

ACTUALIZACIÓN DE DISEÑO DE OBRAS DE CONTROL ALUVIONAL EN QUEBRADA BONILLA, ANTOFAGASTA

INFORME FINAL

Índice de contenidos

1.	INTRODUCCIÓN	1
1.1.	ANTECEDENTES GENERALES	1
1.2.	OBJETIVOS	2
1.3.	ALCANCE DE ESTUDIO	2
2.	ÁREA DE ESTUDIO	3
2.1.	UBICACIÓN	3
2.2.	MORFOLOGÍA DE LA CUENCA	3
2.3.	INFRAESTRUCTURA EXISTENTE	4
2.4.	POBLACIÓN Y CAMPAMENTOS	5
3.	PROYECTO DE OBRAS CONTROL ALUVIONAL EN QUEBRADA BONILLA DEL AÑO 2000	6
3.1.	DESCRIPCIÓN GENERAL DE LAS OBRAS PROYECTADAS	6
3.1.1.	Tipo de obras	6
3.1.2.	Obras del proyecto y su disposición	7
3.1.3.	Identificación de las obras	7
3.1.4.	Características geométricas generales de las obras proyectadas	8
3.1.5.	Interferencias y obras complementarias	9
4.	RECONOCIMIENTO DE TERRENO	9
4.1.1.	Brazo Norte	9
4.1.2.	Brazo Sur	11
5.	RECOPIACIÓN, REVISIÓN Y ANÁLISIS DE ANTECEDENTES	14
5.1.	ESTUDIO HIDROLÓGICO PROYECCIONES DE CAMBIO CLIMÁTICO	14
5.1.1.	Alcance	14
5.1.2.	Información pluviométrica	14
5.1.3.	Caudales de Diseño	17
5.1.4.	Revisión de antecedentes de cambio climático	18
5.2.	HIDRÁULICA ALUVIONAL	19
5.2.1.	Caracterización morfológica y mecánico fluvial	20
5.2.2.	Estimaciones de las concentraciones de sólidos	20
5.3.	MARCO GEOLÓGICO DEL ÁREA DE ESTUDIO	21
5.3.1.	Geología Local	21
5.3.2.	Geología Estructural	23

5.3.3.	Geomorfología	23
5.3.4.	Peligros Geológicos	24
5.3.5.	Reconocimiento de terreno	24
5.4.	MECÁNICA DE SUELOS	25
5.4.1.	Análisis de antecedentes disponibles	25
5.5.	USO DE SUELOS Y PLAN REGULADOR.....	27
5.5.1.	Plan Regulador Comunal de Antofagasta.....	27
5.5.2.	Plan Regulador Intercomunal Borde Costero de la Región de Antofagasta	28
5.5.3.	Plan de Emergencia de la ONEMI	28
5.5.4.	Análisis de la situación actual y futura con proyecto.....	29
5.6.	REVISIÓN Y ANÁLISIS CRÍTICO DEL PROYECTO DOH - EWI & AC (2000)	29
5.6.1.	Parámetros y resultados de diseño	30
5.6.2.	Análisis crítico del proyecto	31
6.	ESTUDIO GEOLÓGICO	33
6.1.	GEOLOGÍA LOCAL.....	34
6.1.1.	Formación La Negra	34
6.1.2.	Depósitos aluvionales y coluviales antiguos	36
6.1.3.	Depósitos eólicos inactivos	36
6.1.4.	Depósitos eólicos activos.....	36
6.1.5.	Depósitos aluvionales y coluviales modernos.....	36
6.1.6.	Depósitos antrópicos	38
6.2.	PLANOS GEOLÓGICOS.	38
6.3.	GEOLOGÍA ESTRUCTURAL Y GEOMORFOLOGÍA	38
6.4.	PELIGRO DE REMOCIONES EN MASA.....	41
6.4.1.	Flujo de detritos	41
6.4.2.	Caída de rocas	42
6.4.3.	Deslizamientos	42
7.	LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO.....	44
7.1.	ALCANCE DE LOS TRABAJOS	44
7.2.	CONFORMACIÓN DE RED DE PR'S.....	48
7.2.1.	Red de PR's.....	48
7.2.2.	PR's existentes	48
7.2.3.	Construcción de nuevos PR's.....	49
7.3.	VINCULACIÓN GEODÉSICA Y POLIGONALES.....	50
7.3.1.	Sistema de referencia y unidades.....	50
7.3.2.	Vinculación al sistema sirgas	50
7.3.3.	Poligonales	51
7.3.4.	Cuadro de coordenadas	51
7.3.5.	Nivelación geométrica de PR's	52

7.4.	LEVANTAMIENTOS.....	52
7.4.1.	Levantamiento perfiles transversales y longitudinales.....	52
7.4.2.	Levantamientos en sectores hondonadas	53
7.4.3.	Levantamiento en sector de descarga y dissipador de energía	53
7.4.4.	Georreferenciación de calicatas	54
7.5.	REPLANTEOS	54
7.5.1.	Alcance de los replanteos.....	54
7.5.2.	Actividades topográficas.....	54
8.	MECANICA DE SUELOS.....	55
8.1.	ALCANCE	55
8.2.	RESULTADOS DE ESTRATIGRAFÍAS	55
8.3.	MODELACIÓN ESTRATIGRÁFICA.....	57
8.4.	ENSAYOS GEOTÉCNICOS DE LABORATORIO.....	57
8.5.	CARACTERIZACIÓN DE SUELOS.....	59
8.5.1.	Sectorización del trazado.....	59
8.5.2.	Asociación de las obras a cada sector	60
8.5.3.	Propiedades geotécnicas de los materiales.....	61
9.	ANÁLISIS HIDROLÓGICO CON PROYECCIONES DE CAMBIO CLIMÁTICO	63
9.1.	ALCANCE	63
9.2.	ASPECTOS METODOLÓGICOS GENERALES.....	64
9.3.	EVENTOS DE MÁXIMA PRECIPITACIÓN EN EL PERÍODO HISTÓRICO Y PROYECCIONES FUTURAS A 2060	66
9.4.	ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE PRECIPITACIONES SEGÚN EXTENSIÓN ESTADÍSTICA	69
9.5.	ESTIMACIÓN DE CAUDALES MÁXIMOS INSTANTÁNEOS CON CLIMA CAMBIANTE	71
9.6.	HIDROGRAMAS	73
10.	ESTUDIO DE HIDRÁULICA ALUVIONAL.....	75
10.1.	ALCANCE	75
10.2.	DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA EMPLEADA.....	75
10.3.	INFORMACIÓN BÁSICA.....	76
10.4.	MODELACIÓN Y SIMULACIONES HIDRÁULICAS.....	76
10.5.	MECÁNICA FLUVIAL Y CÁLCULO DE CAUDALES DETRÍTICOS.....	76
10.6.	RESULTADOS HEC RAS	76
10.7.	MODELACIÓN MECÁNICO FLUVIAL	77
10.8.	CONCENTRACIONES VOLUMÉTRICAS DE SÓLIDOS ADOPTADAS.....	78
11.	DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO	79
11.1.	BRAZO NORTE	79
11.1.1.	Muro guardarradier.....	80
11.1.2.	Pretilos de encauzamiento (PDE).....	82
11.1.3.	Muros de tierra (MT) y pozas de decantación.....	83

11.1.4.	Canal unitario norte.....	83
11.2.	BRAZO SUR	85
11.2.1.	Muros estabilizadores de pendiente (MEP)	85
11.2.2.	Encauzamiento del brazo sur aguas abajo de MEP	85
11.2.3.	Muros de tierra (MT) y áreas de depositación	88
11.2.4.	Canal unitario sur.....	88
11.3.	OBRAS DE CONTROL ALUVIONAL TRAMO COMÚN DE LA QUEBRADA	89
11.3.1.	Obra de confluencia.....	90
11.3.2.	Canal unificado	92
11.3.3.	Disipador de energía.....	92
11.4.	CAMINOS DE SERVICIO	93
12.	MODELACIÓN NUMÉRICA Y DISEÑO HIDRÁULICO	94
12.1.	MODELACIÓN HEC-RAS	94
12.2.	HIDROGRAMAS DE CRECIDA	95
12.3.	SITUACIÓN SIN PROYECTO SIMULACIONES APLICANDO LOS MODELOS 2D Y 1D	96
12.3.1.	Resultados de las simulaciones.....	96
12.3.2.	Áreas de inundación y líneas de corriente	96
12.3.3.	Profundidades de los flujos.....	97
12.4.	SITUACIÓN CON PROYECTO SIMULACIONES APLICANDO LOS MODELOS 2D Y 1D	103
12.4.1.	Hidrogramas de crecida.....	103
12.4.2.	Resultados de las simulaciones.....	103
12.4.3.	Áreas de inundación y líneas de corriente (Con proyecto)	104
12.4.4.	Profundidades de los flujos.....	106
12.4.5.	Hidrogramas a la salida de las obras.....	112
12.4.6.	Brazo sur	113
12.4.7.	Canales unitarios y confluencia	114
12.4.8.	Resumen de resultados de simulaciones HEC-RAS-2D	114
12.5.	DISEÑO DE LA OBRA DISIPADORA DE ENERGÍA.....	115
12.5.1.	Características de la obra	115
12.5.2.	Consideraciones y criterios de diseño	115
12.5.3.	Cálculo del eje hidráulico	115
12.6.	CONFLUENCIA DE CANALES UNITARIOS	116
12.6.1.	Característica de la obra.....	116
12.6.2.	Consideraciones y criterios de diseño	116
12.6.3.	Diseño hidráulico	116
12.7.	CURVAS HORIZONTALES EN CANALES.....	117
12.7.1.	Identificación y características de las curvas	117
12.7.2.	Consideraciones y criterios de diseño	118
12.7.3.	Dimensionamiento de la altura de muros en las curvas	118

12.8.	GRADAS DE BAJADA EN CANALES UNITARIOS	119
12.8.1.	Identificación y características de las gradas de bajada	119
12.8.2.	Consideraciones y criterios de diseño	119
12.8.3.	Dimensionamiento de las gradas	119
12.9.	FLUJO A LA SALIDA DE LOS RÁPIDOS DE DESCARGA DE LOS MUROS DE TIERRA	120
12.9.1.	Descripción general de las obras	120
12.9.2.	Consideraciones y criterios de diseño generales	120
13.	DISEÑO ESTRUCTURAL Y GEOTÉCNICO	121
13.1.	DISEÑO GEOTÉCNICO	122
13.1.1.	Objetivos	122
13.1.2.	Alcance	122
13.1.3.	Antecedentes disponibles	122
13.1.4.	Metodología	122
13.1.5.	Análisis de la información disponible	123
13.1.6.	Caracterización de suelos	123
13.1.7.	Obras proyectadas	124
13.2.	DISEÑO ESTRUCTURAL	125
13.2.1.	Objetivos y alcance	125
13.2.2.	Obras de hormigón asociadas a los muros de tierra	125
13.2.3.	Muros estabilizadores de pendiente	126
13.2.4.	Muro guardarradier	126
13.2.5.	Canal colector unitario norte	126
13.2.6.	Canal colector unitario sur	126
13.2.7.	Canal colector unificado	126
13.2.8.	Interferencia canal unitario con matriz de agua potable	127
13.2.9.	Alcantarilla del canal colector sur	127
13.2.10.	Disipador de energía	127
13.2.11.	Confluencia	127
13.2.12.	Resumen del diseño de las obras	128
14.	EVALUACIÓN ECONÓMICA SOCIAL DEL PROYECTO	129
14.1.	EVALUACIÓN ECONÓMICA SOCIAL DEL PROYECTO	129
14.1.1.	Planteamiento general de evaluación	129
14.1.2.	Cuantificación de beneficios sociales	131
14.1.3.	Antecedentes para la cuantificación de los beneficios sociales	131
14.2.	DETERMINACIÓN DE LAS ÁREAS DE INUNDACIÓN Y SUS CARACTERÍSTICAS	133
14.3.	DETERMINACIÓN DE LOS BENEFICIOS SOCIALES	134
14.4.	RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN ECONÓMICA SOCIAL	134
14.4.1.	Beneficios totales generados por el proyecto	134
14.4.2.	Curva de frecuencia de los beneficios del proyecto y beneficio esperado anual	135

