se concentran entre el punto de descarga de la quebrada sobre la Avenida Padre Alberto Hurtado y la Avenida Andrés Sabella Gálvez.

10.5. ANÁLISIS DE LAS PROYECCIONES DE CAMBIO CLIMÁTICO EN EL DIAGNÓSTICO DEL DRENAJE DE AGUAS LLUVIAS EN LA SITUACIÓN ACTUAL

Con el fin de completar el diagnóstico del sistema de drenaje de la situación actual basado en las condiciones hidrológicas obtenidas del análisis del periodo histórico, que ha sido presentado en el capítulo precedente, se desarrolló un diagnóstico similar pero incorporando ahora las condiciones hidrológicas con proyecciones de cambio climático para el periodo 2035-2065 considerando los caudales calculados en el Anexo VIII del presente informe.

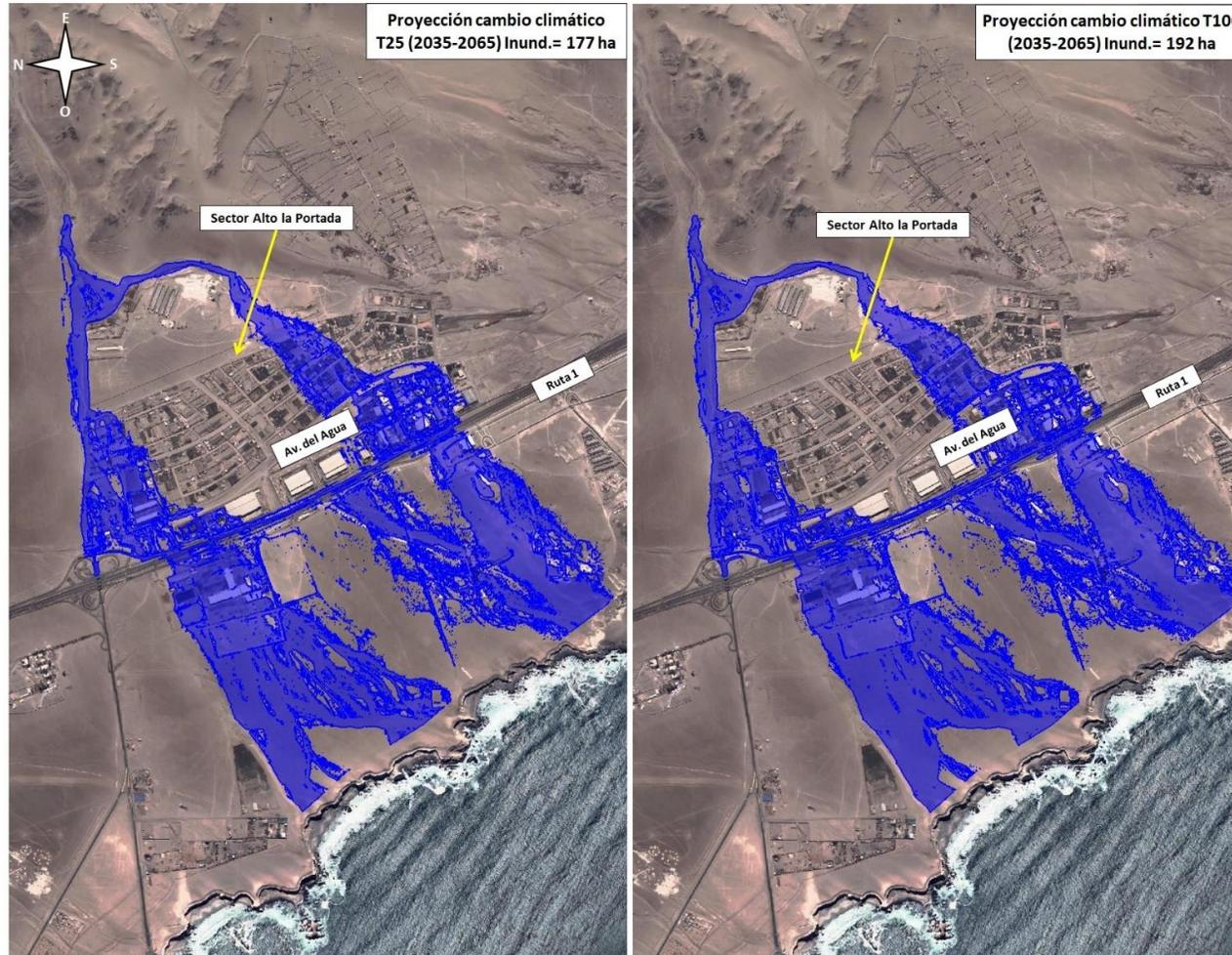
Dicho análisis se llevó a cabo realizando simulaciones en las quebradas del área de estudio para las nuevas condiciones hidrológicas, considerando las crecidas de T=25 y T=100 años empleadas en el diagnóstico determinado en base a registros históricos del periodo 1979-2020, al ser re-evaluadas con las proyecciones de cambio climático hechas en el periodo 2035-2065, lo que implica un aumento del orden del 65% en los caudales de las quebradas. Los resultados de estas simulaciones con proyecciones de cambio climático se compararon con las del diagnóstico precedente, en términos de áreas de inundación y profundidades de modo de poder visualizar los cambios que experimentaría el fenómeno por efecto de los mayores caudales originados por el cambio climático.

El análisis se llevó a cabo para todas las quebradas mencionadas antes, de manera de poder evaluar en ellas los efectos que tendría el cambio climático y como podría variar el diagnóstico de la situación actual del drenaje de las aguas lluvias de toda la ciudad, de ocurrir los caudales proyectados para el periodo 2035-2065.

10.5.1. Situación actual sin y con proyecciones de cambio climático de la quebrada N1

En la Figura 10.10 se muestran las áreas de inundación para los caudales de T=25 y T=100 años considerando el cambio climático en la quebrada N1, observándose que no existen cambios notorios en el patrón de drenaje de las aguas lluvias sobre la quebrada respecto a los resultados expuestos en los acápite anteriores. El área de inundación de la quebrada N1, para la crecida de T=25 años con proyecciones de cambio climático cuyo caudal peak detrítico es de 33,05 m³/s, resultó igual a 177 ha y esta resulta ser solo un 15% mayor respecto a la esperada para el caudal T=25 años del periodo histórico (Q_{peak}=19,9 m³/s).

Figura 10.10 Áreas de inundación de T= 25 y T=100 años con y proyección con cambio climático. Quebrada N1



ACTUALIZACIÓN PLAN MAESTRO DE EVACUACIÓN Y DRENAJE DE AGUAS LLUVIAS DE ANTOFAGASTA

APRISA - AC INGENIEROS CONSULTORES LTDA

JOSE ANTONIO SOFFIA 2747 - OF. 011 - 012 - 013 - 014 - CODIGO POSTAL 6650363 – PROVIDENCIA, SANTIAGO, CHILE

TELEFONO (56-2) 2335 2252 – gerencia@aprisa.cl

Informe Final – Jun. 2022

Por su parte, para la crecida de T=100 años con proyecciones de cambio climático ($Q_{peak} = 56,4 \text{ m}^3/\text{s}$) se espera un área de inundación de 192 ha. Al comparar los resultados obtenidos para la crecida de T=25 años basada en condiciones hidrológicas históricas, se tiene que esta alcanzó un valor de 101 ha, con lo que se deduce un aumento del 30% asociado al efecto cambio climático.

Puede apreciarse que el cambio en superficie es significativamente menor que el incremento en los caudales, ya que el peak de la crecida sin cambio climático es $14,3 \text{ m}^3/\text{s}$. En otras palabras, la crecida que resultaría por efecto del cambio climático sería un 66% mayor que la primera. El relativo menor impacto que tiene el importante incremento en los caudales, se explica básicamente por las condiciones topográficas del terreno inundable y en alguna medida también, por la disposición de la trama urbana ya que se presenta una pronunciada pendiente del terreno y de las calles de este a oeste, en el sentido del flujo, lo que hace que sea más difícil que el agua escurra en el sentido ortogonal (de sur a norte o viceversa), salvo cuando existen condiciones de pendientes y/o rugosidades locales que así lo permiten.

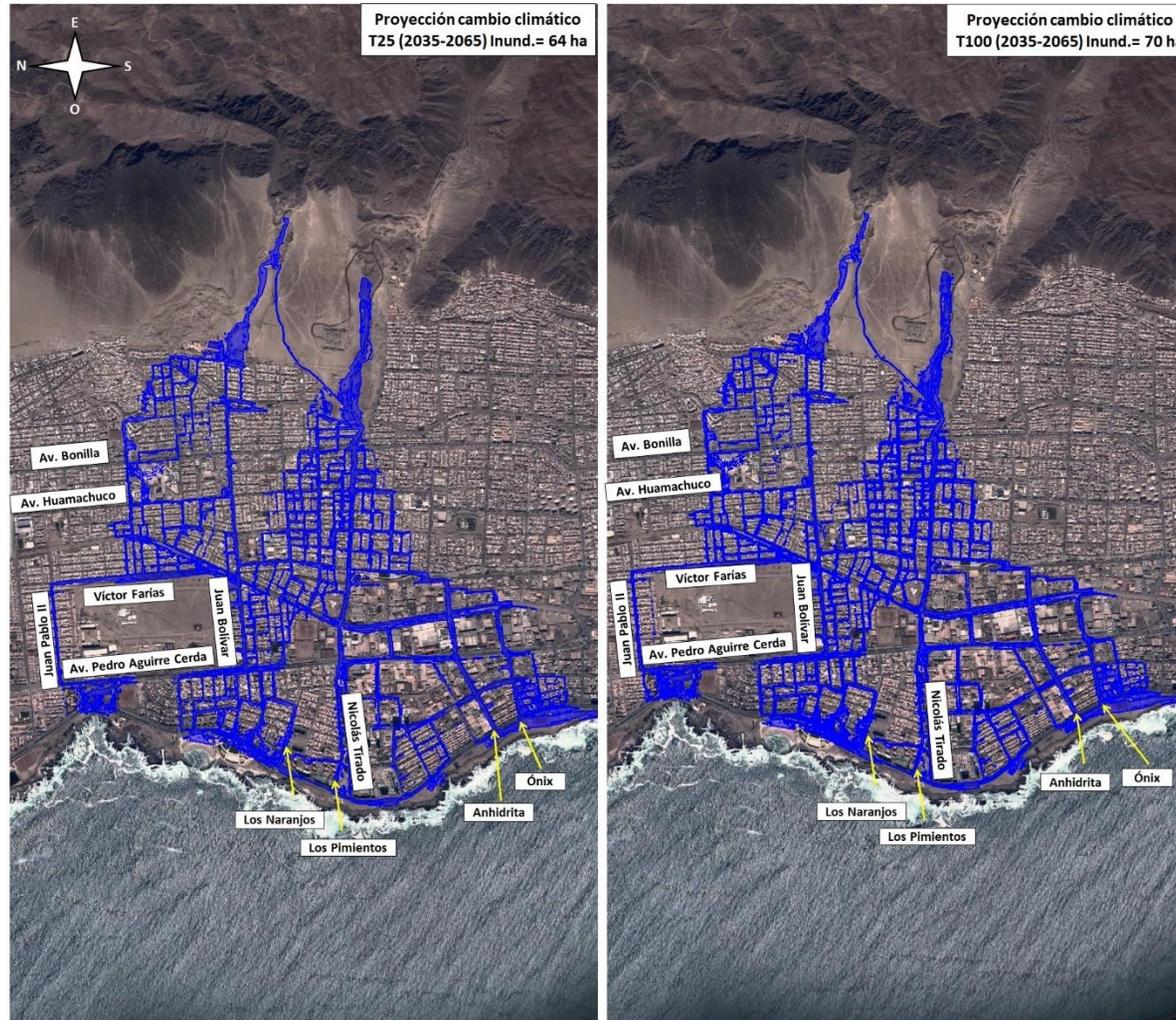
Por otro lado, la gran pendiente de las calles, sobre todo en los sectores del piedemonte y en general en la parte alta y media de la ciudad, genera condiciones de alta velocidad del flujo alcanzando éste, durante las crecidas, un régimen supercrítico o próximo a la crisis, lo que tiende a que los grandes aumentos de caudal por efecto del cambio climático, no se traduzcan tampoco en aumentos tan significativos de profundidad de la corriente.

10.5.2. Situación actual sin y con proyecciones de cambio climático de la quebrada Bonilla

De la Figura 10.11, se observa que las vías de escurrimiento principal no se ven alteradas al incorporar el impacto del cambio climático en la tormenta de diseño para la quebrada Bonilla. El área de inundación de la quebrada Bonilla, para la crecida de T=25 años con proyecciones de cambio climático cuyo caudal peak detrítico al sumar ambos brazos es de $26,8 \text{ m}^3/\text{s}$, resultó igual a 64 ha. Por su parte, para la crecida de T=100 años con proyecciones de cambio climático ($Q_{peak} = 45,9 \text{ m}^3/\text{s}$) se espera un área de inundación de 70 ha. Al comparar los resultados obtenidos para la crecida de T=25 años basada en condiciones hidrológicas históricas, se tiene que esta alcanzó un valor de 57 ha, con lo que se deduce un aumento del 16% asociado al efecto cambio climático.

Al igual que para el caso de la quebrada N1, con la comparación del aumento en superficie para las crecidas detríticas de T=25 años, se tiene que este es significativamente menor respecto al incremento en los caudales, cuya explicación se basa principalmente en la topografía característica de la zona que favorece el escurrimiento en el sentido este-oeste a altas velocidades, tal como se mencionó antes. De lo anterior se concluye que los grandes aumentos de caudal no generan aumentos tan significativos en las variables que caracterizan el comportamiento hidráulico del escurrimiento, considerando principalmente áreas de inundación, profundidad del flujo y velocidades.

Figura 10.11 Áreas de inundación de tormentas T=25 y T=100 años con y proyección con cambio climático. Quebrada Bonilla



ACTUALIZACIÓN PLAN MAESTRO DE EVACUACIÓN Y DRENAJE DE AGUAS LLUVIAS DE ANTOFAGASTA

APRISA - AC INGENIEROS CONSULTORES LTDA

JOSE ANTONIO SOFFIA 2747 - OF. 011 - 012 - 013 - 014 - CODIGO POSTAL 6650363 – PROVIDENCIA, SANTIAGO, CHILE
TELEFONO (56-2) 2335 2252 – gerencia@aprisa.cl

Informe Final – Jun. 2022

10.5.3. Situación actual sin y con proyecciones de cambio climático de las quebradas Riquelme, Baquedano y Uribe

De la Figura 10.12 se observa que las vías de escurrimiento principal no se ven significativamente alteradas al incorporar el impacto del cambio climático en la tormenta de diseño, notándose solo aumentos de inundación en el borde costero, especialmente en las áreas comprendidas entre las Avenidas Balmaceda y Grecia.

El área de inundación de las quebradas Riquelme, Baquedano y Uribe para la crecida de T=25 años con proyecciones de cambio climático, cuyos caudales peak detrítico son de 1,1 m³/s, 4,5 m³/s y 4,5 m³/s, respectivamente, resultó igual a 39 ha.

Por su parte, para la crecida de T=100 años con proyecciones de cambio climático (Q_{peak} = 1,8 m³/s, 7,7 m³/s y 7,7 m³/s) se espera un área de inundación de 41 ha.

Al comparar los resultados obtenidos para la crecida de T=25 años basada en condiciones hidrológicas históricas, se tiene que esta alcanzó un valor de 30 ha, con lo que se deduce un aumento del 30% asociado al efecto cambio climático.

Puede apreciarse que el cambio en superficie es significativamente menor que el incremento en los caudales, ya que los peak de las crecidas sin cambio climático son de 0,6 m³/s, 2,7 m³/s y 2,7 m³/s. En otras palabras, las crecidas que resultarían por efecto del cambio climático serían en promedio un 67% mayor que las primeras.

El relativo menor impacto que tiene el importante incremento en los caudales, se explica básicamente por las condiciones topográficas del terreno inundable y en alguna medida también, por la disposición de la trama urbana ya que se presenta una pronunciada pendiente del terreno y de las calles de este a oeste, en el sentido del flujo, lo que hace que sea más difícil que el agua escurra en el sentido perpendicular, salvo cuando existen condiciones de pendientes y/o rugosidades locales que así lo permiten.

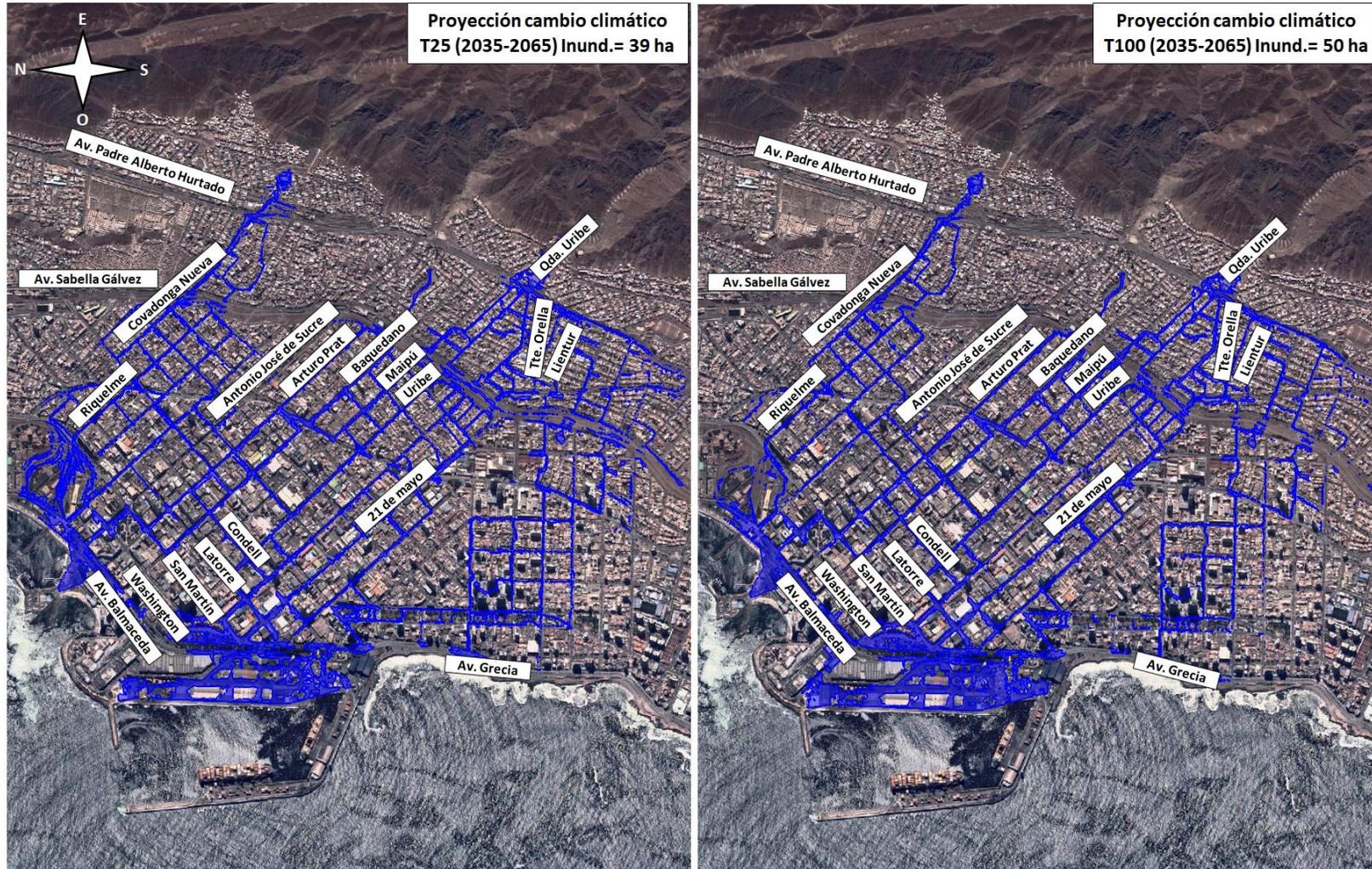
De lo anterior se concluye que los grandes aumentos de caudal no generan aumentos tan significativos en las variables que caracterizan el comportamiento hidráulico del escurrimiento, considerando principalmente áreas de inundación, profundidad del flujo y velocidades.

10.5.4. Situación actual sin y con proyecciones de cambio climático de la quebrada Caliche

De la Figura 10.13, se observa que las vías de escurrimiento principal no se ven alteradas al incorporar el impacto del cambio climático en la tormenta de diseño para la quebrada Caliche.