14.4.3.	Rentabilidad social del proyecto	136
15.	CONSTRUCCIÓN, OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE LAS OBRAS	137
15.1.	ETAPAS Y PROGRAMA DE CONSTRUCCIÓN	137
15.2.	RECOMENDACIONES DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO	138
16.	ANÁLISIS DE INTERFERENCIAS, CAMINOS DE SERVICIOS Y EXPROPIACIONES	141
16.1.	INTERFERENCIAS	141
16.2.	CAMINOS DE SERVICIO	142
16.3.	EXPROPIACIONES	143
17.	ACTIVIDADES DE PARTICIPACIÓN CIUDADANA	144
17.1.	TALLER DE PARTICIPACIÓN CIUDADANA Nº1	144
17.2.	TALLER DE PARTICIPACIÓN CIUDADANA Nº2	145
17.3.	TALLER DE PARTICIPACIÓN CIUDADANA Nº3	145
18.	ESTUDIO DE ANÁLISIS DE PERTINENCIA AMBIENTAL	146
19.	DOCUMENTOS PARA LICITACIÓN Y CONSTRUCCIÓN DE LAS OBRAS	146
19.1.	ESPECIFICACIONES TÉCNICAS	147
19.2.	CUBICACIONES	147
19.3.	ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS	148
19.3.1.	Metodología	148
19.3.2.	Precios unitarios y estimación de gastos generales y utilidades	149
19.4.	PRESUPUESTO DE CONSTRUCCIÓN DE LAS OBRAS	149
19.5.	PLANOS	150
19.6.	DOCUMENTOS DE LICITACIÓN	151
20.	RESUMEN, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	151
20.1.	SITUACIÓN ACTUAL DE LA QUEBRADA BONILLA	151
20.2.	ESTUDIO GEOLÓGICO	152
20.3.	CONCLUSIONES GEOTÉCNICAS	152
20.4.	ANÁLISIS HIDROLÓGICO CON PROYECCIONES DE CAMBIO CLIMÁTICO	153
20.5.	ESTUDIO HIDRÁULICO ALUVIONAL	154
20.6.	OBRAS DE CONTROL ALUVIONAL	154
20.7.	MODELACIÓN CON PROYECTO Y DISEÑOS HIDRÁULICOS	155
20.8.	CUBICACIONES Y ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS	156
20.9.	EVALUACIÓN ECONÓMICA SOCIAL DEL PROYECTO	156
20.10.	ANÁLISIS DE INTERFERENCIAS, EXPROPIACIONES Y CAMINO DE SERVICIO	156

Índice de tablas

Tabla 2.1	Áreas Aportantes por Subcuenca Quebrada Bonilla	4
Tabla 2.2	Cuencas aportantes de la quebrada Bonilla	4
Tabla 4.1	Imagen satelital de las condiciones actuales del brazo sur	13

Tabla 5.1 Estaciones meteorológicas próximas área de estudio	15
Tabla 5.2 Caudales peaks líquidos para eventos de distintos periodos de retorno	17
Tabla 5.3 Características de los hidrogramas de flujos de detritos.....	18
Tabla 5.4 Estratigrafía representativa brazo norte quebrada Bonilla	26
Tabla 5.5 Estratigrafía representativa brazo sur quebrada Bonilla	26
Tabla 7.1 Cuadro de coordenadas.....	51
Tabla 7.2 Nivelación de PR's	52
Tabla 7.3 Resumen perfiles transversales y longitudinales levantados	53
Tabla 8.1 Coordenadas UTM de las prospecciones realizadas en Quebrada Bonilla.	55
Tabla 8.2 Ensayos realizados a las distintas muestras.....	59
Tabla 8.3: Sectorización del trazado según tipo de suelo y calicatas asociadas	59
Tabla 8.4: Asociación sectorización con obras del brazo Norte.....	60
Tabla 8.5: Asociación sectorización con obras del brazo Sur y Confluencia.	61
Tabla 8.6: Valores de los coeficientes de Balasto para cada suelo.	63
Tabla 9.1: Coeficientes de duración (CD) de Bonilla Norte y Sur según percentiles	67
Tabla 9.2: Máxima precipitación diaria (Pd) en Quebrada Bonilla del periodo (1979-2020)	68
Tabla 9.3 Máxima precipitación diaria (1903-2060) quebrada Bonilla. Escenario RCP 8.5.....	69
Tabla 9.4 Máxima precipitación diaria promedio de MCG s/subperiodos de estadísticas	69
Tabla 9.5: Intensidad media de precipitación en 3 horas promedio entre MCG	70
Tabla 9.6 Parámetros morfométricos de las cuencas Norte y Sur.....	71
Tabla 9.7 Caudal líquido máximo instantáneo de crecida (QMI) en Quebrada Bonilla Norte	72
Tabla 9.8 Caudal líquido máximo instantáneo de crecida (QMI) en Quebrada Bonilla Sur	72
Tabla 9.9 Caudales líquidos máximos instantáneos adoptados para Bonilla Norte y Sur	73
Tabla 9.10 Características de los hidrogramas líquidos de la quebrada Bonilla.....	74
Tabla 10.1 Concentraciones volumétricas de sólidos de flujos aluvionales en quebrada Bonilla	79
Tabla 11.1 Dimensiones de los pretiles de encauzamiento (PDE)	82
Tabla 11.2 Dimensiones muro de tierra (MT) y obras anexas	83
Tabla 11.3 Dimensiones muros estabilizadores de pendiente (MEP).....	85
Tabla 11.4 Dimensiones de los muros de tierra (MT) y obras anexas del brazo sur	88
Tabla 12.1 Eje hidráulico máximo en canal colector norte.....	110
Tabla 12.2 Eje hidráulico máximo en canal colector sur.....	110
Tabla 12.3 Eje hidráulico máximo en canal unificado	111
Tabla 12.4 Resumen de volúmenes acumulados para crecida de T=100 años en el brazo norte.....	113
Tabla 12.5 Resumen de volúmenes acumulados para crecida de T=100 años en el brazo sur	114
Tabla 12.6 Resumen de resultados en brazos norte y sur hasta canales colectores	115
Tabla 12.7 Identificación de las curvas	117
Tabla 12.8 Peraltes y revanchas en curvas del canal unitario norte y canal unificado	118
Tabla 12.9 Peraltes y revanchas en curvas del canal unitario sur	119
Tabla 12.10 Dimensionamiento de gradas en canales unitarios norte y sur.....	120

Tabla 12.11 Características geométricas de los rápidos de descarga.....	120
Tabla 12.12 Características del flujo en salida de rápidos.....	121
Tabla 13.1 Asociación sectorización con obras del brazo Norte.....	123
Tabla 13.2 Asociación sectorización con obras del brazo Sur y Confluencia.....	124
Tabla 13.3 Resumen de los factores de utilización diseño al corte y flexión de las obras.....	128
Tabla 14.1 Áreas de inundación (ha).....	134
Tabla 14.2 Beneficios (UF) del proyecto de obras aluvionales de la quebrada Bonilla.....	135
Tabla 14.3 Curva de frecuencia del beneficio generado por el proyecto.....	135
Tabla 15.1: Carta Gantt.....	139
Tabla 19.1 Presupuesto total de construcción obras de control aluvional quebrada Bonilla.....	150
Tabla 19.2 Anexo XVII-C: Bases Administrativas.....	151

Índice de figuras

Figura 3.1 Disposición obras de control aluvional proyectadas.....	7
Figura 4.1 Características y sedimentos del cauce del brazo norte.....	10
Figura 4.2 Imagen satelital de las condiciones actuales del cono de deyección del brazo norte.....	11
Figura 4.3 Vistas del brazo norte de la quebrada Bonilla.....	12
Figura 5.1 Estaciones meteorológicas cercanas al área de estudio.....	15
Figura 5.2 Variación temporal precipitaciones máximas anuales en 24 hr.....	16
Figura 5.3 Leyenda Mapa Geología Local (Carta Geológica Antofagasta – Punta Tetos).....	22
Figura 5.4 Quebrada Bonilla y ubicación de las calicatas precedentes.....	25
Figura 5.5 Plan regulador de Antofagasta.....	27
Figura 5.6 Área de riesgo de flujo de lodo en quebrada Bonilla.....	29
Figura 6.1 Afloramientos Formación La Negra – Quebrada Bonilla Norte.....	35
Figura 6.2 Afloramientos Formación La Negra – Quebrada Bonilla Sur.....	35
Figura 6.3 Duna a los pies de Formación La Negra – Quebrada Bonilla Norte.....	37
Figura 6.4 Corte en cono de depósitos aluviales – Quebrada Bonilla Norte.....	37
Figura 6.5 Geología Local – Bonilla Norte.....	39
Figura 6.6 Geología Local – Bonilla Sur.....	40
Figura 6.7 Mapeo de zonas de peligro geológico - Bonilla Norte.....	43
Figura 6.8 Mapeo de zonas de peligro geológico - Bonilla Sur.....	43
Figura 7.1 Zona de levantamiento topográfico del brazo norte de la quebrada Bonilla.....	46
Figura 7.2 Zona de levantamiento topográfico del brazo sur de la quebrada Bonilla.....	47
Figura 7.3 Red de PR's quebrada Bonilla.....	48
Figura 7.4 Fotografía de monolito de PRs existentes encontrados.....	49
Figura 7.5 Fotografía de monolitos construidos.....	50
Figura 8.1 Plano de ubicación de las calicatas excavadas.....	57
Figura 8.2 Representación estratigráfica de las calicatas del brazo norte.....	58

Figura 8.3 Representación estratigráfica de las calicatas de la confluencia del brazo sur	58
Figura 8.4 Sectorización del trazado según tipo de suelo.....	60
Figura 9.1 Esquema metodológico	65
Figura 9.2 Hidrogramas líquidos de crecidas de T=50, 100 y 200 años en brazo norte	74
Figura 9.3 Hidrogramas líquidos de crecidas de T=50, 100 y 200 años en brazo sur	75
Figura 11.1 Obras de control aluvional proyectadas en la quebrada Bonilla	80
Figura 11.2 Disposición general de las obras de control aluvional del brazo norte de la quebrada Bonilla.....	81
Figura 11.3 Muro guardarradier	82
Figura 11.4 Planta del MT típico del brazo norte con corte del rápido de descarga	84
Figura 11.5 Sección canal unitario norte.....	84
Figura 11.6 Disposición general de las obras de control aluvional del brazo sur de la quebrada Bonilla.....	86
Figura 11.7 Planta y disposición general de muros estabilizadores de pendiente (MEP).....	87
Figura 11.8 Corte transversal y longitudinal de los muros estabilizadores de pendiente (MEP).....	87
Figura 11.9 Planta del MT típico del brazo sur con corte del rápido de descarga	89
Figura 11.10 Sección transversal del canal unitario sur.....	90
Figura 11.11 Disposición general de las obras del tramo común de la quebrada.....	90
Figura 11.12 Vista en planta y perfil longitudinal de la Confluencia	91
Figura 11.13 Sección transversal de la confluencia.....	91
Figura 11.14 Sección transversal del canal unificado	92
Figura 11.15 Planta y perfil longitudinal del dissipador de energía.....	93
Figura 11.16 Sección tipo del camino de servicio norte.....	94
Figura 12.1 Hidrogramas de crecida detrítico, quebrada Bonilla	96
Figura 12.2 Área de inundación en brazo norte para escenario sin proyecto.....	98
Figura 12.3 Área inundación en brazo sur para escenario sin proyecto	99
Figura 12.4 Área inundación en confluencia para escenario sin proyecto.....	100
Figura 12.5 Profundidades en brazo norte para escenario sin proyecto.....	101
Figura 12.6 Profundidades en brazo sur para escenario sin proyecto	102
Figura 12.7 Profundidades en confluencia para escenario sin proyecto.....	103
Figura 12.8 Área de inundación y líneas de corriente del brazo norte de la quebrada Bonilla	105
Figura 12.9 Área de inundación y líneas de corriente del brazo sur de la quebrada Bonilla	107
Figura 12.10 Área de inundación y líneas de corriente del canal unificado y plano urbano	108
Figura 12.11 Profundidades del flujo en el brazo norte de la quebrada Bonilla	108
Figura 12.12 Profundidades del flujo en el brazo sur de la quebrada Bonilla	109
Figura 12.13 Profundidades del flujo en el plano urbano.....	111
Figura 12.14 Hidrogramas de la crecida de T= 100 años del brazo norte	112
Figura 12.15 Hidrogramas de la crecida de T= 100 años del brazo sur	113
Figura 12.16 Hidrogramas de T=100 años en los canales colectores y en descarga.....	114
Figura 12.17 Eje hidráulico en canal unificado y ODE	116
Figura 12.18 Eje hidráulico en confluencia	117

Figura 14.1 Curva de frecuencia de beneficios del proyecto de obras aluvionales Bonilla.....	136
Figura 14.2 Curva de beneficios de obras aluvionales función del periodo de retorno.....	136
Figura 16.1 Red de agua potable de Antofagasta en sectores próximos a la quebrada Bonilla.....	141
Figura 16.2 Vista isométrica de la solución planteada para cruce con matrices de agua potable.....	142
Figura 16.3 Propiedad fiscal administrada por Bienes Nacionales.....	143
Figura 16.4 Layout de las obras propuestas y propiedad fiscal.....	144

X

ANEXOS

- Anexo I. Revisión y análisis crítico del proyecto EWI – AC Ingenieros Consultores.
- Anexo II. Reconocimiento de terreno.
- Anexo III. Geología.
- Anexo IV. Mecánica de Suelos y Geotecnia.
- Anexo V. Trabajos topográficos.
- Anexo VI: Análisis hidrológico con componente de cambio climático.
- Anexo VII. Estudio de hidráulica aluvional.
- Anexo VIII. Uso de suelos con fines urbanos y plan de emergencia.
- Anexo IX. Situación actual y análisis y proposición de alternativas.
- Anexo X. Descripción del proyecto y diseño hidráulico.
- Anexo XI. Diseño estructural.
- Anexo XII. Estudio de interferencias y análisis de expropiaciones y servidumbres.
- Anexo XIII. Cubicaciones, análisis de precios unitarios y presupuesto de construcción de las obras.
- Anexo XIV. Evaluación económica.
- Anexo XV. Etapas y programa de construcción.
- Anexo XVI. Recomendaciones de operación y mantenimiento.
- Anexo XVII. Documentos de licitación.
- Anexo XVII-A: Especificaciones Técnicas Generales
- Anexo XVII-B: Especificaciones Técnicas Especiales
- Anexo XVII-C: Bases Administrativas
 - Anexo XVII-C-1 Listado de Obras