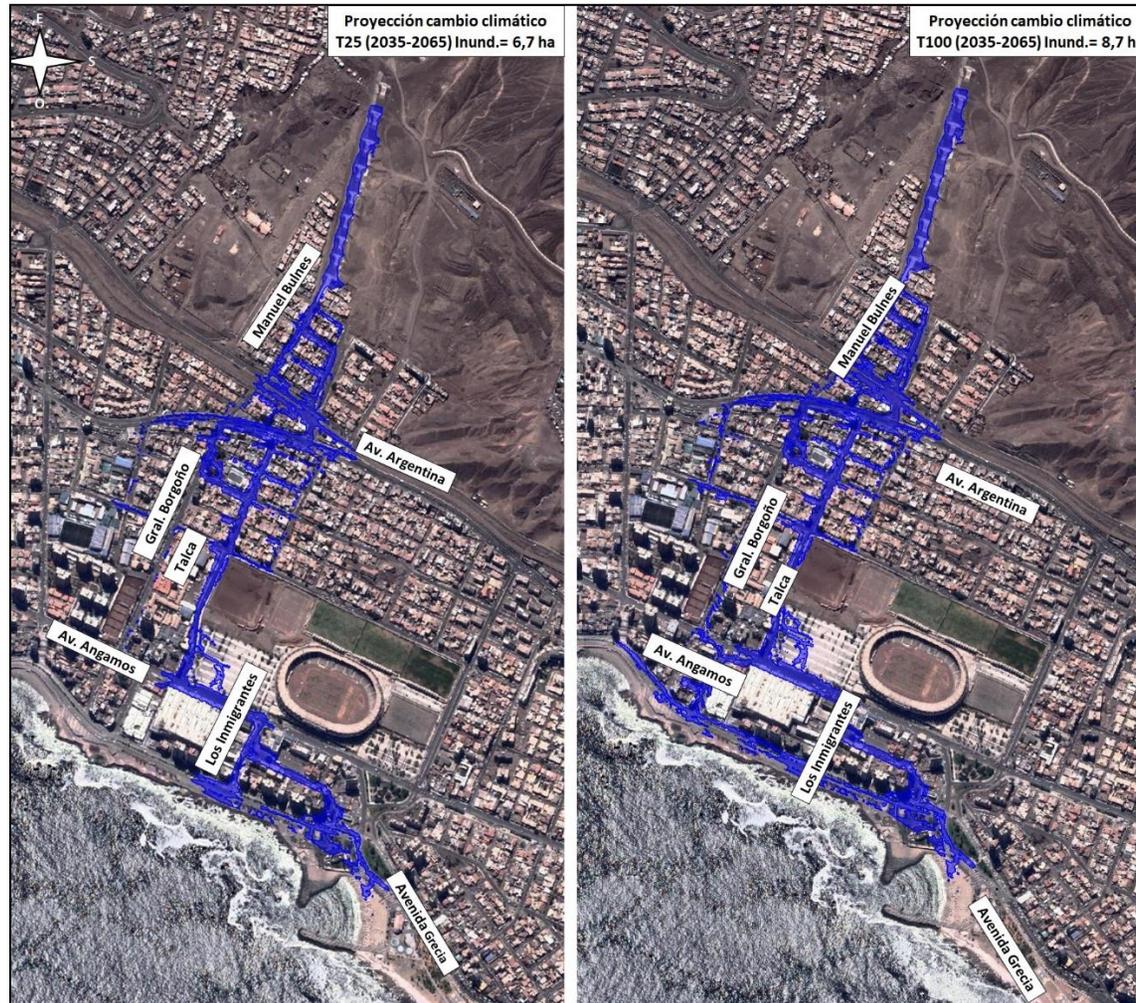
El área de inundación de la quebrada Caliche, para la crecida de T=25 años con proyecciones de cambio climático cuyo caudal peak detrítico es de 12,3 m³/s, resultó igual a 21 ha.

Figura 10.12 Áreas de inundación T=25 y T=100 años con proyección con cambio climático. Qdas Riquelme, Baquedano y Uribe



ACTUALIZACIÓN PLAN MAESTRO DE EVACUACIÓN Y DRENAJE DE AGUAS LLUVIAS DE ANTOFAGASTA

Figura 10.13 Áreas de inundación de T=25 y T=100 años con cambio climático. Quebrada El Toro



ACTUALIZACIÓN PLAN MAESTRO DE EVACUACIÓN Y DRENAJE DE AGUAS LLUVIAS DE ANTOFAGASTA

APRISA - AC INGENIEROS CONSULTORES LTDA

JOSE ANTONIO SOFFIA 2747 - OF. 011 - 012 - 013 - 014 - CODIGO POSTAL 6650363 – PROVIDENCIA, SANTIAGO, CHILE
TELEFONO (56-2) 2335 2252 – gerencia@aprisa.cl

Informe Final – Jun. 2022

Por su parte, para la crecida de $T=100$ años con proyecciones de cambio climático ($Q_{peak} = 21 \text{ m}^3/\text{s}$) se espera un área de inundación de 26 ha.

Al comparar los resultados obtenidos para la crecida de $T=25$ años basada en condiciones hidrológicas históricas, se tiene que esta alcanzó un valor de 18 ha, con lo que se deduce un aumento del 16% asociado al efecto cambio climático.

Puede apreciarse que el cambio en superficie es significativamente menor que el incremento en los caudales, ya que el peak de la crecida sin cambio climático es $7,4 \text{ m}^3/\text{s}$. En otras palabras, la crecida que resultaría por efecto del cambio climático sería un 67% mayor que la primera.

Al igual que para el caso de quebradas mencionadas antes, al comparar el aumento en superficie para las crecidas detriticas de $T=25$ años, se tiene que este es significativamente menor respecto al incremento en los caudales, cuya explicación se basa principalmente en la topografía característica de la zona que favorece el escurrimiento en el sentido este-oeste a altas velocidades, tal como se mencionó antes.

10.5.5. Situación actual sin y con proyecciones de cambio climático de las quebradas S2 y S3

De la Figura 10.14 se observa que las vías de escurrimiento principal no se ven alteradas al incorporar el impacto del cambio climático en la tormenta de diseño.

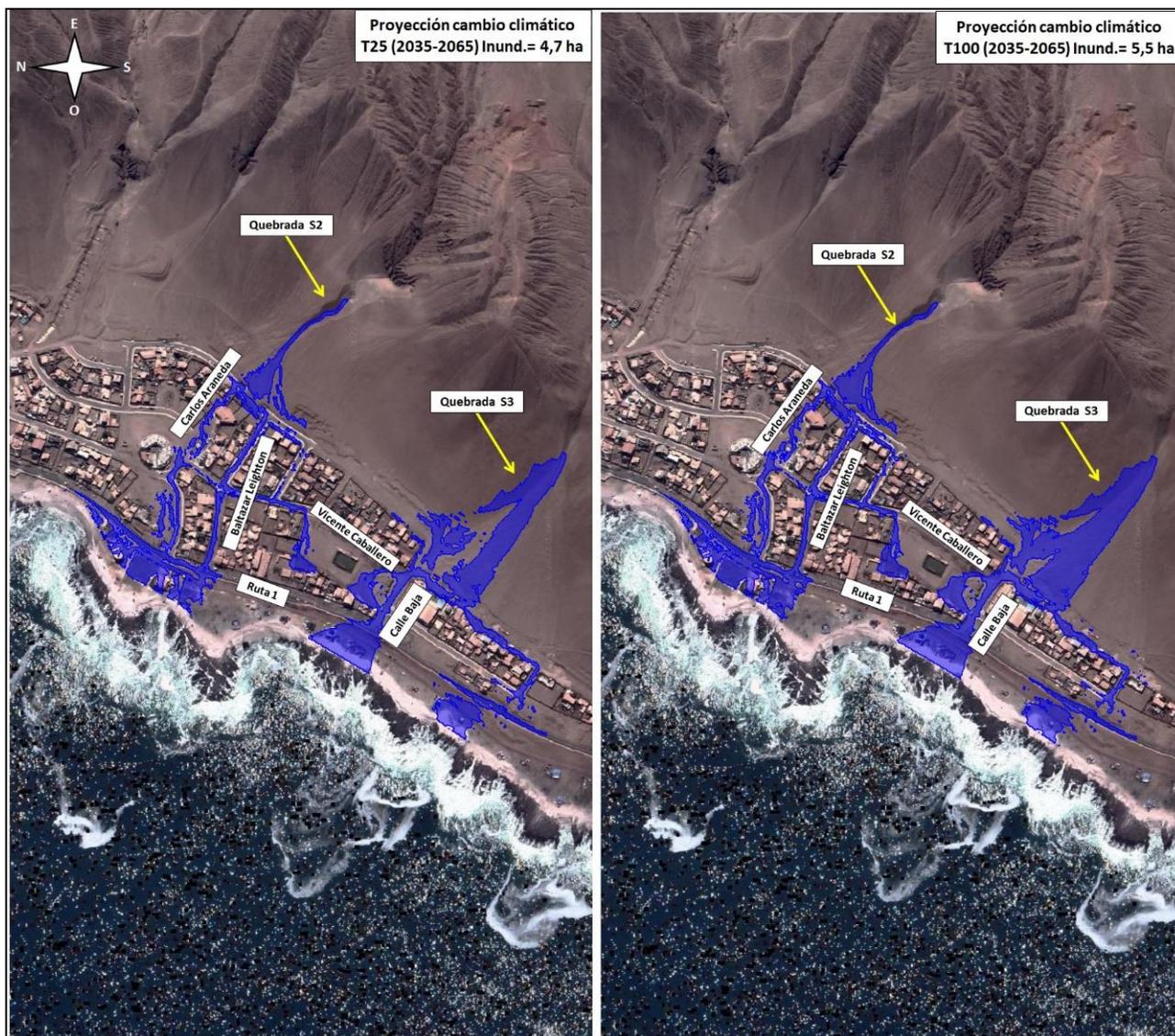
El área de inundación de la quebradas S2 y S3, para la crecida de $T=25$ años con proyecciones de cambio climático cuyos caudales peak detritico son de $1,1 \text{ m}^3/\text{s}$ y $3,4 \text{ m}^3/\text{s}$, respectivamente, resultó igual a 4,7 ha.

Por su parte, para la crecida de $T=100$ años con proyecciones de cambio climático ($Q_{peak} = 1,8 \text{ m}^3/\text{s}$ y $5,8 \text{ m}^3/\text{s}$ para las quebradas S2 y S3) se espera un área de inundación de 5,5 ha.

Al comparar los resultados obtenidos para la crecida de $T=25$ años basada en condiciones hidrológicas históricas, se tiene que esta alcanza un valor de 3,8 ha, con lo que se deduce un aumento del 24% asociado al efecto cambio climático.

Puede apreciarse que el cambio en superficie es significativamente menor que el incremento en los caudales, ya que el peak de la crecida sin cambio climático es $0,6 \text{ m}^3/\text{s}$ y $2 \text{ m}^3/\text{s}$ para las quebradas S2 y S3, respectivamente. En otras palabras, la crecida que resultaría por efecto del cambio climático sería un 68% mayor que la primera, concluyéndose nuevamente que los grandes aumentos de caudal no generan aumentos tan significativos en las variables que caracterizan el comportamiento hidráulico del escurrimiento, considerando principalmente áreas de inundación, profundidad del flujo y velocidades.

Figura 10.14 Áreas inundación T=25 y T=100 años con cambio climático. Quebradas S2 y S3



10.5.6. Resumen de los efectos del cambio climático

En las Tabla 10.1, Tabla 10.2 y Tabla 10.3 se resume los efectos sobre los caudales peak y áreas de inundación en las quebradas de Antofagasta, al incorporar el cambio climático para los periodos de retorno de T=25, T=50 y T=100 años.

De lo presentado en las tablas, se concluye que el escenario con cambio climático proyectado para el período 2035-2065 presenta un incremento promedio de los caudales peak de aproximadamente 66,6% para las crecidas de T=25 años, de alrededor de 66,7% para las crecidas de T=50 años y del orden de 61,3% para las crecidas de T=100 años respectivamente.

Tabla 10.1 Efectos del cambio climático sobre el diagnóstico del drenaje. T= 25 años

Quebrada	Período histórico (1979-2020)		Proyección con cambio climático (2035-2065)		Aumento en caudal peak con cambio climático	Aumento de área inundada con cambio climático (%)
	Caudal peak (m³/s)	Área de inundación (ha)	Caudal peak (m³/s)	Área de inundación (ha)	(%)	
N0	14,3	101	23,8	131	66,3	30
N1	19,9	154	33,1	177	66,4	15
N2	4,6	54	7,6	69	66,2	28
Varas Norte	6,4	51	10,6	84	66,0	65
Varas Sur	1,8	10	3,1	15	66,8	50
La Chimba	22,9	40	38,2	82	66,7	105
La Roca	5,0	18	8,3	22	66,1	22
Club Hípico	7,1	21	11,8	25	66,3	19
Bonilla norte	6,4	57	10,6	64	66,5	12
Bonilla sur	9,7		16,2		66,5	
Farellones	6,9	23	11,4	27	66,2	17
Salar del Carmen	26,1	24	43,3	34	66,2	42
La Cadena	16,7		27,8		66,3	
El Ancla	1,8	8,4	3,0	11,6	66,3	38
Schneider	0,6	1,3	1,0	1,6	65,6	23
Riquelme	0,6	30	1,0	39	68,9	30
Baquedano	2,7		4,5		65,8	
Uribe	2,7		4,5		66,5	
El Toro	7,1	5,7	11,8	6,7	66,3	18
Caliche norte	4,3	18	7,2	21	66,1	17
Caliche sur	3,1		5,1		66,4	
Universidad de Antofagasta	2,6	8	4,3	10,3	65,6	29
Jardín del Sur	10,5	3,6	17,5	3,9	66,2	8
Huáscar	4,4	1	7,4	1,1	67,7	10
S1	0,6	1,6	1,0	2	68,4	25
S2	0,6	3,8	1,1	4,7	68,8	24
S3	2,0		3,4		67,2	

Tabla 10.2 Efectos del cambio climático sobre el diagnóstico del drenaje. T= 50 años

Quebrada	Período histórico (1979-2020)		Proyección con cambio climático (2035-2065)		Aumento en caudal peak con cambio climático	Aumento de área inundada con cambio climático (%)
	Caudal peak (m³/s)	Área de inundación (ha)	Caudal peak (m³/s)	Área de inundación (ha)	(%)	
N0	19,3	115	32,0	151	65,6	31
N1	26,8	168	44,4	185	65,6	10
N2	6,2	62	10,3	76	65,6	23
Varas Norte	8,6	68	14,3	98	65,6	44
Varas Sur	2,5	12	4,1	17	65,5	42
La Chimba	31,0	61	51,4	92	66,0	51
La Roca	6,7	20	11,1	24	65,5	20
Club Hípico	9,6	23	15,9	27	65,6	17
Bonilla norte	8,6	61	14,3	72	65,6	19
Bonilla sur	13,2		21,8		65,7	
Farellones	9,3	26	15,3	30	65,7	15
Salar del Carmen	35,2	29	58,2	40	65,6	36
La Cadena	22,6		37,3		65,6	
El Ancla	2,4	9,4	4,0	13	65,6	38
Schneider	0,8	1,3	1,4	5,1	65,9	292
Riquelme	0,8	35	1,4	40	66,3	16
Baquedano	3,7		6,1		65,6	
Uribe	3,7		6,1		65,7	
El Toro	9,5	6,2	15,8	7,8	65,6	26
Caliche norte	5,9	21	9,7	25	65,5	19
Caliche sur	4,2		6,9		65,5	
Universidad de Antofagasta	3,5	9,4	5,8	11,9	65,5	27
Jardín del Sur	14,2	3,8	23,5	4,2	65,5	11
Huáscar	6,0	1	9,9	1,2	65,7	20
S1	0,8	1,8	1,3	2,2	65,4	22
S2	0,9	4,2	1,5	5,1	66,7	21
S3	2,8		4,6		65,9	

Tabla 10.3 Efectos del cambio climático sobre el diagnóstico del drenaje. T= 100 años

Quebrada	Período histórico (1979-2020)		Proyección con cambio climático (2035-2065)		Aumento en caudal peak con cambio climático	Aumento de área inundada con cambio climático (%)
	Caudal peak (m³/s)	Área de inundación (ha)	Caudal peak (m³/s)	Área de inundación (ha)	(%)	
N0	25,2	131	40,6	173	61,3	32
N1	35,0	177	56,4	192	61,3	8
N2	8,1	69	13,0	82	61,1	19
Varas Norte	11,2	84	18,1	113	61,2	35
Varas Sur	3,3	15	5,2	19	60,9	27
La Roca	8,8	22	14,1	27	61,2	23
La Chimba	40,5	82	65,3	102	61,5	24
Club Hípico	12,5	25	20,1	29	61,2	16
Bonilla norte	11,3	64	18,2	70	61,3	9
Bonilla sur	17,2		27,7		61,3	
Farellones	12,1	27	19,5	32	61,3	19
Salar del Carmen	45,8	34	73,9	45	61,2	32
La Cadena	29,4		47,4		61,2	
El Ancla	3,2	12	5,1	14	61,3	17
Schneider	1,1	1,6	1,7	5,8	61,7	263
Riquelme	1,1	39	1,8	41	60,6	5
Baquedano	4,8		7,7		61,4	
Uribe	4,8		7,7		61,2	
El Toro	12,4	6,7	20,1	8,7	61,3	30
Caliche norte	7,6	21	12,3	26	61,2	24
Caliche sur	5,4		8,7		61,2	
Universidad de Antofagasta	4,5	10,3	7,3	12,8	61,2	24
Jardín del Sur	18,5	3,9	29,8	4,4	61,3	13
Huáscar	7,8	1,1	12,6	1,3	61,2	18
S1	1,0	2	1,6	2,3	61,4	15
S2	1,1	4,7	1,8	5,5	61,4	17
S3	3,6		5,8		61,4	

Por otro lado, el incremento promedio en las superficies inundadas del plano urbano resulta para T=25 años, entre un 8% (quebrada Jardín del Sur) y sobre un 50% (quebradas Varas Norte, Varas Sur y La Chimba).

En el caso de las crecidas de T=100 años, este incremento en superficies inundadas resulta más acotado, puesto que está comprendido entre 5% (quebradas Riquelme, Baquedano y Uribe) y 35% (quebrada Varas Norte), salvo la excepción que representa la quebrada Schneider (incremento 263%) cuya área, sensiblemente menor que las de las demás quebradas, de 1,6 ha aumenta a 5,8 ha.

Los incrementos para crecidas de T=50 años están comprendidos dentro de los rangos extremos precedentemente señalados, lo cual es obvio ya que corresponden a caudales también intermedios entre los dos periodos de retorno extremos analizados.

En general, las crecidas simuladas en los escenarios sin y con cambio climático, presentan diferencias más importantes en cuanto a áreas inundadas en los sectores anegados más cerca del borde costero, pero no así cambios significativos en las vías de escurrimiento principal, es decir, dichas vías tienden a mantenerse en ambos escenarios.

10.6. DIAGNÓSTICO DE LA RED DE DRENAJE EN LA SITUACIÓN ACTUAL OPTIMIZADA

En base a los resultados presentados, se han descrito las situaciones en que las profundidades de inundación aparecen más críticas y que ameritan que sean mitigadas o mejoradas mediante soluciones de bajo costo, que puedan ser implementadas en el corto plazo.

En la Tabla 10.4 se individualizan los puntos críticos identificados y las soluciones de mitigación para dichos puntos, las cuales consideran zonas localizadas y de forma parcial de la situación actual del drenaje urbano de Antofagasta para cada uno de los sistemas analizados.

Cabe mencionar que se seleccionaron los puntos cuyas soluciones propuestas eventualmente no significan afectar a terceros, ya sea aumentando apreciablemente las profundidades del escurrimiento o extendiendo la superficie de inundación hacia sectores que originalmente no se encontraban afectados.

La implementación de las soluciones mencionadas requiere de inspecciones en terreno y el posterior estudio detallado de cada una de ellas, a fin de verificar la efectividad de estas.

Los puntos señalados en la tabla forman parte del plano "Planos de Diagnóstico de la Situación Actual del Sistema de Drenaje Urbano de Antofagasta y Situación Optimizada", donde se identifica gráficamente cada uno de estos puntos.

Tabla 10.4 Puntos críticos y soluciones locales de corto plazo de inundaciones

Punto	Descripción	Solución de Mitigación
N0-1	Cruce con Ruta 1 de flujo detrítico. Recinto militar aguas arriba. Hacia aguas abajo se observa la presencia de barreras New Jersey en la Ruta 1,	Reemplazar barreras New Jersey por rejas
N1-1	El bandejón central se encuentra por sobre la cota de la Ruta, generando una barrera	Rebajar parte del bandejón central para generar una zona de descarga
LAR-1	Punto bajo en Cruce con la Costanera	Rebajar las soleras para permitir el libre escurrimiento y su descarga hacia el mar
LAR-2	Punto bajo junto al parque Juan López	Lomo de toro en Pedro Aguirre Cerda con Caparrosa.
CLH-1	Punto bajo en Avenida Edmundo Pérez Zujovic con Chacalluta	Rebajar las soleras para permitir el libre escurrimiento y su descarga hacia el mar
CLH-2	Punto bajo en Avenida Edmundo Pérez Zujovic con Chamiza	Rebajar las soleras para permitir el libre escurrimiento y su descarga hacia el mar
BON-1	Punto bajo en calle Cerro Pedregal	Lomos de toro en pasajes Río Camarones, Río Palena y Héctor Erazo
BON-2	Punto Bajo en Los Cipreses con Avenida Edmundo Pérez Zujovic	Rebajar las soleras para permitir el libre escurrimiento y su descarga hacia el mar
BON-3	Punto bajo en Nicolás Tirado con Edmundo Pérez Zujovic	Rebajar las soleras para permitir el libre escurrimiento y su descarga hacia el mar
BON-4	Punto bajo en Artesanía con Edmundo Pérez Zujovic	Rebajar las soleras para permitir el libre escurrimiento y su descarga hacia el mar
FAR-1	Anegamiento de la calle Puerto Montt, por flujo proveniente de calles Yerbas Buenas	Lomo de toro en calle Yerbas Buenas y murete en Avenida Los Leones a la altura del punto identificado
FAR-2	Cobija con Avenida Edmundo Pérez Zujovic, presencia del bandejón central	Rebajar las soleras para permitir el libre escurrimiento y su descarga hacia el mar
FAR-3	La presencia del bandejón central genera la inundación en Víctor Jara con Avenida Edmundo Pérez Zujovic	Rebajar las soleras para permitir el libre escurrimiento y su descarga hacia el mar
FAR-4	Presencia de puntos bajos en las calles Aysén y Punta Arenas, entre Víctor Jara y Huasco	Lomos de toro en ambas calles junto a su intersección con Víctor Jara y Huasco
LAC-1	Punto Bajo en la Avenida Padre Alberto Hurtado entre las calles Quito y Zenteno	Lomo de toro en avenida Padre Alberto Hurtado junto a Quito
LAC-2	Punto bajo en la Calle Andacollo entre Venezuela y México	Lomos de toro junto a ambas intersecciones
ELT-1	Presencia de soleras y baja pendiente en la Avenida Grecia con Los Inmigrantes	Rebajar las soleras para permitir el libre escurrimiento y su descarga hacia el mar
CAL-1	Punto Bajo en la calle Coronel Emilio Sotomayor entre Radoslav Razmilic y Ariel Santibáñez	Lomos de toro en Osvaldo Silva con los Changos
CAL-2	Punto Bajo en la calle Coronel Emilio Sotomayor entre Radoslav Razmilic y Ariel Santibáñez	Lomos de toro en Coronel Emilio Sotomayor con Los Changos
UDA-1	Presencia del bandejón Central en la Avenida Universidad de Chile (Costanera)	Rebajar las soleras para permitir el libre escurrimiento y su descarga hacia el mar
JDS-1	Inundación desborda al pasaje sin nombre, inundando las calles Valle Apacible, Valle Soleado, Valle del Viento y Valle del Atardecer	Construcción de murete para impedir el escurrimiento por las calles afectadas
JDS-2	Punto bajo en la Avenida Jame Guzmán a la salida del pasaje sin nombre y presencia de un muro que impide la libre descarga del escurrimiento hacia el mar	Rebaje del muro para permitir el libre escurrimiento y su descarga hacia el mar