- Anexo XVII-C-2 Listado de Planos
- Anexo XVII-C-3 Presupuesto Oficial
- Anexo XVII-C-4 Programa de Construcción
- Anexo XVII-C-5 Programa de Inversiones
- Anexo XVII-C-6 Modelo de Letreros
- Anexo XVII-C-7 Instructivo sobre Seguridad e Higiene Industrial
- Anexo XVII-C-8 Modelo de Análisis Precios Unitarios
- Anexo XVII-C-9 Listado de Maquinarias y Equipos
- Anexo XVII-C-10 Modelo de Listado Contratos en Ejecución
- Anexo XVII-C-11 Modelo de Pólizas De Seguros
- Anexo XVII-C-12 Declaración de Impacto Ambiental y Resolución de Calificación Ambiental
- Anexo XVII-C-13 Especificaciones Ambientales Generales
- Anexo XVII-C-14 Estándares Sociales y Ambientales PNUD
- Anexo XVII-C-15 Bases Especiales de Participación Ciudadana
- Anexo XVII-C-16 Bases de Medición y Pago

PLANOS

N° de plano	Código	Título
1	PNUD BON-EF-GE-EB-TP-PG-01	Planta General Pr's y Calicatas
2	PNUD BON-EF-GE-EB-MS-PG-01	Ubicación De Calicatas Planta General
3	PNUD BON-EF-BN-EB-TP-PG-01	Levantamiento Topográfico Brazo Norte Planta General 1 De 2
4	PNUD BON-EF-BN-EB-TP-PG-02	Levantamiento Topográfico Brazo Norte Planta General 2 De 2
5	PNUD BON-EF-BN-EB-TP-PL-03	Levantamiento Topográfico Brazo Norte Perfil Longitudinal
6	PNUD BON-EF-BN-EB-TP-PT-04	Levantamiento Topográfico Brazo Norte Perfiles Trasversales Pt-S1 Al Pt-S6
7	PNUD BON-EF-BN-EB-TP-PT-05	Levantamiento Topográfico Brazo Norte Perfiles Trasversales Pt-S7 Al Pt-S14
8	PNUD BON-EF-BN-EB-TP-PT-06	Levantamiento Topográfico Brazo Norte Perfiles Trasversales Pt-S15 Al Pt-S22
9	PNUD BON-EF-BN-EB-TP-PT-07	Levantamiento Topográfico Brazo Norte Perfiles Trasversales Pt-S23 Al Pt-S26
10	PNUD BON-EF-BN-EB-TP-PT-08	Levantamiento Topográfico Brazo Norte Perfiles Trasversales Pt-S27 Al Pt-S30
11	PNUD BON-EF-BN-EB-TP-PT-09	Levantamiento Topográfico Brazo Norte Perfiles Trasversales Pt-S31 Al Pt-S34
12	PNUD BON-EF-BN-EB-TP-PT-010	Levantamiento Topográfico Brazo Norte Perfiles Trasversales Pt-S35 Al Pt-S38
13	PNUD BON-EF-BN-EB-TP-PT-11	Levantamiento Topográfico Brazo Norte Perfiles Trasversales Pt-S39 Al Pt-S42

14	PNUD BON-EF-BN-EB-TP-PT-12	Levantamiento Topográfico Brazo Norte Perfiles Trasversales Pt-S43 Al Pt-S46
15	PNUD BON-EF-BN-EB-TP-PT-13	Levantamiento Topográfico Brazo Norte Perfiles Trasversales Pt-S47 Al Pt-S49
16	PNUD BON-EF-BS-EB-TP-PG-01	Levantamiento Topográfico Brazo Sur Planta General 1 De 2
17	PNUD BON-EF-BS-EB-TP-PG-02	Levantamiento Topográfico Brazo Sur Planta General 2 De 2
18	PNUD BON-EF-BS-EB-TP-PL-03	Levantamiento Topográfico Brazo Sur Perfil Longitudinal 1 De 2
19	PNUD BON-EF-BS-EB-TP-PL-04	Levantamiento Topográfico Brazo Sur Perfil Longitudinal 2 De 2
20	PNUD BON-EF-BS-EB-TP-PT-05	Levantamiento Topográfico Brazo Sur Perfiles Trasversales Pt-S1 Al Pt-S4
21	PNUD BON-EF-BS-EB-TP-PT-06	Levantamiento Topográfico Brazo Sur Perfiles Trasversales Pt-S5 Al Pt-S7
22	PNUD BON-EF-BS-EB-TP-PT-07	Levantamiento Topográfico Brazo Sur Perfiles Trasversales Pt-S8 Al Pt-S10
23	PNUD BON-EF-BS-EB-TP-PT-08	Levantamiento Topográfico Brazo Sur Perfiles Trasversales Pt-S11 Al Pt-S13
24	PNUD BON-EF-BS-EB-TP-PT-09	Levantamiento Topográfico Brazo Sur Perfiles Trasversales Pt-S14 Al Pt-S16
25	PNUD BON-EF-BS-EB-TP-PT-10	Levantamiento Topográfico Brazo Sur Perfiles Trasversales Pt-S17 Al Pt-S19
26	PNUD BON-EF-BS-EB-TP-PT-11	Levantamiento Topográfico Brazo Sur Perfiles Trasversales Pt-S20 Al Pt-S22
27	PNUD BON-EF-BS-EB-TP-PT-12	Levantamiento Topográfico Brazo Sur Perfiles Trasversales Pt-S23 Al Pt-S25
28	PNUD BON-EF-BS-EB-TP-PT-13	Levantamiento Topográfico Brazo Sur Perfiles Trasversales Pt-S26 Al Pt-S28
29	PNUD BON-EF-BS-EB-TP-PT-14	Levantamiento Topográfico Brazo Sur Perfiles Trasversales Pt-S29 Al Pt-S33
30	PNUD BON-EF-BS-EB-TP-PT-15	Levantamiento Topográfico Brazo Sur Perfiles Trasversales Pt-S34 Al Pt-S41
31	PNUD BON-EF-BS-EB-TP-PT-16	Levantamiento Topográfico Brazo Sur Perfiles Trasversales Pt-S42 Al Pt-S45
32	PNUD BON-EF-BS-EB-TP-PT-17	Levantamiento Topográfico Brazo Sur Perfiles Trasversales Pt-S46 Al Pt-S49
33	PNUD BON-EF-BS-EB-TP-PT-18	Levantamiento Topográfico Brazo Sur Perfiles Trasversales Pt-S50 Al Pt-S54
34	PNUD BON-EF-BS-EB-TP-PT-19	Levantamiento Topográfico Brazo Sur Perfiles Trasversales Pt-S55 Al Pt-S63
35	PNUD BON-EF-GE-PL-01	Planta General
36	PNUD BON-EF-GE-PL-02	Planta General Replanteo Topográfico
37	PNUD BON-EF-GE-PL-03	Perfil Longitudinal Obras Proyectadas
38	PNUD BON-EF-GE-CA-HI-DT-01	Secciones Tipo Canal Norte - Sur y Unificado
39	PNUD BON-EF-BN-CA-HI-PL-01	Planta y Perfil Longitudinal Canal Colector Unitario Norte Dm 0 Al 510.9
40	PNUD BON-EF-BN-CA-HI-PL-02	Planta y Perfil Longitudinal Canal Colector Unitario Norte 510.9 Al 1010.1
41	PNUD BON-EF-BN-CA-HI-PT-03	Perfiles Transversales Canal Colector Unitario Norte Dm 119.3 Al Dm 233.2
42	PNUD BON-EF-BN-CA-HI-PT-04	Perfiles Transversales Canal Colector Unitario Norte Dm 261.1 Al Dm 332.0
43	PNUD BON-EF-BN-CA-HI-PT-05	Perfiles Transversales Canal Colector Unitario Norte Dm 359.6 Al 434.2
44	PNUD BON-EF-BN-CA-HI-PT-06	Perfiles Transversales Canal Colector Unitario Norte Dm 454.8 Al Dm 518.8
45	PNUD BON-EF-BN-CA-HI-PT-07	Perfiles Transversales Canal Colector Unitario Norte Dm 542.5 Al Dm 614.0
46	PNUD BON-EF-BN-CA-HI-PT-08	Perfiles Transversales Canal Colector Unitario Norte Dm 637.6 Al Dm 704.2
47	PNUD BON-EF-BN-CA-HI-PT-09	Perfiles Transversales Canal Colector Unitario Norte Dm 725.5 Al Dm 789.3
48	PNUD BON-EF-BN-CA-HI-PT-10	Perfiles Transversales Canal Colector Unitario Norte Dm 809.9 Al Dm 853.1
49	PNUD BON-EF-BN-CA-HI-PT-11	Perfiles Transversales Canal Colector Unitario Sur Dm 897.2 Al Dm 995.2
50	PNUD BON-EF-BN-CA-HI-DT-12	Canal Unitario Norte - Gradadas
51	PNUD BON-EF-BS-CA-HI-PL-01	Planta y Perfil Longitudinal Canal Colector Unitario Sur Dm 0 Al Dm 452.0
52	PNUD BON-EF-BS-CA-HI-PT-02	Perfiles Transversales Canal Colector Unitario Sur Dm 0 Al 52.6
53	PNUD BON-EF-BS-CA-HI-PT-03	Perfiles Transversales Canal Colector Unitario Sur Dm 81.3 Al Dm 124.5

54	PNUD BON-EF-BS-CA-HI-PT-04	Perfiles Transversales Canal Colector Unitario Sur Dm 142.6 Al Dm 208.5
55	PNUD BON-EF-BS-CA-HI-PT-05	Perfiles Transversales Canal Colector Unitario Sur Dm 230.5 Al Dm 328.9
56	PNUD BON-EF-BS-CA-HI-PT-06	Perfiles Transversales Canal Colector Unitario Sur Dm 352.5 Al Dm 427.3
57	PNUD BON-EF-BS-CA-HI-DT-07	Canal Unitario Sur - Gradadas
58	PNUD BON-EF-BN-MH-HI-DT-01	Muro Guardarradier Brazo Norte
59	PNUD BON-EF-BN-ME-HI-DT-01	Muros de Encauzamiento
60	PNUD BON-EF-BN-MT-HI-DT-01	Muros de Tierra N1
61	PNUD BON-EF-BN-MT-HI-DT-02	Muros de Tierra N2
62	PNUD BON-EF-BN-MT-HI-DT-03	Muros de Tierra N3
63	PNUD BON-EF-BN-MT-HI-DT-04	Muros de Tierra N4
64	PNUD BON-EF-BN-MT-HI-DT-05	Muros de Tierra N5
65	PNUD BON-EF-BS-MH-HI-PL-01	Muros Estabilizadores de Pendiente Brazo Sur
66	PNUD BON-EF-BS-MH-HI-DT-02	Muros Estabilizadores de Pendiente Brazo Sur - MEP1
67	PNUD BON-EF-BS-MH-HI-DT-03	Muros Estabilizadores de Pendiente Brazo Sur - MEP2
68	PNUD BON-EF-BS-MH-HI-DT-04	Muros Estabilizadores de Pendiente Brazo Sur - MEP3
69	PNUD BON-EF-BS-MH-HI-DT-05	Muros Estabilizadores de Pendiente Brazo Sur - MEP4
70	PNUD BON-EF-BS-MH-HI-DT-06	Muros Estabilizadores de Pendiente Brazo Sur - MEP5
71	PNUD BON-EF-BS-MT-HI-DT-01	Muros de Tierra S1
72	PNUD BON-EF-BS-MT-HI-DT-02	Muros de Tierra S2
73	PNUD BON-EF-BS-MT-HI-DT-03	Muros de Tierra S3
74	PNUD BON-EF-BS-CN-HI-PL-01	Canal de Encauzamiento Sur
75	PNUD BON-EF-BS-OH-HI-DT-01	Alcantarilla Proyectada Canal Unitario Sur
76	PNUD BON-EF-GE-OH-HI-DT-01	Solución Típica Interferencia Matrices De Agua Potable
77	PNUD BON-EF-GE-OH-HI-DT-02	Confluencia Canales Norte - Sur y Unificado
78	PNUD BON-EF-GE-OH-HI-DT-03	Obra Disipadora de Energía
79	PNUD BON-EF-BN-CM-CI-PL-01	Planta y Perfil Longitudinal Camino De Servicio Norte Dm 0 Al Dm 500
80	PNUD BON-EF-BN-CM-CI-PL-02	Planta y Perfil Longitudinal Camino De Servicio Norte Dm 400 Al Dm 900
81	PNUD BON-EF-BN-CM-CI-PL-03	Planta y Perfil Longitudinal Camino De Servicio Norte Dm 800 Al Dm 1300
82	PNUD BON-EF-BN-CM-CI-PL-04	Planta y Perfil Longitudinal Camino De Servicio Norte Dm 1200 Al Dm 1591
83	PNUD BON-EF-BN-CM-CI-PT-05	Perfiles Transversales Camino De Servicio Norte Dm 0 Al Dm 250
84	PNUD BON-EF-BN-CM-CI-PT-06	Perfiles Transversales Camino De Servicio Norte Dm 300 Al Dm 550
85	PNUD BON-EF-BN-CM-CI-PT-07	Perfiles Transversales Camino De Servicio Norte Dm 600 Al Dm 850
86	PNUD BON-EF-BN-CM-CI-PT-08	Perfiles Transversales Camino De Servicio Norte Dm 900 Al Dm 1150
87	PNUD BON-EF-BN-CM-CI-PT-09	Perfiles Transversales Camino De Servicio Norte Dm 1200 Al Dm 1450
88	PNUD BON-EF-BN-CM-CI-PT-10	Perfiles Transversales Camino De Servicio Norte Dm 1500 Al Dm 1591
89	PNUD BON-EF-BS-CM-CI-PL-01	Planta y Perfil Longitudinal Camino De Servicio Sur Dm 0 Al Dm 500
90	PNUD BON-EF-BS-CM-CI-PL-02	Planta y Perfil Longitudinal Camino De Servicio Sur Dm 400 Al Dm Dm 900
91	PNUD BON-EF-BS-CM-CI-PL-03	Planta y Perfil Longitudinal Camino De Servicio Sur Dm 800 Al 1300
92	PNUD BON-EF-BS-CM-CI-PL-04	Planta y Perfil Longitudinal Camino De Servicio Sur Dm 1200 Al 1634
93	PNUD BON-EF-BS-CM-CI-PT-05	Perfiles Transversales Camino De Servicio Sur Dm 0 Al Dm 250