Punto	Descripción	Solución de Mitigación
HUA-1	Disminución de la pendiente por presencia de la Avenida Jaime Guzmán y solera sobre el borde oeste de la misma	Rebajar las soleras para permitir el libre escurrimiento y su descarga hacia el mar
S2-1	Disminución de la pendiente en intersección de Carlos Araneda con Avenida Jaime Guzmán y cambio de la dirección del escurrimiento	Rebajar las soleras para permitir el libre escurrimiento y su descarga hacia el mar
S2-2	Anegamiento de un punto bajo junto a cancha de fútbol ubicada en intersección de Vicente Caballero con Calle Baja	Lomos de toro en Vicente Caballero con Baltazar Leighton y Calle Baja con Baltazar Leighton
S3-1	Anegamiento de un punto bajo junto a cancha de fútbol ubicada en intersección de Vicente Caballero con Calle Baja	Lomo de toro en acceso a la cancha o relleno del punto bajo
S3-2	Disminución de pendiente y presencia de solera en costado poniente de la intersección de la calle baja con Avenida Jaime Guzmán	Rebajar las soleras para permitir el libre escurrimiento y su descarga hacia el mar
S3-3	Presencia de solera en costado poniente de la Avenida Jaime Guzmán	Rebajar las soleras para permitir el libre escurrimiento y su descarga hacia el mar

11. DIAGNÓSTICO DE LAS INUNDACIONES ASOCIADAS A LAS QUEBRADAS N1, LA ROCA, SCHNEIDER, S2 Y S3

Como ha sido señalado anteriormente, dentro de las 27 quebradas caracterizadas en el presente estudio, las quebradas denominadas como N1, La Roca, Schneider, S2 y S3 no presentan actualmente obras de control aluvional en su descarga sobre el plano urbano, como tampoco poseen estudios desarrollados por la DOH para encauzar y controlar los flujos detríticos de estas cuencas.

En el presente capítulo se describen las simulaciones HEC RAS que permiten caracterizar los flujos detríticos en dichas quebradas y las inundaciones que ellos podrían generar en el plano urbano de la ciudad de Antofagasta, en la situación actual.

Los resultados obtenidos y análisis llevados a cabo para crecidas detríticas distintos periodos de retorno, en cada una de las 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.

Los detalles sobre las simulaciones desarrolladas y los análisis efectuados se encuentran incluidos en el Anexo XII "Diagnóstico de las Inundaciones en Situación Actual para las Quebradas N1, La Roca, Schneider, S2 Y S3", del presente informe.

11.1. HIDROGRAMAS DETRÍTICOS

Se generaron los hidrogramas de crecida detríticos para los periodos de retorno T= 25, T=50 y T=100 años para cada una de las quebradas, considerando una duración de lluvia de D=3 horas con caudal peak determinado por la fórmula racional y tiempo al peak de los hidrogramas iguales al tiempo de concentración de la cuenca respectiva.

11.2. ESCENARIOS DE SIMULACIÓN

Se consideraron tres escenarios, a saber: hidrogramas detriticos con período retorno de $T=25$, $T=50$ y $T=100$ años. Estos hidrogramas fueron propios de cada una de las cinco quebradas en estudio, y se simuló su descarga sobre el plano urbano para caracterizar el escurrimiento.

A modo de ejemplo se describen a continuación el diagnóstico de las inundaciones de las quebradas La Roca y Schneider. La información de las otras quebradas puede ser consultada en el Anexo XII.

11.3. INUNDACIONES EN LA QUEBRADA LA ROCA Y EN SU ÁREA DE INFLUENCIA

11.3.1. Áreas de inundación

En la Figura 11.1 se muestran graficadas las áreas de inundación para la quebrada La Roca, generadas sobre el plano urbano de la ciudad de Antofagasta, por las crecidas con períodos de retorno $T=25$, $T=50$ y $T=100$ años.

De las superficies mostradas se constata que las áreas abarcadas son similares, anegando respectivamente, 18, 20 y 22 ha, para los caudales con período de retorno $T=25$, $T=50$ y $T=100$ años.

Se observa que la descarga de la quebrada La Roca sobre el plano urbano ocurre sobre la calle Pablo Neruda, bifurcándose antes de alcanzar la calle Uno Oriente.

En cuanto a la canalización detectada en su descarga durante la visita a terreno, se observa que ésta presenta escurrimiento solo para la crecida detritica asociada al periodo de retorno 100 años, sin embargo, dicha canalización para este tipo de crecidas no resulta efectiva para desviar el flujo hacia las calles Caparrosa y Abichita, concentrándose el escurrimiento sobre la calle Pablo Neruda.

Se observa que las principales vías de escurrimiento para la crecida proveniente de la quebrada La Roca corresponden a Pablo Neruda, Caparrosa, Santiago Humberstone, Abichita y Sendero del Sol.

Además, se observan escurrimientos de importancia en calles perpendiculares al sentido principal del flujo, tales como: Uno Oriente, Héroes de la Concepción (calle contigua a la línea férrea), Avenida Pedro Aguirre Cerda y Avenida Edmundo Pérez Zujovic (Costanera).

En la descarga al mar se observa que esta ocurre principalmente en dos sectores, ubicándose el primero de ellos justo frente al término de la calle Santiago Humberstone de manera puntual, mientras que se observa una descarga con un escurrimiento más difuso entre la calle Oficina Petronila y la antes mencionada.

En base a los resultados de la modelación, se elaboró un plano en escala 1:5.000, donde se muestran las superficies de inundación para los periodos de retorno de $T=25$ y $T=100$ años.

Figura 11.1 Áreas de inundación en Quebrada La Roca



ACTUALIZACIÓN PLAN MAESTRO DE EVACUACIÓN Y DRENAJE DE AGUAS LLUVIAS DE ANTOFAGASTA

APRISA - AC INGENIEROS CONSULTORES LTDA

JOSE ANTONIO SOFFIA 2747 - OF. 011 - 012 - 013 - 014 - CODIGO POSTAL 6650363 - PROVIDENCIA, SANTIAGO, CHILE
TELEFONO (56-2) 2335 2252 - gerencia@aprisa.cl

Informe Final - Jun. 2022

11.3.2. Profundidad de inundación

Las profundidades alcanzadas sobre el plano urbano por los flujos detríticos de la quebrada La Roca se muestran en la Figura 11.2, a partir de lo cual se observa una serie de puntos bajos en el sentido perpendicular al escurrimiento principal.

El primero de ellos se ubica en la calle Uno Oriente, entre Caparrosa y Abichita, donde se observan profundidades por sobre 1 m para el periodo de retorno de $T=25$ años.

Hacia aguas abajo le sigue un punto ubicado en la calle Abichita, entre los Poetas y Héroes de la Concepción, donde se alcanzan profundidades de hasta 0,7 m de profundidad.

En la Calle Héroes de la Concepción y la Línea Férrea entre Caparrosa y Abichita, se advierte la presencia de dos zonas que alcanzan profundidades de hasta 1 m.

En las cercanías del Parque Juan López se detecta también la presencia de puntos bajos, los que alcanzan profundidades de 0,70 m.

Cabe mencionar que la misma situación se repite para los tres periodos de retorno simulados.

11.3.3. Mapa de velocidades

El mapa de velocidades de la quebrada La Roca se muestra en la Figura 11.3, de donde se puede observar lo siguiente:

- Se identificó que las máximas velocidades ocurren en las calles.
- Las velocidades máximas se observan en las calles Pablo Neruda (7 m/s), Uno Oriente (4 m/s), Caparrosa (4,5 m/s) y Santiago Humberstone (3,5 m/s).
- Con lo anterior se verifican que las calles mencionadas corresponden a las vías principales de escurrimiento.
- Al cruzar la información de la Figura 11.3 con la mostrada en la Figura 11.2 (mapa de profundidades), se tiene que las velocidades sobre los puntos bajos son siempre menores a 0,8 m/s.
- En la Avenida Edmundo Pérez Zujovic (Costanera) se observan velocidades inferiores a los 2,5 m/s para el periodo de retorno de $T=25$ años.

Figura 11.2 Profundidades en flujos detríticos en Quebrada La Roca



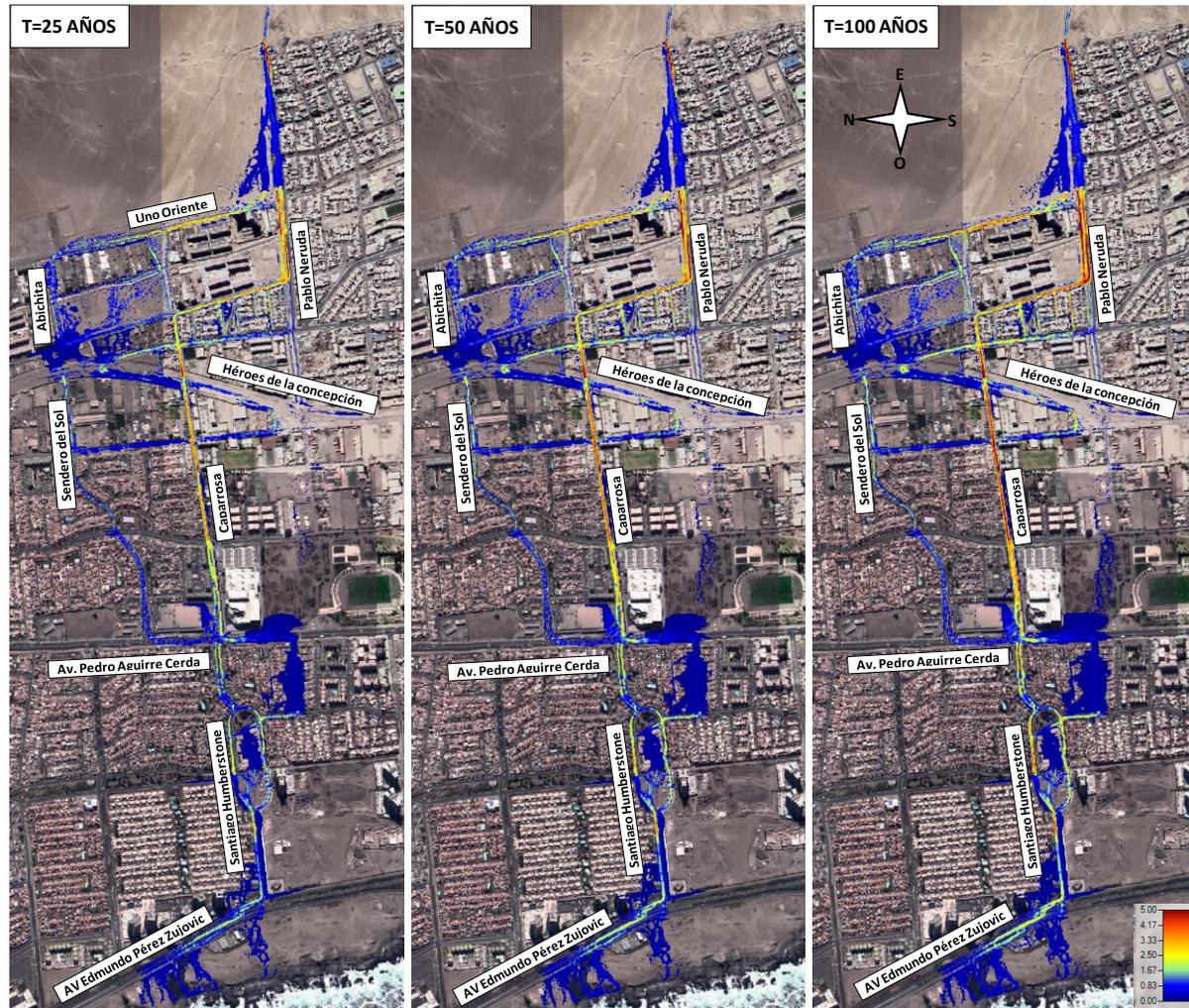
ACTUALIZACIÓN PLAN MAESTRO DE EVACUACIÓN Y DRENAJE DE AGUAS LLUVIAS DE ANTOFAGASTA

APRISA - AC INGENIEROS CONSULTORES LTDA

JOSE ANTONIO SOFFIA 2747 - OF. 011 - 012 - 013 - 014 - CODIGO POSTAL 6650363 – PROVIDENCIA, SANTIAGO, CHILE
TELEFONO (56-2) 2335 2252 – gerencia@aprisa.cl

Informe Final – Jun. 2022

Figura 11.3 Mapa de velocidades en Quebrada La Roca



ACTUALIZACIÓN PLAN MAESTRO DE EVACUACIÓN Y DRENAJE DE AGUAS LLUVIAS DE ANTOFAGASTA

APRISA - AC INGENIEROS CONSULTORES LTDA

JOSE ANTONIO SOFFIA 2747 - OF. 011 - 012 - 013 - 014 - CODIGO POSTAL 6650363 – PROVIDENCIA, SANTIAGO, CHILE
TELEFONO (56-2) 2335 2252 – gerencia@aprisa.cl

Informe Final – Jun. 2022

11.3.4. Análisis de resultados y conclusiones

A partir de los resultados obtenidos se concluye que las áreas de inundación de T=25, T=50 y T=100 años, son 18, 20 y 22 ha, respectivamente, siendo las principales vías de escurrimiento las calles Pablo Neruda, Caparrosa, Santiago Humberstone, Abichita y Sendero del Sol.

También se observan escurrimientos de importancia en calles perpendiculares al sentido principal del flujo, tales como: Uno Oriente, Héroes de la Concepción, Avenidas Pedro Aguirre Cerda y Edmundo Pérez Zujovic.

Las simulaciones de la crecida detrítica generada en la quebrada La Roca para los periodos de retorno de T=25, T=50 y T=100 años dejan en evidencia la presencia de puntos bajos en las calles Uno Oriente, Abichita, Héroes de la Concepción y en las cercanías del Parque Juan López.

En cuanto a las velocidades esperadas, destacan las máximas velocidades detectadas en la calle Pablo Neruda, que alcanzan valores de 7 m/s.

Sin embargo, a medida que el escurrimiento se acerca al mar, las velocidades disminuyen hasta valores de 2 m/s para la avenida Edmundo Pérez Zujovic (Costanera).

Al observar que cerca de la zona de descarga, una parte del flujo aluvional escurre hacia el norte, alcanzando la calle Uno Oriente y mediante ésta, el inicio de la calle Caparrosa y Abichita, generando el punto bajo, puede concluirse que una modificación local en Pablo Neruda podría redirigir este escurrimiento y así disminuir el área de inundación provocada por la crecida de la quebrada.

11.4. INUNDACIONES EN LA QUEBRADA SCHNEIDER Y EN SU ÁREA DE INFLUENCIA

11.4.1. Áreas de inundación

En la Figura 11.4 se grafican las áreas de inundación generadas por crecidas con períodos de retorno T=25, T=50 y T=100 años para en la quebrada Schneider.

De las superficies de inundación mostradas se constata que las áreas abarcan respectivamente, 1,3, 1,3 y 1,6 ha, para los caudales con período de retorno de T=25, T=50 y T=100 años.

Se observa que la quebrada descarga directamente sobre el campamento Aurora Esperanza, identificado en el Anexo II: “Antecedentes de Población en Conos de Deyección y Análisis De Exposición a Riesgos Hidrometeorológicos”.

Agua abajo alcanza la calle Martin Luther King, para luego dividirse en las calles Dos Norte y Guayaquil principalmente, mientras que solo una pequeña porción escurre por la calle Panamá.

Figura 11.4 Áreas de inundación en Quebrada Schneider



ACTUALIZACIÓN PLAN MAESTRO DE EVACUACIÓN Y DRENAJE DE AGUAS LLUVIAS DE ANTOFAGASTA

APRISA - AC INGENIEROS CONSULTORES LTDA

JOSE ANTONIO SOFFIA 2747 - OF. 011 - 012 - 013 - 014 - CODIGO POSTAL 6650363 – PROVIDENCIA, SANTIAGO, CHILE

TELEFONO (56-2) 2335 2252 – gerencia@aprisa.cl

Informe Final – Jun. 2022

Luego se observa como la mayor parte de la inundación se concentra sobre la Avenida Padre Alberto Hurtado, generando una superficie de inundación de relativa importancia.

Se observa asimismo que el escurrimiento queda retenido en este punto, no alcanzando una descarga hacia el mar.

En base a los resultados de la modelación, se elaboró un plano en escala 1:2.500, donde se muestran las superficies de inundación para los periodos de retorno de T=25 y T=100 años.

11.4.2. Profundidad de inundación

En la Figura 11.5 se muestra un mapa con las profundidades del escurrimiento, figura que es acompañada de una escala que va desde un color celeste claro para profundidades cercanas a 0 m hasta un azul oscuro para los sectores que alcanzan una profundidad sobre 0,5 m.

En la figura mencionada se observa que el escurrimiento se concentra sobre la Avenida Padre Alberto Hurtado, debido al muro de cierre perimetral del Cementerio General de Antofagasta.

En dicho punto bajo se alcanzan profundidades entre 1,67 m y 2,28 m para los periodos de retorno de T=25 y T=100 años.

Para analizar en mayor detalle esta situación, se muestran las curvas de nivel cada 1 m en el área de interés en la Figura 11.6, donde queda en evidencia la presencia de punto bajo al visualizar que el escurrimiento de las calles Dos Norte y Avenida Padre Alberto Hurtado se convergen sobre dicho lugar.

11.4.3. Mapa de velocidades

El mapa de velocidades de la Quebrada Schneider que se muestra en la Figura 11.7, revela lo siguiente:

- Las máximas velocidades se dan en la descarga de la quebrada Schneider en los alrededores del campamento Aurora Esperanza, observándose que se alcanzan valores de 4,8 m/s debido a la alta pendiente que presenta este cauce.
- El paso de la crecida en los terrenos mismos del campamento se da con velocidades que fluctúan en torno a los 0,5 m/s.
- Las mayores velocidades se concentran en la Calle 2 Norte, constituyéndose de esta manera como vía de evacuación principal de la crecida.
- En dicha calle se alcanzan valores de hasta 4,6 m/s.

Figura 11.5 Profundidades en flujos detríticos en Quebrada Schneider



ACTUALIZACIÓN PLAN MAESTRO DE EVACUACIÓN Y DRENAJE DE AGUAS LLUVIAS DE ANTOFAGASTA

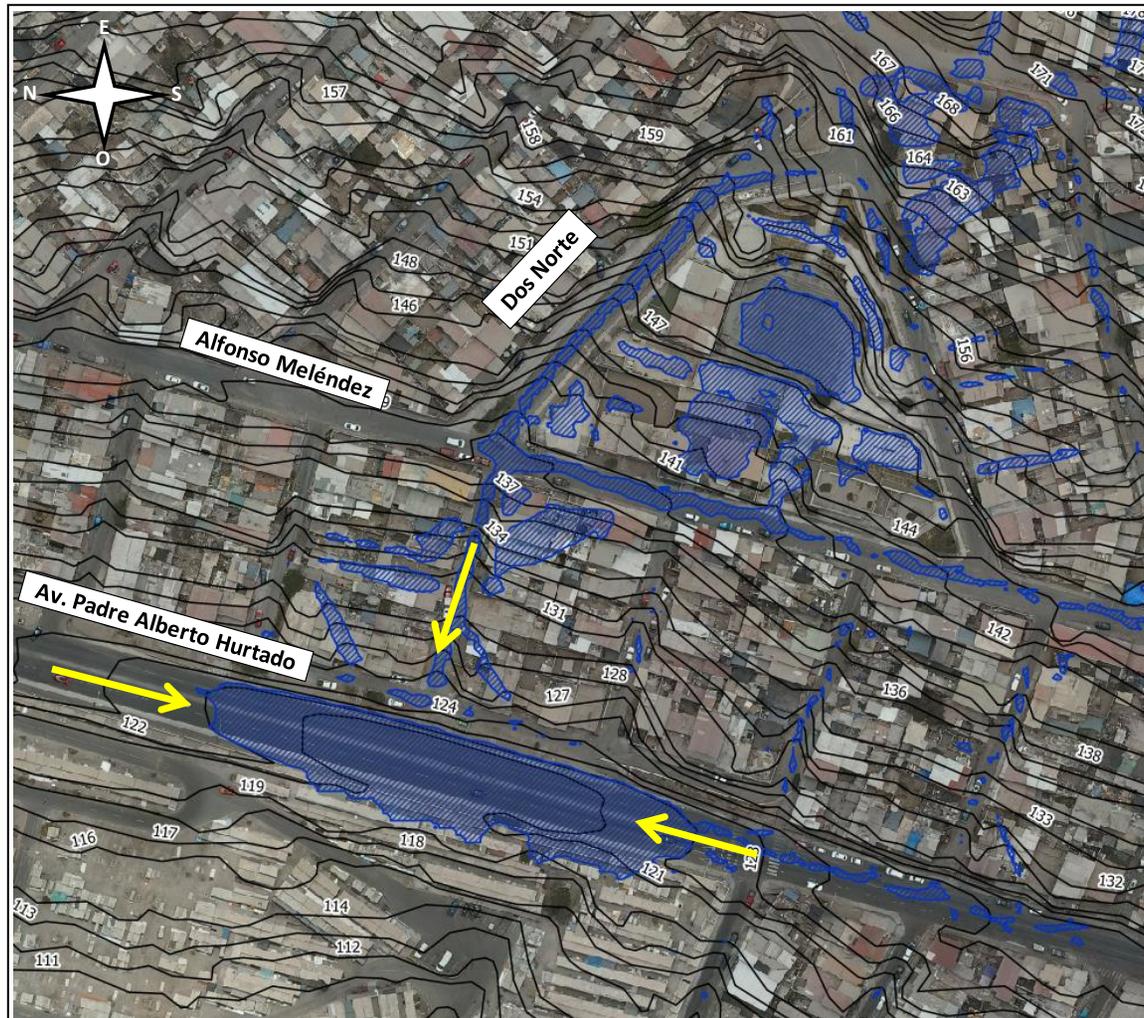
APRISA - AC INGENIEROS CONSULTORES LTDA

JOSE ANTONIO SOFFIA 2747 - OF. 011 - 012 - 013 - 014 - CODIGO POSTAL 6650363 – PROVIDENCIA, SANTIAGO, CHILE

TELEFONO (56-2) 2335 2252 – gerencia@aprisa.cl

Informe Final – Jun. 2022

Figura 11.6 Curvas de nivel y área de inundación en Quebrada Schneider



ACTUALIZACIÓN PLAN MAESTRO DE EVACUACIÓN Y DRENAJE DE AGUAS LLUVIAS DE ANTOFAGASTA

APRISA - AC INGENIEROS CONSULTORES LTDA

JOSE ANTONIO SOFFIA 2747 - OF. 011 - 012 - 013 - 014 - CODIGO POSTAL 6650363 – PROVIDENCIA, SANTIAGO, CHILE
TELEFONO (56-2) 2335 2252 – gerencia@aprisa.cl