94	PNUD BON-EF-BS-CM-CI-PT-06	Perfiles Transversales Camino De Servicio Sur Dm 300 Al Dm 550
95	PNUD BON-EF-BS-CM-CI-PT-07	Perfiles Transversales Camino De Servicio Sur Dm 600 Al Dm 850
96	PNUD BON-EF-BS-CM-CI-PT-08	Perfiles Transversales Camino De Servicio Sur Dm 900 Al Dm 1150
97	PNUD BON-EF-BS-CM-CI-PT-09	Perfiles Transversales Camino De Servicio Sur Dm 1200 Al Dm 1450
98	PNUD BON-EF-BS-CM-CI-PT-10	Perfiles Transversales Camino De Servicio Sur Dm 1500 Al Dm 1634
99	PNUD BON-EF-BN-MT-ES-DT-01	Muro de Tierra N1 Formas y Dimensiones
100	PNUD BON-EF-BN-MT-ES-DT-02	Muro de Tierra N2 Formas y Dimensiones
101	PNUD BON-EF-BN-MT-ES-DT-03	Muro de Tierra N3 Formas y Dimensiones
102	PNUD BON-EF-BN-MT-ES-DT-04	Muro de Tierra N4 Formas y Dimensiones
103	PNUD BON-EF-BN-MT-ES-DT-05	Muro de Tierra N5 Formas y Dimensiones
104	PNUD BON-EF-BN-MT-ES-DT-06	Muro de Tierra N1 Armaduras
105	PNUD BON-EF-BN-MT-ES-DT-07	Muro de Tierra N2 Armaduras
106	PNUD BON-EF-BN-MT-ES-DT-08	Muro de Tierra N3 Armaduras
107	PNUD BON-EF-BN-MT-ES-DT-09	Muro de Tierra N4 Armaduras
108	PNUD BON-EF-BN-MT-ES-DT-10	Muro de Tierra N5 Armaduras
109	PNUD BON-EF-BN-MH-ES-DT-01	Guardarradier Formas y Dimensiones
110	PNUD BON-EF-BN-MH-ES-DT-02	Guardarradier Armaduras
111	PNUD BON-EF-BS-MT-ES-DT-01	Muro de Tierra S1 Formas y Dimensiones
112	PNUD BON-EF-BS-MT-ES-DT-02	Muro de Tierra S2 Formas y Dimensiones
113	PNUD BON-EF-BS-MT-ES-DT-03	Muro de Tierra S3 Formas y Dimensiones
114	PNUD BON-EF-BS-MT-ES-DT-04	Muro de Tierra S1 Armaduras
115	PNUD BON-EF-BS-MT-ES-DT-05	Muro de Tierra S2 Armaduras
116	PNUD BON-EF-BS-MT-ES-DT-06	Muro de Tierra S3 Armaduras
117	PNUD BON-EF-BS-MH-ES-DT-01	Muro Estabilizadores de Pendiente Brazo Sur, MEP 1 Brazo Sur - Formas y Dimensiones
118	PNUD BON-EF-BS-MH-ES-DT-02	Muro Estabilizadores de Pendiente Brazo Sur, MEP 2 Brazo Sur - Formas y Dimensiones
119	PNUD BON-EF-BS-MH-ES-DT-03	Muro Estabilizadores de Pendiente Brazo Sur, MEP 3 Brazo Sur - Formas y Dimensiones
120	PNUD BON-EF-BS-MH-ES-DT-04	Muro Estabilizadores de Pendiente Brazo Sur, MEP 4 Brazo Sur - Formas y Dimensiones
121	PNUD BON-EF-BS-MH-ES-DT-05	Muro Estabilizadores de Pendiente Brazo Sur, MEP 5 Brazo Sur - Formas y Dimensiones
122	PNUD BON-EF-BS-MH-ES-DT-06	Muro Estabilizadores de Pendiente Brazo Sur, MEP 1 Brazo Sur - Armaduras
123	PNUD BON-EF-BS-MH-ES-DT-07	Muro Estabilizadores de Pendiente Brazo Sur, MEP 2 Brazo Sur - Armaduras
124	PNUD BON-EF-BS-MH-ES-DT-08	Muro Estabilizadores de Pendiente Brazo Sur, MEP 3 Brazo Sur - Armaduras
125	PNUD BON-EF-BS-MH-ES-DT-09	Muro Estabilizadores de Pendiente Brazo Sur, MEP 4 Brazo Sur - Armaduras
126	PNUD BON-EF-BS-MH-ES-DT-10	Muro Estabilizadores de Pendiente Brazo Sur, MEP 5 Brazo Sur - Armaduras
127	PNUD BON-EF-BN-CA-ES-DT-01	Canal Unitario Norte Formas y Dimensiones
128	PNUD BON-EF-BN-CA-ES-DT-02	Canal Unitario Norte Armaduras
129	PNUD BON-EF-BN-CA-ES-DT-03	Canal Unitario Norte - Gradas Formas y Dimensiones
130	PNUD BON-EF-BN-CA-ES-DT-04	Canal Unitario Norte - Gradas Armaduras

131	PNUD BON-EF-BS-CA-ES-DT-01	Canal Unitario Sur Formas y Dimensiones
132	PNUD BON-EF-BS-CA-ES-DT-02	Canal Unitario Sur Armaduras
133	PNUD BON-EF-BS-CA-ES-DT-03	Gradas Canal Sur Formas y Dimensiones
134	PNUD BON-EF-BS-CA-ES-DT-04	Gradas Canal Sur Armaduras
135	PNUD BON-EF-BS-OH-ES-DT-01	Obra Alcantarilla Formas y Dimensiones
136	PNUD BON-EF-BS-OH-ES-DT-02	Obra Alcantarilla Armaduras
137	PNUD BON-EF-GE-OH-ES-DT-01	Obra Confluencia y Canal Unificado Formas y Dimensiones
138	PNUD BON-EF-GE-OH-ES-DT-02	Obra Confluencia y Canal Unificado Armaduras
139	PNUD BON-EF-GE-OH-ES-DT-03	Disipador de Energía Formas Y Dimensiones
140	PNUD BON-EF-GE-OH-ES-DT-04	Disipador de Energía Armaduras

ACTUALIZACIÓN DE DISEÑO DE OBRAS DE CONTROL ALUVIONAL EN QUEBRADA BONILLA, ANTOFAGASTA INFORME FINAL

1. INTRODUCCIÓN

1.1. ANTECEDENTES GENERALES

Los efectos adversos del cambio climático se traducirán en eventos climáticos más extremos y frecuentes lo que intensificará los riesgos hidrometeorológicos y desastres naturales como inundaciones, flujos aluvionales y deslizamientos de tierra, afectando la vida de seres humanos y su entorno, con importantes pérdidas de infraestructura, económicas y en general, incertidumbre y pérdida de bienestar para los asentamientos humanos afectados.

El presente proyecto se inserta dentro del marco del “Plan de Adaptación y Mitigación 2017-2022 de los Servicios de Infraestructura al Cambio Climático” cuyo objetivo general es la incorporación de la problemática de cambio climático en los servicios de infraestructura que provee el Ministerio de Obras Públicas, a fin de adaptarse a los cambios hidrometeorológicos futuros en un marco de resiliencia y sustentabilidad, además de contribuir a mitigar la generación de gases de efecto invernadero en las distintas fases del ciclo de vida de los proyectos.

Teniendo en consideración que las medidas de adaptación al cambio climático son cruciales para reducir el riesgo de pérdidas humanas y materiales en zonas costeras, el presente proyecto aborda la actualización del estudio “Diseño Definitivo de los Sistemas de Disipación de Energía Aluvional y Vías Aluvionales en la Ciudad de Antofagasta. EWI-AC Ingenieros Consultores. 2000”, única y exclusivamente en lo que respecta a la Quebrada Bonilla.

En el estudio anteriormente señalado se proyectaron una serie de obras de control aluvional en los brazos norte y sur de la quebrada Bonilla, siendo estas obras del tipo barreras estabilizadoras de pendiente y pozas de acumulación para un periodo de retorno de 50 años.

Dado que han transcurrido más de 20 años desde que se aprobó este proyecto y las condiciones del área de estudio difieren de la situación original, ha sido necesario desarrollar la actualización de los diseños de las obras de control o mitigación aluvional para la Quebrada Bonilla, incluyendo además las consideraciones y proyecciones climáticas a futuro con la variable de cambio climático, en el escenario más desfavorable (escenario de emisiones RCP 8.5). Cabe señalar, que el proyecto original no incorporó dentro de sus criterios de diseño esta variable.

El presente documento corresponde al Informe Final del estudio, y da cuenta de la totalidad de los resultados, consideraciones, diseños y hallazgos durante el desarrollo del mismo.

1.2. OBJETIVOS

El objetivo general del estudio es actualizar el proyecto del año 2000 de las obras de control aluvional de la quebrada Bonilla, ya mencionado, incorporando las condiciones presentes topográficas y de los suelos de la quebrada, y criterios y variables de diseño hidráulicos, geotécnicos y estructurales que tomen en consideración de escenarios climáticos futuros.

En relación al cambio climático, se persigue desarrollar un enfoque metodológico que permita estimar una proyección hasta el año 2060 de las variables hidrometeorológicas que determinan las variables de diseño de las obras, considerando el escenario desfavorable RCP8.5 de modo de lograr que la infraestructura de control aluvional sea más resiliente al cambio climático.

Como objetivos específicos del estudio se tienen los siguientes:

- Revisar y analizar críticamente el Proyecto EWI-AC Ingenieros Consultores (2000).
- Recopilar y analizar críticamente los antecedentes atinentes al desarrollo del estudio.
- Proponer alternativas de adecuación u optimización del Proyecto EWI-AC Ingenieros Consultores (2000).
- Desarrollo de los estudios básicos de Hidrología con componente de Cambio Climático, Hidráulica Fluvial (Aluvional), Geología y Mecánica de Suelos.
- Cálculo y dimensionamiento hidráulico de las obras de control Aluvional.
- Evaluación Social del Proyecto.
- Recopilar información y análisis de interferencias con servicios e infraestructura existente.
- Elaboración de Documentos de Licitación para la Construcción.
- Desarrollo de actividades de Participación Ciudadana.
- Análisis de pertinencia ambiental del proyecto.

1.3. ALCANCE DE ESTUDIO

Considerando los objetivos señalados precedentemente, el estudio tiene como alcance general la actualización del diseño definitivo de las obras de protección aluvional de la quebrada Bonilla, en la ciudad de Antofagasta, agregando a éste, el análisis de la exposición, la sensibilidad y la vulnerabilidad de las obras, de modo de adaptarlas al cambio climático.

Un alcance complementario del estudio es que la actualización del diseño de las obras de control aluvional sirva también de base para establecer metodologías que puedan ser replicadas en contextos climáticos similares, para lo cual las proyecciones climáticas de la ciudad incorporan aspectos recomendados específicamente para adaptarse al cambio climático, en particular, aquellas emanadas en las siguientes

publicaciones: “Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático, Ministerio de Medio Ambiente – 2014”, “Política de Sustentabilidad Ambiental del Ministerio de Obras Públicas, diciembre 2016”, “Plan de Adaptación y Mitigación de los Servicios de Infraestructura al Cambio Climático 2017– 2022, de Ministerio de Obras Públicas 2017”, “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” y “Diagnóstico de la Vulnerabilidad de las obras del MOP y medidas de adaptación al cambio climático. Ministerio de Obras Públicas (2018)”.

En el presente informe, se entrega de manera consolidada el detalle de todos los trabajos efectuados tanto en terreno como gabinete que abarca la actualización de las obras de la quebrada Bonilla, con las proyecciones de cambio climático incluidas en su diseño.

El estudio se efectuó a un nivel de Ingeniería de Detalle, razón por la cual se incorporan además todos los documentos que permiten su llamado a Licitación para la Construcción.

Forman parte integral del presente estudio, las memorias de cálculo de especialidades, cubicaciones, especificaciones técnicas, planos, y documentos de licitación generados en la presente Consultoría.