Informe Final – Jun. 2022

Figura 11.7 Mapa de Velocidades en la quebrada Schneider



ACTUALIZACIÓN PLAN MAESTRO DE EVACUACIÓN Y DRENAJE DE AGUAS LLUVIAS DE ANTOFAGASTA

APRISA - AC INGENIEROS CONSULTORES LTDA

JOSE ANTONIO SOFFIA 2747 - OF. 011 - 012 - 013 - 014 - CODIGO POSTAL 6650363 - PROVIDENCIA, SANTIAGO, CHILE

TELEFONO (56-2) 2335 2252 - gerencia@aprisa.cl

Informe Final - Jun. 2022

11.4.4. Análisis de resultados y conclusiones

En base a los resultados obtenidos de las simulaciones para los periodos de retorno T=25, T=50 y T=100 años, se observa que las superficies de inundación son respectivamente, 1,3 ha, 1,3 ha y 1,6 ha, constatándose que la descarga de las aguas de la quebrada se hace directamente hacia el Campamento Aurora Esperanza.

A partir de este punto, la crecida pasa a través de la calle Martin Luther King, dividiéndose el escurrimiento entre las calles Dos Norte, Guayaquil y Panamá. En la primera de estas se concentra gran parte de la escorrentía. Aguas abajo, el agua se acumula y queda retenida en el punto bajo detectado en la Avenida Padre Alberto Hurtado, donde se alcanzan profundidades sobre 2 m para el periodo de retorno de T=100 años.

Considerando lo anterior, ocurre que el escurrimiento no descarga hacia el mar por lo cual es necesario estudiar medidas para evitar la acumulación de agua en este punto, dado que puede causar la falla por volcamiento del muro perimetral del Cementerio General de Antofagasta.

Una posibilidad para dar solución a lo comentado es modificar la intersección de la calle Dos Norte con Martin Luther King, de manera de evitar que el escurrimiento alcance el punto bajo detectado tras el Cementerio General de Antofagasta en la avenida Padre Alberto Hurtado, estableciendo como vías de evacuación las calle Ecuador, Libertad y Covadonga que de esta manera confluirían los flujos con los escurrimientos de la quebrada Riquelme.

11.5. SÍNTESIS DEL DIAGNÓSTICO DE LAS INUNDACIONES DE LAS 5 QUEBRADAS

Según se observa en la Tabla 11.1, los incrementos de las áreas inundadas ocasionadas por crecidas de periodo de retorno de T=50 años, son en promedio menos del 10%, al ser comparados con las respectivas áreas de T=25 años, en tanto las correspondientes a crecidas de T=100 años son del orden de 20%. Estos incrementos son significativamente menores a los de los respectivos caudales ya que éstos son del orden de 35% a 50% en el caso de crecidas de T=50 años y del orden de 80% para crecidas de T=100 años.

Tabla 11.1 Resumen de caudales y áreas de inundación para T= 25, 50 y 100 años

Quebrada	T=25 años		T=50 años				T=100 años			
	Q m³/s	Área inundada (ha)	Q m³/s	Área inundada (ha)	Aumentos c/r a T= 25 años (%)		Q m³/s	Área inundada (ha)	Aumentos c/r a T= 25 años (%)	
					Q	Área			Q	Área
N1	19,9	154	26,8	168	35%	9%	35	171	76%	11%
La Roca	5	18	6,7	20	34%	11%	8,8	22	76%	22%
Schneider	0,6	1,3	0,8	1,3	33%	0%	1,1	1,6	83%	23%
S2	0,6	3,8	0,9	4,2	50%	11%	1,1	4,7	83%	24%
S3	2		2,8		40%		3,6		80%	

El relativo menor incremento en las superficies inundadas con respecto al respectivo incremento en los caudales para las crecidas de T=50 y T=100 años, comparado con la de T=25 años, se debe

principalmente a la alta pendiente de este a oeste que presenta la ciudad de Antofagasta, lo cual hace que el flujo tienda a canalizarse en las calles que siguen esta dirección, fluyendo solo perpendicularmente cuando encuentra obstáculos o pendientes favorables en sentido norte-sur o viceversa.

Dado que estas calles tienen baja rugosidad y capacidad hidráulica suficiente para las 3 magnitudes de crecidas analizadas, el escurrimiento tiende a concentrarse en pocas calles bajando del piedemonte hacia el océano, con poca dispersión lateral.

A partir de los resultados se han detectado además, varios puntos bajos en el escurrimiento, los que se concentran generalmente en calles perpendiculares al escurrimiento, siendo el caso más notorio en la Avenida Padre Alberto Hurtado debido al paso de la crecida producida en la quebrada Schneider, donde toda el agua generada se acumula aguas arriba del muro perimetral del Cementerio General de Antofagasta.

12. PROPOSICIÓN DE CATASTROS

En el Anexo XIII “Proposición de Catastro y Levantamientos Topográficos para Estudios Futuros” del presente informe, se presentan detalladamente los catastros de infraestructura relacionada con la evacuación de aguas lluvias, que se propone llevar a cabo.

Estos catastros tienen como finalidad general, evaluar la vigencia de catastros anteriores, y actualizarlos o complementarlos por ejemplo, con levantamientos topográficos de calles o zonas específicas, si así fuese necesario para su uso en futuras consultorías.

A partir del diagnóstico de la problemática de las inundaciones por aguas lluvias y de la descripción de los sistemas de drenaje de aguas lluvias, junto con los antecedentes obtenidos de las visitas a terreno efectuadas en el presente estudio, se identificaron los sectores que se propone sean catastrados y aquellos donde se recomienda hacer levantamientos topográficos que servirán de insumo en estudios posteriores a esta Consultoría.

12.1. BASES Y FUNDAMENTOS PARA REALIZAR LA PROPOSICIÓN DE CATASTROS

Como parte del PM-26 se desarrolló una campaña de terreno destinada a determinar las secciones representativas de las quebradas, identificando además todas aquellas obras de arte como muros, embudos, encauzamientos y alcantarillas que podrían incidir más directamente en condicionar la capacidad hidráulica de ellas.

El catastro realizado en el año de ejecución del PM-26, se resume a en la Tabla 12.1.

Tabla 12.1 Obras de arte a ser catastradas propuestas en PM-26

Quebrada	Cantidad Obras de Arte	Longitud (m)
La Chimba	1	1.660
Club Hípico	-	1.200
Bonilla	-	1.700
Farellones	1	1.020
Salar del Carmen	-	1.470
La Cadena	-	2.930
El Anda	1	940
Riquelme	2	210
Baquedano	2	770
Uribe	1	660
El Toro	1	890
El Caliche	1	680
La Negra	4	23.450
U. de Antofagasta	-	800
Jardín del Sur	1	900
Huáscar	1	500
Roca Roja	-	1.270

Teniendo como referencia lo consignado en la tabla anterior, a continuación se detallan los catastros actualizados que a juicio de este consultor se recomienda realizar a futuro, agrupándolos dentro de 3 categorías de sistemas con tipos de obras y problemáticas propias.

a) Sistemas colectores de aguas lluvia construidos

En el caso de colectores de aguas lluvias ya construidos, interesa catastrar algunos de sus componentes ya sea con fines de establecer su estado de conservación y mantención, para definir por ejemplo, programas de limpieza periódicos, tanto de los ductos propiamente tales, como de las obras de captación o descargas, puesto que dichas condiciones determinarán su operación y será necesario asegurar que ella sea óptima en cualquier momento.

b) Sistemas de aguas lluvias con obras de control aluvional construidas

En el caso de sistemas de aguas lluvias con obras de control aluvional ya construidas en las quebradas, interesa catastrar y caracterizar, además, la situación y condiciones actuales de las descargas de las obras aluvionales, directamente a las calles y/o a las obras de captación de los colectores proyectados.

Esto es importante, toda vez que dichas condiciones son determinantes para la adecuada operación de los sistemas de evacuación y drenaje de aguas lluvias, tanto por su capacidad hidráulica como por los efectos erosivos que podría tener un flujo de alta velocidad escurriendo sobre un lecho de sedimento no pavimentado, es decir, móvil o socavable antes de ser captado por un colector.

c) Sistemas de aguas lluvias sin obras de control aluvional a la fecha

Cuando se trata de obras a ser construidas a futuro, sean colectores u obras de control aluvional, los catastros tienen la finalidad de precisar las condiciones actuales del terreno que pueden determinar parcial o totalmente su diseño, por ejemplo, debido a la presencia de obras o infraestructura existente que podrían interferir con los trazados de colectores proyectados, o bien, de las mismas obras de descarga de sistemas de control aluvional y su empalme con las captaciones de colectores.

Estas consideraciones y criterios para proponer los catastros están estrechamente relacionados con las que justifican la proposición de levantamientos topográficos que se describe en el siguiente capítulo.

12.2. SISTEMAS COLECTORES DE AGUAS LLUVIA CONSTRUIDOS

Para dichos sistemas, se propone realizar los catastros con los siguientes fines:

- Inspeccionar el estado de conservación de las obras de captación, conducción, inspección y descarga y contrastar la información con los correspondientes planos as-built.
- Verificar las condiciones de limpieza en zonas de captación y descarga de ambos colectores, como también en el colector mismo.

Los sistemas colectores de aguas lluvias existente son el Colector Salar del Carmen y el Colector La Negra, algunos de cuyos componentes se muestran en las fotos de la Figura 12.1 y Figura 12.2.

12.3. SISTEMAS DE AGUAS LLUVIAS CON OBRAS DE CONTROL ALUVIONAL CONSTRUIDAS

En términos generales, para cada obra de control aluvional se precisa catastrar la ubicación del punto de descarga de las obras al sistema colector que corresponda e inspeccionar la posible interferencia del flujo evacuado por la obra, por ejemplo, con viviendas construidas en sus cercanías, como también verificar la mantención de las obras y la limpieza de ellas.

Para este tipo de sistemas, se propone realizar los catastros con los siguientes fines:

- Inspeccionar esta descarga y analizar la situación de modo de asegurar que ella se conecte hidráulicamente de manera adecuada con la obra de captación que tendría el colector de aguas lluvias a diseñar.
- Contrastar y analizar la obra catastrada con la del proyecto de ingeniería y planos as-built.
- Verificar estado de conservación de las obras de descarga, como también estado de mantención y limpieza en obras de control aluvional de la quebrada.
- Catastrar las obras existentes que podrían interferir con el trazado del colector desde su origen hasta su descarga o con el empalme con algún colector existente, incluyendo puntos de quiebre del trazado.