El estudio se realizó en el periodo comprendido entre septiembre de 2021 a octubre 2022, abordándose en 5 etapas sucesivas, de las cuales la última que se enumera a continuación, corresponde a la entrega final:

- Etapa I: Recopilación, Revisión de Antecedentes
- Etapa II Estudios y Trabajos en Terreno (Topografía, Geología y Geotecnia).
- Etapa III: Proposición y Análisis de Alternativas.
- Etapa IV: Diseño de Ingeniería de Detalles
- Etapa V: Informe Final

2. ÁREA DE ESTUDIO

2.1. UBICACIÓN

El área de estudio corresponde a las cuencas aportantes de los brazos norte y sur de la quebrada Bonilla, ubicadas en la región de Antofagasta, ciudad de Antofagasta, de coordenadas geográficas aproximadas latitud 23°35' y longitud 70°22'.

La quebrada Bonilla tiene un área de drenaje total de 8,89 km², de los cuales 3,25 km² corresponden a la hoya aportante al brazo norte y 5,64 km², al área aportante del brazo sur.

2.2. MORFOLOGÍA DE LA CUENCA

La quebrada Bonilla con sus 2 subcuencas (norte y sur), suman en conjunto un área aportante de 8,89 km² en el punto definido por la confluencia de ambos, aguas arriba del ingreso al sector urbano.

Los valores de las áreas aportantes de cada subcuenca y la longitud de los cauces en los tramos considerados para la materialización de obras, se consignan en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1 Áreas Aportantes por Subcuenca Quebrada Bonilla

Subcuenca	Área		Longitud tramo
	(km ²)	(%)	(m)
Bonilla Norte	3,25	36,6	1.860
Bonilla Sur	5,64	63,4	2.450
Total	8,89	100,0	4.310

En la Figura 2.1 se presenta una imagen satelital de la quebrada, en donde además se indican los límites de la cuenca aportante y la de sus dos brazos afluentes: norte y sur.

Tabla 2.2 Cuencas aportantes de la quebrada Bonilla



2.3. INFRAESTRUCTURA EXISTENTE

Los brazos norte y sur de la quebrada Bonilla, tienen un sentido de escurrimiento de oriente a poniente y convergen unas pocas decenas de metros antes de su descarga en calle Guardiamarina Arturo Fernández con pasaje Ebenezer, lugar donde se pierde por completo la quebrada. A aproximadamente 120 m de este punto hacia el poniente nace la Av. Nicolás Tirado.

La Av. Nicolás Tirado finaliza en la Ruta 1 (costanera) y se encuentra urbanizada y cuenta con los servicios básicos (agua potable, alcantarilla, electricidad y semaforización).

En el área utilizada por las quebradas propiamente tal, existe una zona de encauzamiento de las quebradas con enrocados en taludes de 1200 m aproximadamente, los cuales son de baja altura y han perdido su conformación.

No existen obras de arte en los cauces que mencionar.

En la actualidad se encuentra en proceso de construcción la subestación eléctrica Guardiamarina la cual declaró en la Adenda 2019¹ en relación a los caminos de acceso para la construcción "...los caminos no pavimentados corresponden a huellas existentes en el sector, las cuales se emplean en la actualidad para acceder a otros sectores cercanos al Proyecto...",

2.4. POBLACIÓN Y CAMPAMENTOS

La información recopilada en el trabajo de participación ciudadana realizada durante esta etapa proporciona una caracterización de la población en el área de influencia cuyos detalles se entregan en el Informe de Participación Ciudadana.

En base a los antecedentes recopilados en terreno y mediante bibliografía se determinó un total de 124 unidades de manzanas que componen el área de influencia.

Según los datos del Censo de 2017 se tiene que en el área de influencia se emplazan 3.138 hogares, con un total de habitantes de 11.821 personas, de las cuales el 71% está en el rango etario de 15 a 64 años.

Respecto a la información de campamentos emplazados en las cercanías de la quebrada Bonilla se consultaron los catastros y diagnósticos efectuados por Fundación para la Superación de la Pobreza (FUSUPO) entre los años 2018 y 2020.

A partir de dicha información se caracterizaron detalladamente los 3 campamentos ubicados al sur de la quebrada. Estos campamentos corresponden a:

- Campamento Futuro Antofagasta, donde habita un total de 227 personas.
- Campamento Villa Esperanza, compuesto por un total de 361 personas.
- Campamento Mujeres Unidas II, compuesto por 30 personas

El diagnóstico realizado indica que este proyecto es visto como algo sumamente relevante por las y los habitantes del área de influencia, ya que existe una sensación de riesgo permanente ante algún evento aluvional, sobre todo en aquellas villas más antiguas que vivieron la catástrofe del año 1991.

Cabe destacar que al momento de la visita realizada por los especialistas del AC Ingenieros Consultores, no se visualizan asentamientos humanos en el trazado de las obras proyectadas por EWI-AC en el año 2000.

¹ Adenda "Nueva Subestación Guardiamarina 110/23-13 KV. WSP. 2019, pág. 14.

3. PROYECTO DE OBRAS CONTROL ALUVIONAL EN QUEBRADA BONILLA DEL AÑO 2000

A continuación se presenta un breve resumen de las obras contempladas en el proyecto original, denominado: “Diseño Definitivo de los Sistemas de Disipación de Energía Aluvional y Vías Aluvionales en la Ciudad de Antofagasta. EWI-AC Ingenieros Consultores. 2000.

El proyecto elaborado específicamente para la quebrada Bonilla consistió en un conjunto de muros reductores de pendiente dispuestos en serie y muros de tierra para formar en los brazos norte y sur del cauce, pozas de decantación con sus respectivas vertederos, rápidos y canales colectores para conducir el flujo de agua de baja concentración de sólidos efluente de estas obras hasta su descarga aguas arriba de la Avenida Nicolás Tirado.

El propósito de estas obras es conseguir la reducción de la pendiente longitudinal del cauce para disminuir su capacidad de arrastre de material sólido en los tramos más empinados de la quebrada y a continuación, lograr la depositación parcial de sólidos acarreados por los flujos de detritos de modo de descargar en el plano urbano agua con menos contenido de material sólido.

3.1. DESCRIPCIÓN GENERAL DE LAS OBRAS PROYECTADAS

3.1.1. Tipo de obras

a) Muros reductores de pendiente:

Son obras de hormigón armado con un paramento vertical en el plano de aguas arriba y con talud inclinado en el plano de aguas abajo, de 70° con respecto a la vertical.

La altura máxima de diseño varió entre 3 m y 3,5 m como máximo, medida desde el fondo del cauce, con un ancho de coronamiento superior de 30 cm.

El muro cuenta con un vertedero central que permite el rebase del volumen de detritos que no será contenido aguas arriba de la obra, y una protección al pie consistente en un enrocado.

a) Pozas de decantación

Corresponden a obras excavadas en el terreno natural que cuentan adicionalmente con un terraplén compactado de manera de aumentar su volumen de almacenamiento.

La descarga de las aguas decantadas se realiza por medio de un vertedero central de hormigón y un rápido de descarga. De manera de similar a los muros reductores de pendiente, al pie de la descarga se diseñó una protección de enrocados, agregándole además una protección semejante a los taludes de aguas arriba.

b) Canales colectores:

Los canales captan y conducen los flujos efluentes de las pozas de decantación hasta el punto de descarga definitiva en Av. Nicolás Tirado. Son canales rectangulares en hormigón con alturas de 0,60 m y

anchos de 6 m en el caso de los llamados “canales individuales” cuando transportan el agua de un único brazo de la quebrada, y de 8 m en el caso del “canal unificado” que transporta agua de ambos brazos.

3.1.2. Obras del proyecto y su disposición

En total se proyectaron 36 muros reductores de pendiente y 15 pozas de acumulación para el control aluvional de los brazos norte y sur de la quebrada Bonilla.

A esto hay que agregar 929 m de canales colectores.

La disposición de las obras proyectadas en el área de estudio se muestra la Figura 3.1.

Figura 3.1 Disposición obras de control aluvional proyectadas



3.1.3. Identificación de las obras

a) Brazo norte

Se proyectaron 31 muros reductores de pendiente y 8 pozas de acumulación.

La secuencia de disposición de estas obras es la siguiente, mencionadas desde aguas arriba hacia aguas abajo, que se muestran también en la Figura 3.1:

- Muros reductores de pendiente: M-BON-31 a M-BON-14 (18 unidades).
- Pozas de acumulación: P-BON-8 a P-BON-3 (6 unidades).
- Muros reductores de pendiente: M-BON-13 a M-BON-1 (13 unidades).
- Pozas de acumulación: P-BON-2 a P-BON-1 (2 unidades).

b) Brazo sur

Se proyectaron 5 muros reductores de pendiente y 7 pozas de acumulación.

La secuencia de disposición de estas obras es la siguiente, mencionadas desde aguas arriba hacia aguas abajo:

- Muros reductores de pendiente: M-BOS-5 a M-BOS-1 (5 unidades).
- Pozas de acumulación: P-BOS-7 a P-BOS-1 (7 unidades).

3.1.4. Características geométricas generales de las obras proyectadas

a) Muros reductores de pendiente

- De los 36 muros reductores de pendiente proyectados, sólo 3 de ellos tienen una altura de 3,5 m, el resto todos de 3,0 m.
- El tamaño del enrocado proyectado en doble capa tiene un peso de 150 kg en una longitud de 4,4 m.
- En brazo sur de Bonilla el ancho promedio de los muros es 74,8 m, variando entre 71,2 y 80,4 m. El vertedero central tiene un ancho de 9,0 m con 0,8 m de revancha.
- En brazo norte de Bonilla se distinguen 2 tramos: en tramo M-BON-1 a M-BON-13 el ancho promedio de los muros es 14,2 m variando entre 6,6 m y 36,6 m. En tramo M-BON-14 a M-BON-31, el ancho promedio es 48,2 m variando entre 27,6 m y 85,4 m.
- En brazo norte de Bonilla el vertedero central tiene un ancho de 8,5 m y 0,8 m de revancha, a excepción de 3 muros (M-BON-4 a M-BON-6) cuyo vertedero central tienen un ancho de 4,0 m y 1,3 m de revancha.

b) Pozas de decantación

- Las pozas de decantación tienen una altura de 5 m medidos desde el fondo del cauce. Solo la poza P-BON-7 tiene una altura inferior (2,5 m).
- El muro parapeto del coronamiento tiene una altura de 1,3 m en brazo norte y 1,4 m en brazo de sur de la quebrada Bonilla.
- El canal de acceso tiene un ancho de 8,0 m con 1,3 m para brazo norte y 1,4 m para brazo sur de la quebrada de Bonilla.
- El ancho promedio del muro de coronamiento en brazo norte es 66,6 m, variando entre 20,4 m y 126,1 m.
- El ancho promedio del muro de coronamiento en brazo sur es 81,9 m, variando entre 73,5 m y 106,7 m.

c) Canal colector

- La longitud del canal colector individual del brazo norte de la quebrada Bonilla es 436,6 m con una pendiente topográfica media de 5,6%.
- La longitud del canal colector individual del brazo sur de la quebrada Bonilla es 394,3 m con una pendiente topográfica media de 9,8%.
- Finalmente, el canal colector unificado tiene una longitud de 98,1 m y pendiente topográfica media de 2,5%.

3.1.5. Interferencias y obras complementarias

El proyecto no aborda interferencias como tampoco obras complementarias tales como caminos de servicio, puentes viales y/o peatonales, etc.

4. RECONOCIMIENTO DE TERRENO

La visita de reconocimiento de terreno, llevada a cabo durante los días 28 y 29 de septiembre del 2021, permitió interiorizarse de las condiciones actuales en que se encuentra el área de estudio, notar los importantes cambios en la topografía en relación al Proyecto EWI & AC Ingenieros Consultores del año 2000 producto de las actividades mineras y recopilar antecedentes in-situ de los conos de deyección.

El detalle de las actividades realizadas, impresiones y hallazgos de la vista se incluye dentro del Anexo II "Reconocimiento de terreno".

Se incluye en este mismo anexo un set fotográfico de los principales aspectos observados.

4.1.1. Brazo Norte

El brazo norte se caracteriza por presentar en la zona más alta, un cauce encajonado de alta pendiente (del orden de 20%) que descarga en un cono de deyección producto del vaciamiento de la carga aluvional de aguas arriba, en una zona de brusca expansión y menor pendiente.

El material del cono contiene gravas, clastos y rocas de gran tamaño (sobre 1 m), y se muestra altamente acorazado con fragmentos de roca angulosos de tamaños apreciables y bloques aislados.

Su perfil transversal es convexo, mostrando la tendencia que tiene el flujo aluvional a depositar más material a lo largo del eje y derrames hacia los costados, por lo que los flujos sucesivos van abriéndose y perdiendo energía provocando también mayor facilidad para la depositación sobre el cono, además de un ostensible acorazamiento.

El cono muestra características de sus sedimentos que se aprecian con nitidez en cortes a la vista, con estratos claramente distinguibles, denotando el transporte durante avenidas aluvionales dentro de una matriz densa de material fino, arenas y gravas con alta capacidad para arrastrar bloques de dimensiones importantes.

La Figura 4.1 ilustra las características y sedimentos que se aprecian en distintos sectores del cauce norte.

Figura 4.1 Características y sedimentos del cauce del brazo norte



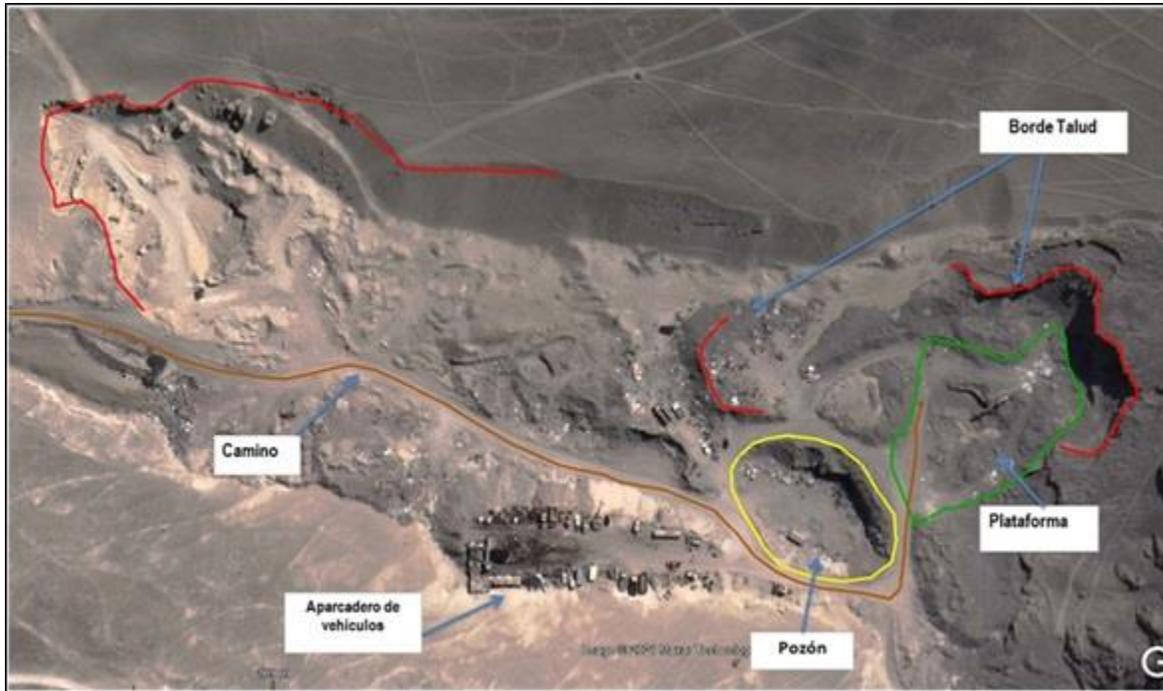
El cono de deyección del brazo norte de la quebrada Bonilla fue objeto de intensa explotación de áridos en el pasado, pero hoy las labores consisten en una actividad extractiva arena de la duna, no muy importante ni masiva y en el uso de ciertas explanadas dejadas por las faenas antiguas de extracción de áridos, para estacionamiento de máquinas y camiones.

Las faenas dejaron también grandes hondonadas y plataformas de operación que hicieron desdibujar completamente el cauce a lo largo de varios cientos de metros.

Aguas arriba de las hondonadas residuales de las faenas extractivas en el cono de deyección de la quebrada, el cauce se muestra inalterado, como también aguas abajo de esta zona, salvo sectores puntuales en que la quebrada ha quedado bloqueada por basurales.

La Figura 4.2 muestra una imagen satelital de las condiciones del cono de deyección del brazo norte de la quebrada Bonilla, posteriores a la explotación de áridos que se realizó en este sector de la quebrada. La imagen muestra también el camino de acceso a los frentes de trabajo que se habilitaron en su tiempo.

Figura 4.2 Imagen satelital de las condiciones actuales del cono de deyección del brazo norte



4.1.2. Brazo Sur

El brazo sur se forma mediante la confluencia de 2 brazos separados en su junta por un cerrillo.

Este sector se caracteriza por cauces bien delimitados por laderas que forman un cajón bastante estrecho.

Los flujos escurren aquí sobre depósitos aluvionales antiguos, los que se muestran en parte erosionados por las últimas crecidas. Se observa que el material del lecho está constituido por sedimentos donde predominan gravas finas y arenas con un porcentaje no menor de finos y la escasa presencia de grandes clastos.

Aguas abajo, el cauce se mantiene confinado pero su pendiente se incrementa a valores superiores al 10%, para a continuación abrirse en un abanico aluvional que actualmente está intensamente explotado con fines de extracción de áridos.

Más abajo el cauce, se desarrolla en una matriz de material arenoso y reduciendo gradualmente su pendiente hasta su confluencia en el sector más bajo, con el brazo norte.

En el tramo intermedio se ubica fuera del cauce el recinto de los estanques de agua potable. Aguas abajo los brazos norte y sur de la quebrada Bonilla, rodean un área alta del valle donde se encuentran en construcción las instalaciones de la subestación eléctrica Guardiamarina.

La Figura 4.3 muestra vistas de los tramos alto, medio y bajo del cauce sur, ilustran las características y sedimentos en distintos sectores del lecho.

Figura 4.3 Vistas del brazo norte de la quebrada Bonilla



Las faenas han significado una alteración significativa de esta parte del cauce, a tal punto que en ciertos sectores ha sido eliminado por excavaciones, acopios y construcción de plataformas de operación, mantención y estacionamiento de maquinarias y camiones.

En los sectores que se explotaron antes, aguas abajo de las faenas actuales, quedaron hondonadas profundas, como las que se aprecian vecinas al sector del recinto de los estanques de agua potable que existe en una explanada al sur del cauce.

Aguas abajo, salvo antiguas hondonadas de explotaciones más antiguas y sectores puntuales, el cauce ha sido modificado por caminos construidos recientemente (2021) para acceder a las faenas constructivas de la subestación eléctrica Guardiamarina Fernández.

La Figura 4.4 muestra una imagen satelital de las condiciones del cono de deyección que todavía es objeto de la explotación de áridos y tramo medio del brazo sur de la quebrada Bonilla donde estas faenas ya fueron abandonadas dejando importantes hondonadas, especialmente en las cercanías de los terrenos donde se emplazan los estanques de agua potable.

La imagen también permite apreciar el sitio donde se ubica la subestación eléctrica Guardiamarina y los caminos construidos para dar acceso a las faenas de construcción de la subestación y de las faenas de extracción de áridos.

Tabla 4.1 Imagen satelital de las condiciones actuales del brazo sur



Las principales conclusiones de la visita a terreno pueden resumirse como sigue:

- Se pudo observar que los conos de deyección de ambos brazos han sido explotados para la extracción de áridos. La actividad extractiva realizada generó profundas hondonadas y zonas de botaderos de materiales de rechazo, en ambos brazos, además de encontrarse ciertos sectores de las proximidades de los conos gran cantidad de basura, maquinarias y vehículos abandonados.
- En ambas quebradas se apreció que tanto aguas arriba como aguas abajo de las faenas de extracción de áridos, las condiciones topográficas parecen similares a las del Proyecto 2000.
- Si bien, a simple vista las excavaciones y acopios de material son significativos, no se tiene certeza de la magnitud del cambio topográfico ni si la actividad extractiva cesará, o de qué forma se seguirá ejecutando, en particular, en el cono del brazo sur.
- Los cambios en la topografía en las zonas intervenidas deben ser incorporados al dimensionamiento de las obras de control aluvional ya que las hondonadas existentes permitirán contener material detrítico, como asimismo las plataformas dejadas por faenas antiguas, ayudaría a la desaceleración del flujo reduciendo el volumen de sedimento arrastrado hacia aguas abajo.
- Respecto del material de arrastre de la zona alta hasta los conos de deyección, se observa que el brazo sur presenta material más fino y cementado, que el del brazo norte.

5. RECOPIACIÓN, REVISIÓN Y ANÁLISIS DE ANTECEDENTES

5.1. ESTUDIO HIDROLÓGICO PROYECCIONES DE CAMBIO CLIMÁTICO

5.1.1. Alcance

Se efectuó una completa una revisión de los antecedentes disponibles para el análisis hidrológico, en particular, la revisión se enfocó en determinar los criterios y consideraciones del estudio EWI & AC Ingenieros Consultores, caudales y volúmenes de diseño empleados para las obras de control aluvional proyectadas, y a partir de lo anterior detectar eventuales brechas de información o aspectos que en el presente estudio puedan ser complementados.

Cabe señalar que en el citado proyecto no se incorporó en el análisis la variable de Cambio Climático para la determinación de los caudales de diseño.

Previamente se efectuó la recopilación de registros pluviométricos de precipitaciones máximas en 24 horas para las estaciones meteorológicas cercanas al área de estudio.

El detalle en extenso de la revisión de antecedentes se incluye dentro del “Anexo VI Análisis hidrológico con componente de cambio climático”, donde se incluyen estadísticas recopiladas, gráficos y otros datos.

5.1.2. Información pluviométrica

Para el desarrollo del estudio se buscó elaborar una base de datos lo más amplia posible, tanto en extensión temporal como de número de estaciones meteorológicas posibles, de registros pluviométricos, en particular de precipitaciones máximas en 24 horas.

Las fuentes de información consultadas fueron la Dirección General de Aguas (DGA) y Dirección Meteorológica de Chile (DMC).

La Figura 5.1 muestra la ubicación de las estaciones meteorológicas con registros próximas al área de estudio, la cual se demarca en color rojo.

La Tabla 5.1 resume sus principales características.

Los registros de precipitaciones máximas anuales en 24 horas están representados gráficamente en la Figura 5.2.

Figura 5.1 Estaciones meteorológicas cercanas al área de estudio

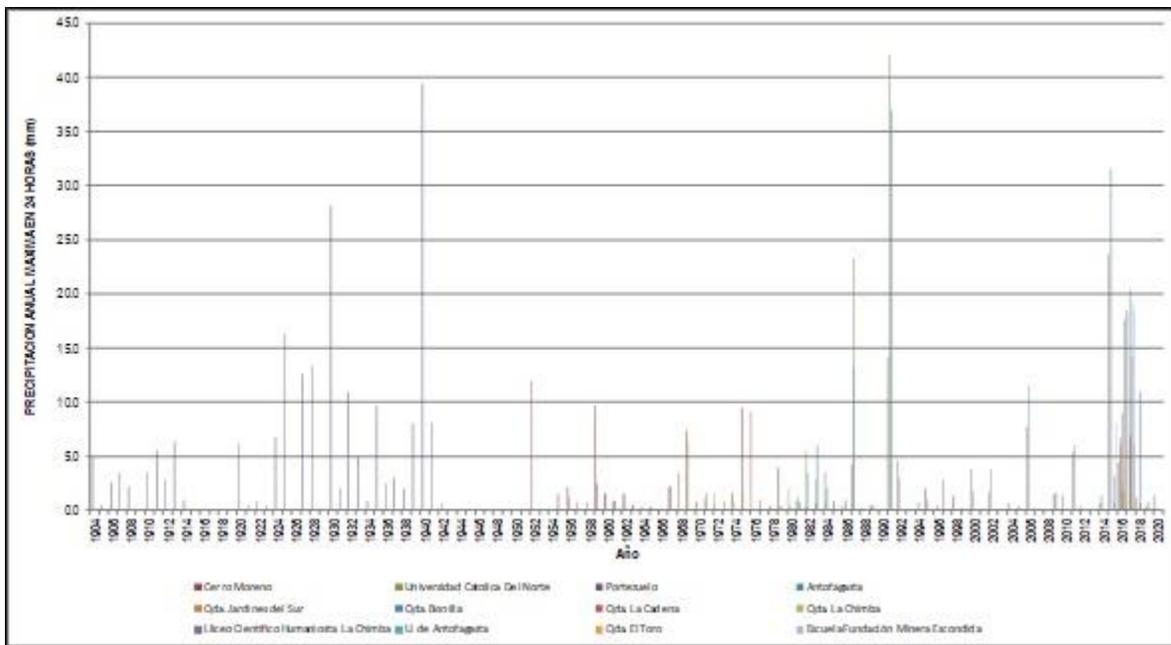


Tabla 5.1 Estaciones meteorológicas próximas área de estudio

Nº	Estación	Organismo	Código BNA	Latitud S.	Longitud O.	Elevación (msnm)	Periodo de registro (años)	Longitud de registro (años)
1	Universidad de Antofagasta	D.G.A.	02900000-K	23° 42' 07"	70° 25' 15"	30	2015-2017	3
2	Quebrada Jardines del Sur	D.G.A.	02900001-8	23° 42' 07"	70° 25' 15"	26	2016-2020	5
3	Quebrada El Toro	D.G.A.	02760000-K	23° 40' 06"	70° 23' 46"	89	2016-2020	6
4	Quebrada La Cadena	D.G.A.	02240005-3	23° 37' 38"	70° 22' 30"	139	2016-2020	5
5	Escuela Fundación Minera Escondida	D.G.A.	02240001-0	23° 36' 53"	70° 22' 13"	284	2015-2018	4
6	Antofagasta	D.G.A.	02710003-1	23° 35' 50"	70° 23' 11"	50	1978-2020	43
7	Quebrada Bonilla	D.G.A.	02240003-7	23° 34' 59"	70° 22' 27"	112	2016-2020	5

Nº	Estación	Organismo	Código BNA	Latitud S.	Longitud O.	Elevación (msnm)	Periodo de registro (años)	Longitud de registro (años)
8	Quebrada La Chimba	D.G.A.	02240002-9	23° 33' 32"	70° 23' 43"	33	2016-2019	4
9	Liceo Científico Humanista La Chimba	D.G.A.	02240000-2	23° 33' 17"	70° 23' 36"	45	2015-2016	2
10	U. Católica del Norte	D.M.C.	230002	23° 40'	70° 24'	7	1968-2020	53
11	Cerro Moreno	D.M.C.	230001	23° 26'	70° 26'	135	1950-2020	71
12	Portezuelo	D.M.C.	-	23° 39'	70° 25'	5	1904-1968	61