Figura 12.1 Descarga del colector de la quebrada Salar del Carmen



Figura 12.2 Canalización en hormigón de la quebrada La Negra



- A modo de ejemplos de las recomendaciones de catastro para algunos de los sistemas de aguas lluvias con obras de control aluvional ya construidos, se incluyen a continuación figuras que ilustran algunos aspectos característicos de la situación actual de estos sistemas y el trazado de los colectores donde se identifican los puntos de catastro propuestos.

Para ejemplificar la situación actual de la quebrada El Ancla, en la Figura 12.3 imagen se aprecia la obra de disipación y entrada a la alcantarilla de cruce bajo la Avda. Padre Hurtado, donde lo más visible es la acumulación de basura, y en la segunda, el colector con los puntos que se propone catastrar a lo largo del trazado del colector.

Por su parte en la Figura 12.4 se observa el trazado del colector proyectado del sistema El Ancla con indicación de los puntos que se propone catastrar.

Figura 12.3 Obra disipadora y entrada a alcantarilla cruce de la Avda. Padre Hurtado. El Ancla



Figura 12.4 Puntos a catastrar en colector proyectado. Sistema El Ancla



Finalmente la Figura 12.5 muestra el caso de la quebrada Riquelme, donde se observa que el canal colector ubicado aguas abajo de la obra disipadora de energía del sistema de muros estabilizadores de pendiente, baja con alta pendiente hasta descargar oblicuamente sobre la calle Teniente Ernesto Riquelme. Por su parte en la Figura 12.6, se observa el trazado del colector con indicación de los puntos que se propone catastrar.

Figura 12.5 Canal de descarga hacia calle Teniente Ernesto Riquelme



Figura 12.6 Puntos a catastrar en colector proyectado. Sistema Riquelme



12.4. SISTEMAS DE AGUAS LLUVIAS SIN OBRAS DE CONTROL ALUVIONAL A LA FECHA

Dentro de los sistemas de drenaje y evacuación de aguas lluvias de la ciudad de Antofagasta, se encuentran también aquellos asociados a quebradas sin obras de control aluvional, entre ellos: 1) La Chimba; 2) La Roca; 3) Club Hípico; 4) Bonilla; y 5) Caliche.

Para estos sistemas se propone realizar los catastros que se señalan a continuación.

- Catastrar punto de descarga de la quebrada u obra de control aluvional que se proyecte sobre la o las calles correspondientes: calle Quebrada La Chimba, en el caso de la quebrada del mismo nombre; calles Caparrosa y Uno Oriente (Pirita), en el caso de La Roca; calles Hilda Cruz Molina y Los Chungungos, en el caso de Club Hípico; calles Guardiamarina A Fernández y Nicolás Tirado en el caso de Bonilla; y calles Radoslav Razmilic y Coronel Emilio Sotomayor y el cruce de calles Los Changos y Coronel Emilio Sotomayor, en el caso de los dos brazos de Caliche.
- Catastrar las obras existentes que podrían interferir con el trazado del colector desde su origen hasta su descarga.

A modo de ejemplo de las recomendaciones de catastro, en la Figura 12.7 se ilustra la situación de la quebrada La Roca cuyo cauce fue desviado desde su punto de descarga original en la calle Pablo Neruda hacia la calle Caparrosa, y los puntos a catastrar, mientras que en la Figura 12.8 se muestran los puntos que se propone catastrar en el sistema de la quebrada Club Hípico.

Figura 12.7 Sitios a catastrar en colector proyectado. La Roca



Figura 12.8 Sitios a catastrar en colector proyectado. Club Hípico



12.5. ANÁLISIS COMPARATIVO DE CATASTROS PROPUESTOS CON LOS DEL PM-26

De la comparación entre el catastro realizado durante el PM-26 y el catastro propuesto en el presente estudio, se deduce lo siguiente:

- En las quebradas con obras de control aluvional construidas, el trazado de los catastros propuestos son los mismos, ya que el trazado del colector no se modificó.
- En quebradas que actualmente no cuentan con obras de control aluvional, el trazado del catastro fue modificado puntualmente por cambios en el trazado del colector, por ejemplo, en los casos de la Quebrada La Chimba y la Quebrada La Roca.
- Dentro de las obras de arte incluidas en el catastro del PM-26 se identificaron cuatro alcantarillas asociadas a los sistemas colectores de El Ancla, Baquedano y Uribe que deberán inspeccionarse en el catastro propuesto.

En la Tabla 12.2 se resume el catastro propuesto para todas las quebradas estudiadas.

Tabla 12.2 Resumen de catastro propuesto en los sistemas de las quebradas de Antofagasta

Quebrada	Colector existente	Obras de descarga aluvional	Sitios a catastrar	Modificaciones en trazado	Obras de arte
La Chimba	No	No	7	Sí	0
La Roca	No	No	6	Sí	0
Club Hípico	No	No	7	No	0
Bonilla	No	No	5	No	0
Farellones	No	Sí	6	No	0

Quebrada	Colector existente	Obras de descarga aluvional	Sitios a catastrar	Modificaciones en trazado	Obras de arte
Salar del Carmen	Sí	Sí	Todo el colector	No	-
La Cadena	No	Sí	4	No	0
El Ancla	No	Sí	11	No	1
Riquelme	No	Sí	4	No	0
Baquedano	No	Sí	6	No	2
Uribe	No	Sí	3	No	1
El Toro	No	Sí	4	No	0
Caliche	No	No	3	No	0
La Negra	Sí	Sí	Todo el colector	No	-
Jardín del Sur	No	Sí	2	No	0
Huáscar	No	Sí	2	No	0
Roca Roja	No	Sí	2	No	0
Total			72		4

12.6. PROPOSICIÓN DE LEVANTAMIENTOS TOPOGRÁFICOS

En base a los catastros propuestos descritos en el acápite precedente, y también tomando como referencia el diagnóstico preliminar de la problemática de evacuación de aguas lluvias y la red primaria del PM-26 analizada, a continuación se identifican los lugares o zonas donde se propone realizar los levantamientos topográficos, con los debidos alcances en cada caso, a realizarse en consultorías posteriores a este estudio.

Complementando la información entregada en el Anexo XIII del presente informe, se incluye aparte un plano que sintetiza el diagnóstico de la problemática de evacuación de aguas lluvias en la ciudad de Antofagasta, junto la ubicación de los perfiles topográficos que se propone levantar como representativos del perfil geométrico de las calles escala 1:5.000.

12.6.1. Levantamientos locales de zonas de descarga de obras aluvionales

La proposición de levantamientos topográficos, considera solo la zona de descarga de las quebradas que ya tienen materializadas obras de control aluvional.

Estos levantamientos locales tienen como objetivo permitir posteriormente caracterizar hidráulicamente el escurrimiento que descarga de las obras hacia el plano urbano, y se justifican en tanto permiten compatibilizar estas soluciones con las obras de la red primaria de evacuación de aguas lluvias propuestas en la ciudad que recibirán estos flujos.

Cabe señalar que en esta proposición se descartaron las quebradas para las cuales existen en desarrollo proyectos de ingeniería actualmente, como lo son las quebradas Bonilla y Caliche, toda vez que para estos cauces ya se dispone o se dispondrá en el futuro cercano de topografía o estudios que caracterizan el escurrimiento que descarga hacia la ciudad.

También es importante tener presente que en cuanto a este último tipo de información, durante la realización del estudio se levantaron perfiles transversales en 5 quebradas (N1, La Roca, Schneider, S2 y S3), por lo que dichos cauces ya disponen de dicha información.

Por tal motivo, en la presente proposición de levantamientos topográficos locales, tampoco se incluyeron las quebradas Club Hípico y Universidad de Antofagasta dentro de la proposición de levantamientos topográficos.

Los levantamientos topográficos propuestos y su correspondiente superficie para las quebradas con obras de control aluvional actualmente construidos, se resumen en la Tabla 12.3.

El total de superficie a levantar es de 63.300 m².

Tabla 12.3 Levantamientos propuestos en zonas de descarga con obras de control aluvional

Quebrada	Área a levantar (m ²)
Farellones	1800
La Cadena	5000
El Ancla	4.400
Riquelme	1.700
Baquadano	14.000
Uribe	17.800
El Toro	12.200
Jardín del Sur	3.800
Huáscar	1.800
Roca Roja	800
Total	63.300

Nota: Estos levantamientos podrían ser escala 1:100 o 1:200 dependiendo de la extensión del área

12.6.2. Levantamiento de perfiles en calles

Para caracterizar el escurrimiento de las aguas lluvias en el plano urbano se propone realizar el levantamiento de perfiles transversales representativos de las calles que forman parte de las vías de evacuación de aguas lluvias.

Para estos efectos, se establecieron los criterios que se indican a continuación.

- Tomar un perfil longitudinal a lo largo de cada vía de escurrimiento superficial principal del sistema de evacuación y drenaje según el PM-26 o su actualización.
- Tomar perfiles transversales cada vía de escurrimiento superficial principal del sistema de evacuación y drenaje, bajo las siguientes consideraciones:
 - Definiendo estas secciones en todo su ancho, con un máximo de 35 m de longitud para cada perfil transversal.
 - Allí donde se interpusieran edificaciones, deslindes u otros obstáculos, el perfil transversal se limitó a la distancia entre las líneas oficiales de dichos obstáculos.

- Perfiles transversales en cada cruce de calles, considerándose como perfil transversal primario.
- Perfiles transversales en cada cambio de dirección de las vías de escurrimiento, cambio de sección o irregularidad en el trazado.
- Perfiles transversales intermedios allí donde el espaciamiento entre perfiles primarios fuera mayor a 100 m.

En el Anexo XIII se presenta el detalle del levantamiento de perfiles transversales propuesto para cada sistema de escurrimiento superficial y su justificación.

Ejemplos de las áreas que abarcan estos levantamientos en quebradas que no tienen obras de control aluvional construidos se muestran graficados en la Figura 12.9 para el sistema quebrada La Chimba y en la Figura 12.10 para el sistema Bonilla.

Figura 12.9 Perfiles topográficos propuestos. La Chimba



Figura 12.10 Perfiles topográficos propuestos. Bonilla



12.6.3. Resumen de levantamientos topográficos propuestos

En la Tabla 12.4 se presenta el resumen de los perfiles longitudinales y los perfiles transversales propuestos para las vías de escurrimiento superficial antes descritas, incluyendo también la información presentada en la Tabla 12.3.

Tabla 12.4 Resumen de cantidades y longitudes de perfiles topográficos propuestos

Quebrada	Longitud de PL (m)	Cantidad de PT	Longitud de PT (m)	Áreas de descarga de obras aluvionales (m ²)
La Chimba	1720	22	476	-
La Roca	2340	29	656	-
Club Hípico	2100	32	820	-
Bonilla	2802	35	960	-
Farellones	2520	43	935	1.800
La Cadena	2430	31	725	5.000
El Ancla	1690	47	1037	4.400
Riquelme	1240	27	607	1.700
Baquedano	1780	23	518	14.000
Uribe-Balmaceda	2250	27	610	17.800
El toro	1040	20	438	12.200
Caliche	1535	23	547	-
Jardín del Sur	550	10	240	3.800
Huáscar	340	8	201	1.800
Roca Roja	340	5	110	800
Total	24677	382	8880	63.300

13. SÍNTESIS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

13.1. 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.

13.2. 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.

13.3. 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.