Figura 5.2 Variación temporal precipitaciones máximas anuales en 24 hr



De estos registros, es posible constatar que en el periodo con datos solo en 14 de 117 años han ocurrido precipitaciones que superaron los 10 mm/día, siendo solo 4 eventos los que superaron los 25 mm/día (3 en el siglo pasado y 1 en las últimas 2 décadas):

1. 1925: 16,3 mm (Portezuelo)
2. 1927: 12,6 mm (Portezuelo)
3. 1928: 13,3 mm (Portezuelo)
4. 1930: 28,2 mm (Portezuelo)
5. 1932: 11,0 mm (Portezuelo)
6. 1940: 39,4 mm (Portezuelo)
7. 1952: 12 mm (Cerro Moreno)

8. 1987: 23,3 (UCN) -13,2 mm (Antofagasta)
9. 1991: 42,0 mm (UCN) 37,0 mm (Antofagasta) - 14,1 mm (Cerro Moreno)
10. 2006: 11,5 mm (Antofagasta)
11. 2015: 31,5 mm (Antofagasta) - 23,6 mm (Cerro Moreno)
12. 2016: 17,6 mm (Universidad de Antofagasta)
13. 2017: 20,5 mm (Antofagasta) - 19,2 mm Universidad de Antofagasta -18,4 mm (Cerro Moreno) - 18,4 mm (Escuela Fundación Minera Escondida) - 14,2 mm (Quebrada La Cadena)
14. 2018: 11,0 mm (Quebrada Bonilla)

Si bien la información es más bien escasa, se observa que las precipitaciones diarias de los eventos más importantes (sobre 25 mm/día) tendrían a indicar que los montos precipitados son mayores en el sector más céntrico que en el norte de la ciudad (Cerro Moreno).

5.1.3. Caudales de Diseño

5.1.3.1. Intensidades de lluvia y caudales Peak según periodos de retorno

Para las obras de control aluvional se consideró un periodo de retorno de 50 años obtenido de un análisis técnico económico empleando para ello los criterios y metodología que recomendaba MIDEPLAN (MIDESO) para el análisis de la inversión pública en proyectos de defensas fluviales o control de crecidas e inundaciones.

Los caudales peak de diseño fueron obtenidos empleando la fórmula racional con una lluvia de intensidad media asociada a una lluvia de 3 horas de duración (Ref. [1] y [2]).

La Tabla 5.2 presenta los caudales líquidos para ambos brazos de Bonilla para distintos periodos de retorno.

Tabla 5.2 Caudales peaks líquidos para eventos de distintos periodos de retorno

Quebrada Bonilla	A (km ²)	Coeficiente de escorrentía		Caudales líquidos (m ³ /s)					
				T=25 años		T=50 años		T=100 años	
				Cmin	Cmax	Qmin	Qmax	Qmin	Qmax
Brazo Norte	3,4	0,4	0,6	1,6	2,4	3,1	4,6	6,0	9,1
Brazo Sur	3,3	0,4	0,6	1,5	2,3	3,0	4,5	5,9	8,8

Los coeficientes de escorrentía tienen su origen en un proceso de ajuste iterativo que incluyó simultáneamente coeficientes de escorrentía, concentración de sólidos y rugosidad de cauce. Este valor varía en función del tamaño de la cuenca.

5.1.3.2. Flujo de detritos

En el estudio del proyecto 2000 se elaboró un modelo numérico, con el propósito de determinar los hidrogramas de detritos a la salida de cada cuenca, el que además, permitió evaluar la respuesta

hidrológica de cada cuenca cuando se incorporan obras reguladoras de aluviones a lo largo del cauce principal o secundario.

La forma del hidrograma generado de cada cauce es de tipo trapecial, donde se supuso que los caudales crecen linealmente hasta alcanzar el valor del caudal máximo en un tiempo igual al tiempo de concentración.

Dicho caudal se mantiene constante hasta el momento en que cesa la precipitación, a partir del cual comienzan a decrecer los caudales, suponiendo también un decaimiento lineal.

El hidrograma del flujo de detritos supone que la concentración volumétrica de sólidos se mantiene constante durante el aluvión para la cuenca en análisis, independiente de la magnitud del caudal.

La superposición de los hidrogramas generados para cada cuenca y su rastreo a lo largo del cauce, dan origen al hidrograma total a la salida del sistema o cuenca completa.

A partir de la integración de los hidrogramas generados para cada brazo de la quebrada Bonilla se obtuvieron los volúmenes líquidos y sólidos para distintos periodos de retorno, los cuales se presentan en la Tabla 5.3. Los tiempos base de los hidrogramas trapeciales son 2,8 y 2,7 horas para los brazos norte y sur, respectivamente.

Los coeficientes de concentración volumétrica de sólidos empleados fueron 50% y 55% para los brazos norte y sur, respectivamente.

Tabla 5.3 Características de los hidrogramas de flujos de detritos

Quebrada Bonilla	Caudal Máximo (m ³ /s)				Volumen (m ³)			
	Líquido		Detrítico		Líquido		Detrítico	
	T=50 años	T=100 años	T=50 años	T=100 años	T=50 años	T=100 años	T=50 años	T=100 años
Brazo Norte	3,9	7,6	7,8	15,2	33.515	65.394	67.030	130.788
Brazo Sur	3,8	7,3	8,4	16,2	32.411	77.463	72.024	140.842
Cuenca Total	7,7	14,9	16,2	31,4	65.926	142.857	139.054	271.630

5.1.4. Revisión de antecedentes de cambio climático

La adaptación al cambio climático supone una planificación estratégica a corto, mediano y largo plazo, la cual debe considerar diferentes escenarios futuros posibles para asegurar la resiliencia de las soluciones que se propongan.

Así, con el objetivo de contar con lineamientos respecto a los cambios en el clima, desde hace algunas décadas el Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés) y la comunidad científica internacional han trabajado en el desarrollo (y actualización) de potenciales trayectorias que podrían seguir las emisiones de gases de efecto invernadero y, con ello, estudiar la evolución del clima futuro.

En 2013, el IPCC presenta una gama de escenarios de Trayectorias Representativas de Concentración (RCP por sus siglas en inglés) de gases de efecto invernadero, los cuales abarcan desde una condición de mayor severidad y menor acción de mitigación (iRCP 8.5) a una de menor severidad y mayor acción de mitigación (iRCP 2.6).

Estos escenarios han servido como insumo para diferentes centros de investigación (NCAR, EEUU; BCC, China), los cuales han empleado dichas directrices para generar simulaciones del sistema atmosférico apoyados en modelos numéricos denominados Modelos de Circulación General (MCG) y, así, proyectar cambios en diferentes variables meteorológicas como, por ejemplo, temperaturas extremas, precipitación, entre otras.

Asimismo, con el fin de facilitar el estudio del cambio climático, las simulaciones generadas por los diferentes centros de investigación se encuentran incluidos en el Proyecto de Comparación de Modelos – CMIP5 (Taylor *et al.*, 2012).

De este modo, en un escenario de clima cambiante, resulta importante incluir la incertidumbre asociada al cambio climático en el diseño de obras de control de crecidas. En el presente acápite, se muestra un resumen de los principales antecedentes disponibles para la zona de estudio en relación a proyecciones de cambio climático.

El detalle *in extenso* de la revisión de antecedentes relacionados con cambio climático se incluye dentro del “Anexo VI Análisis hidrológico con componente de cambio climático”, donde se presentan estadísticas recopiladas, gráficos y otros datos.

5.2. HIDRÁULICA ALUVIONAL

Se efectuó una completa una revisión de los antecedentes disponibles de hidráulica aluvional, considerando principalmente los estudios y diseños elaborados en los años 1995² y 2000³.

Conjuntamente con lo anterior se realizaron estimaciones preliminares de las concentraciones volumétricas de sólidos, mediante la modelación hidráulica de los tramos altos de los brazos norte y sur de la quebrada Bonilla, basadas en los antecedentes topográficos y geotécnicos existentes y a la información recabada en la visita inicial de reconocimiento de terreno.

El detalle en extenso de la revisión de antecedentes se incluye dentro del Anexo VII “Estudio de Hidráulica Aluvional”, donde se incluyen metodología, cálculos desarrollados y principales conclusiones.

² Diseño de Sistemas Alternativos de Disipación de Energía en las Quebradas de Antofagasta. EWI (Electrowatt Ingenieros Consultores (Chile) S.A.-1995.

³ Diseño Definitivo de los Sistemas de Disipación de Energía Aluvional y Vías Aluvionales en la ciudad de Antofagasta – EWI (Electrowatt Ingenieros Consultores (Chile) S.A. – AC Ingenieros Consultores Ltda. – 2000.

5.2.1. Caracterización morfológica y mecánico fluvial

En la mayoría de las quebradas de Antofagasta desde el punto de vista reológico, el flujo corresponde al tipo inercial pleno y desde el punto de vista hidráulico a un flujo pedregoso.

A lo largo del brazo norte de la quebrada Bonilla se pueden identificar 3 tramos característicos en función de la pendiente longitudinal.

En cuanto a los sedimentos constitutivos de su lecho, no se tiene una caracterización granulométrica para las calicatas ubicadas en la parte alta del brazo norte, por lo que se determinó una curva granulométrica promedio utilizando los resultados de las 3 calicatas aguas abajo más cercanas. A partir de esta curva se determinan los diámetros característicos $D_{50} \approx 4$ mm y $D_{95} \approx 40$ mm.

A lo largo del brazo sur de la quebrada Bonilla se pueden identificar 5 tramos característicos en función de la pendiente longitudinal.

Los resultados del análisis granulométrico que incluyen la parte alta de la quebrada señalan sedimentos más finos que en el brazo norte, pero manteniéndose en el rango de las gravas arenosas, con $D_{50} = 3,8$ mm y $D_{95} \approx 30$ mm.

5.2.2. Estimaciones de las concentraciones de sólidos

De manera preliminar se realizó la estimación de la concentración volumétrica de sólidos para los escurrimientos detríticos sobre las quebradas del proyecto mediante estimaciones basadas en la capacidad de transporte sólido del cauce y una fórmula empírica.

La estimación se efectuó para las partes altas de la quebrada Bonilla, los cuales aportan sus cargas de sedimento hacia los respectivos conos de deyección, los cuales no han experimentado cambios significativos desde que se hicieron los levantamientos para el proyecto 2000 (Anexo II Reconocimiento de terreno”).

Para el cálculo se consideraron los caudales líquidos e hidrogramas asociados a los periodos de retorno de 50 y 100 años (“Anexo VI Análisis hidrológico con componente de cambio climático”).

La capacidad de transporte sólido de fondo, se estimó mediante la aplicación de las relaciones de Wilcock & Crowe (2003) y el método de la Envoltente Inferior, recomendado en el Manual de Carreteras.

Para estimar la capacidad de arrastre total de un lecho móvil, a esta capacidad se le debe agregar la carga de sedimentos transportada en suspensión del lecho y la carga de washload.

En el presente caso, se supuso conservadoramente la primera equivalente a un 30% del arrastre de fondo, mientras que para la segunda una concentración volumétrica del 5% del caudal líquido (50.000 ppm, lo que es una concentración muy alta ya que un flujo de agua con altas concentraciones de finos en suspensión puede alcanzar valores de miles de ppm durante grandes crecidas).

La capacidad de transporte total de sedimento se evaluó solo en la sección de mayor potencial que corresponde a la sección de mayor esfuerzo de corte y ancho superficial según una simulación HEC RAS de la quebrada.⁴

Para la misma sección en que se evaluó la capacidad de transporte total se aplicó también la expresión empírica propuesta por Takahashi (1992) para flujos inerciales en régimen pedregoso, que considera características geométricas del cauce y del sedimento presente en el lecho de la quebrada Bonilla.

De los resultados obtenidos para el brazo norte, la estimación más desfavorable permite concluir que las concentraciones volumétricas variarían entre 24% y 42% para los periodos de retorno de T= 50 y 100 años, respectivamente. Los volúmenes detríticos asociados serían respectivamente de 55.343 m³. y 112.272 m³.

Por su parte, para el brazo sur se concluye que las concentraciones volumétricas variarían entre 12% y 40%, con volúmenes detríticos asociados de 56.686 m³ y 109.348 m³, para los periodos de retorno de T= 50 y 100 años, respectivamente.

5.3. MARCO GEOLÓGICO DEL ÁREA DE ESTUDIO

Se presenta a continuación la revisión de antecedentes disponibles del área de estudio, correspondientes a la geología y remociones en masa.

El detalle en extenso de la revisión de antecedentes se incluye dentro del Anexo III “Geología”.

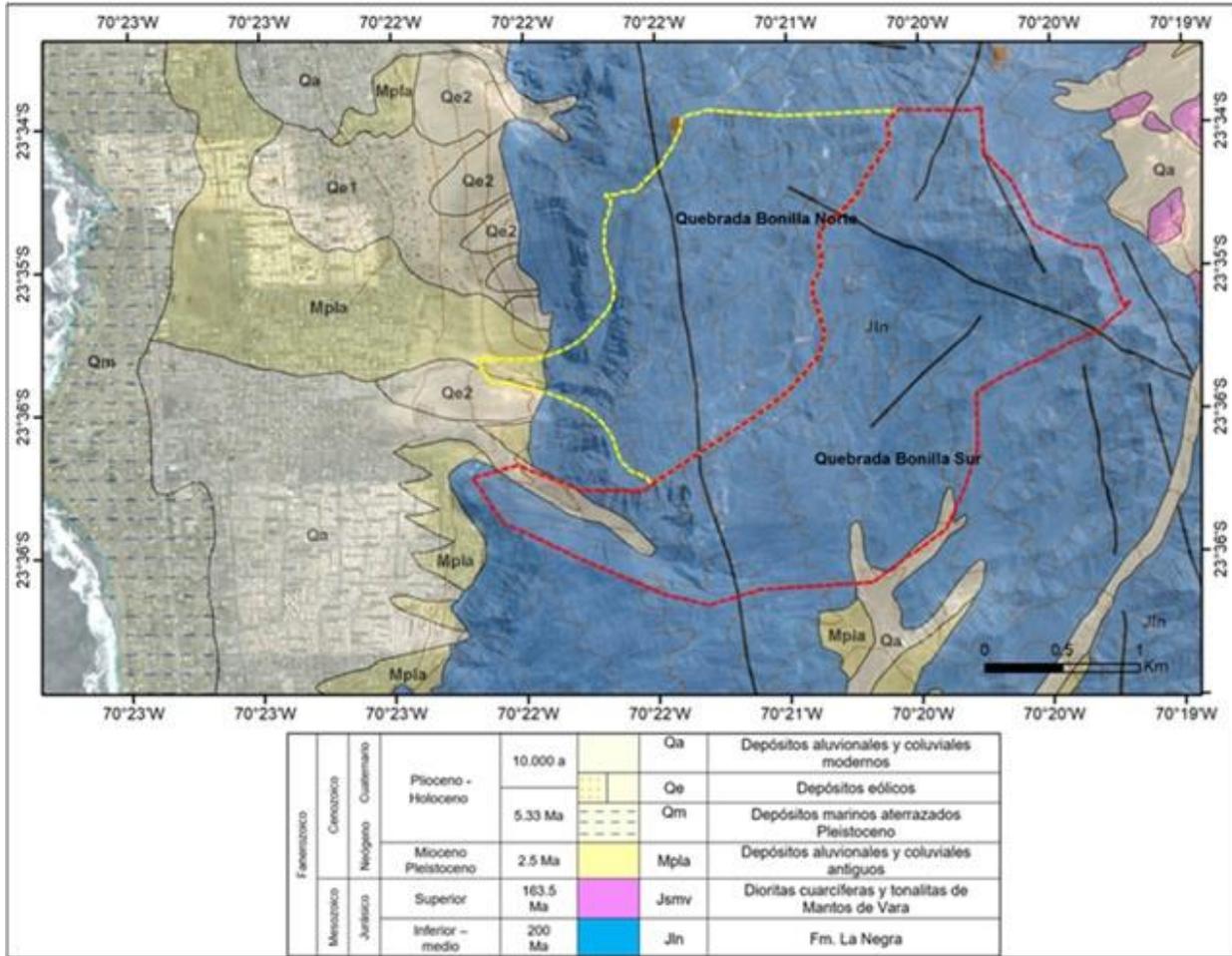
5.3.1. Geología Local

Centrándose en el sector en estudio, según lo mapeado por SERNAGEOMIN que se ilustra en la Figura 5.3, las quebradas deberían coincidir con la unidad geológica de la Formación La Negra y en las zonas bajas del escarpe costero cubren diferentes depósitos como los marinos, aluvionales y coluviales antiguos, eólicos y aluvionales y coluviales modernos, lo cual fue corroborado con las visitas a terreno.

- Formación La Negra: Rocas volcánicas principalmente correspondientes a andesitas de piroxeno, en menor medida basaltos de olivino. Presenta intercalaciones de areniscas rojas, brechas sedimentarias y conglomerados brechosos.
- Mantos de Vara: Estas rocas intruyen las andesitas de la Formación La Negra. Las rocas de esta unidad corresponden a dioritas cuarcíferas, tonalitas y granodioritas de color gris claro a gris rosado claro, de grano fino a medio.

⁴ En la estimación del caudal sólido también interviene el ancho de la sección. Si bien el perfil PT-77 presenta una tensión de corte levemente mayor al PT-60, se tienen anchos de escurrimiento de 3,46 m y 5,88 m, respectivamente

Figura 5.3 Leyenda Mapa Geología Local (Carta Geológica Antofagasta – Punta Tetas)



- Depósitos Aluviales y Coluviales antiguos: Depósitos sedimentarios continentales constituidos principalmente por gravas y arenas. Representan antiguos conos coluviales o abanicos aluviales de baja pendiente, que se encuentran seccionados por los cauces de las quebradas actuales o parcialmente cubiertos por los depósitos aluviales cuaternarios. Originados por flujos gravitacionales o por corrientes de barro, están constituidos por bloques, gravas, arenas y limos, con intercalaciones menores de ceniza volcánica retrabajada. Se presentan en parte mal estratificados, semiconsolidados y parcialmente cementados por cloruros (halita) y sulfatos (anhidrita y yeso). Estos depósitos, de hasta 50 m de potencia, rellenan cuencas intramontañas de la Cordillera de la Costa.
- Depósitos Marinos Aterrazados: Constituidos por conglomerados, coquinas y arenas bioclásticas que alcanzan un espesor no superior a 2 m y afloran a lo largo de la franja costera. Los conglomerados contienen fragmentos de andesitas provenientes del sustrato rocoso de la Formación La Negra. Las coquinas son de color blanco, muy compactas y presentan muy bajo

grado de cementación. Las arenas son de color gris claro y se caracterizan por presentar abundante material bioclástico mezclado con fragmentos líticos.

- Depósitos Eólicos Inactivos: Depósitos eólicos semiconsolidados que tienen gran cantidad de fragmentos bioclásticos aportados desde la zona litoral. Estos depósitos afloran en la vertiente occidental de la Cordillera de la Costa, donde forman cuerpos que alcanzan un espesor máximo de 5 m.
- Depósitos Eólicos Activos: Depósitos no consolidados de arenas finas a medias, muy bien seleccionadas. En algunos sectores, se presentan interestratificados con los depósitos aluviales modernos, con los que forman cuerpos de hasta 5 m de espesor.
- Depósitos Aluvionales y Coluviales Modernos: Depósitos no consolidados de gravas y arenas de composición variada (polimíctica) y monomíctica que contienen intercalaciones lenticulares de arcillas y limos. Constituyen el relleno actual de las quebradas en cuyas desembocaduras conforman sistemas de abanicos aluviales coalescentes. Su origen está ligado a flujos intermitentes de agua, generados durante lluvias intensas. Debido a que estos depósitos se encuentran aún en formación, se estima que su edad se restringe al lapso pleistoceno tardío-holoceno.
- Depósitos Antrópicos: Estos depósitos no han sido incluidos dentro de la Carta Geológica Antofagasta – Punta Tetos. Estos abarcan desde rellenos artificiales a residuos domiciliarios e industriales. Se observan residuos domiciliarios sólidos, principalmente, en quebradas de la Cordillera de la Costa y en los bordes de los caminos secundarios que la cruzan.

5.3.2. Geología Estructural

En la Cordillera de la Costa, la estructura dominante está dada por la falla Salar del Carmen, de dirección norte-sur. A lo largo del borde oriental de la Cordillera de la Costa, es posible observar que la Falla Salar del Carmen ha experimentado una reactivación de tipo normal, marcada por conspicuos escarpes que afectan los depósitos aluviales y coluviales antiguos.

La ciudad de Antofagasta se caracteriza por una fuerte influencia tectónica que ha producido variados alzamientos y hundimientos del terreno, asociados a regresiones y transgresiones marinas, las cuales han quedado evidenciadas en los distintos depósitos sedimentarios presentes.

5.3.3. Geomorfología

La geomorfología de Antofagasta se caracteriza por la Cordillera de la Costa en dirección N-S, que en su flanco occidental desarrolla el Escarpe Costero, el cual genera un desnivel de cerca de 300 msnm que da paso a la Planicie Costera, de pendiente suave, que son diferentes niveles de terrazas de abrasión, donde se asienta la ciudad. Estos tres dominios geomorfológicos, son las que modelan la ciudad de Antofagasta.

El Escarpe Costero, que marca la topografía de la ciudad y funciona como límite natural de la zona urbana por el sector oriente, es también el límite oriental de la planicie costera, con una pendiente que oscila entre

20 a 45 grados, generalmente, cuando las pendientes son menores es por la cobertura de depósitos aluviales sedimentados sobre este, alcanzando alturas entre 400 a 700 m.s.n.m.

5.3.4. Peligros Geológicos

El área regional, a nivel de la ciudad de Antofagasta, presenta variados peligros geológicos, por ejemplo, existe potencial para ocurrir terremotos y tsunamis por el lugar donde está ubicada, no existe un peligro geológico asociado a centros eruptivos, por nombrar alguno de los peligros más generales.

De manera local para área de estudio, el peligro geológico que más está presente son las remociones en masa, de hecho, existe un plano de peligro de remociones en masa realizado por el SERNAGEOMIN que también ha sido incluido en la revisión de antecedentes.

5.3.5. Reconocimiento de terreno

Tras la visita a terreno donde fueron recorridos los dos brazos de la quebrada Bonilla, se constató lo siguiente.

El brazo norte de la quebrada Bonilla es encajonado y con alta pendiente.

Ambos flancos de la quebrada presentan afloramientos importantes de la Formación La Negra.

Sobre la quebrada se acumula gran cantidad de material procedente de las laderas, bolones de gran tamaño, poco transporte, que se apilan en el tramo de la quebrada desde la cota en su nacimiento, hasta la zona donde la quebrada se abre sobre los depósitos eólicos actuales, acumulando material a un cono aun activo.

Sobre este cono se puede registrar en uno de los cortes realizados para labores de extracción de áridos, que los eventos ocurridos en esta quebrada han sido, probablemente, todo el cuaternario, observándose sucesivos eventos de diferente energía.

El brazo sur de la quebrada Bonilla, tiene menor pendiente, menor encajonamiento, una zona de valle mucho más amplia, flancos de menor pendiente. Es mucho más extensa, en comparación al brazo norte. En los cortes realizados por labores de extracción de áridos, también es posible visualizar diferentes eventos que han tenido lugar, probablemente, durante todo el cuaternario, que se han ido acumulando, uno sobre otro. Acá, la granulometría es muy diferente al sector norte, ya que no se observa acumulación de grandes bolones, más bien, es material tamaño grava con matriz arenosa.

En las quebradas mismas no se evidencian situaciones de riesgos geológicos tales como deslizamientos de masas rocosas y esta posibilidad debe ser descartada. Los aluviones que se encuentran en la Quebrada Norte y que se presentan como masas de rocas corresponden al movimiento por flujos de agua de material que con el paso de los años se deposita en una quebrada angosta, muy encajonada, de fuerte pendiente.

5.4. MECÁNICA DE SUELOS

Los antecedentes de mecánica de suelos empleados para la elaboración de este capítulo fueron extraídos directamente de los anexos (certificados de análisis de laboratorio) del Proyecto EWI & AC Ingenieros Consultores del año 2000.

En el Anexo IV “Mecánica de Suelos y Geotecnia” se puede ver la estratigrafía de cada calicata más detallada como la clasificación U.S.C.S de los estratos y su descripción visual.

5.4.1. Análisis de antecedentes disponibles

Se tienen antecedentes de la realización de 47 calicatas repartidas en toda la quebrada Bonilla, 19 en brazo norte y 29 en brazo sur (la suma da 48 ya que una calicata es común).

Los pozos o calicatas tienen una profundidad de hasta 3 metros o hasta encontrar la roca o algún bolón grande que impidió continuar con la excavación.

En la Figura 5.4 se muestra distribución de las calicatas en el área de estudio. La separación aproximada es cada 100 metros.

Figura 5.4 Quebrada Bonilla y ubicación de las calicatas precedentes



De las estratigrafías detalladas de las calicatas es posible hacer una caracterización del suelo general tanto para el brazo norte como para el brazo sur, que pone de relieve que existe bastante heterogeneidad entre los pozos, tanto en el espesor de los estratos, como en la existencia o inexistencia de uno de los estratos en algunos de estos, como lo revelan la Tablas 5.4 y Tabla 5.5.

Cabe mencionar que en ninguna de las calicatas se encontró napa hasta por lo menos la profundidad de las calicatas.

Tabla 5.4 Estratigrafía representativa brazo norte quebrada Bonilla

Horizonte	Espesor Estrato	Suelo
1	Variable entre 0,4 y más de 3,4 metros.	Grava arenosa o arena fina, alternancia entre estos, arena que en algunas partes localmente presenta conglomerado de clastos, bloques y grava con arenas, compacidad media, de tamaño máximo 3", 6"x8" y 35"x12" (SP, SW-SM, SP-SM, GP). Este horizonte no se detectó en los pozos 8 y 10.
2	Variable entre 0,9 y más de 3,0 metros	Arena muy fina y cementada de color amarillo, estratificada, la compacidad es de media a muy alta, presenta gravas aisladas de cantos anulares y subangulares, de tamaño máximo 2 ½" (SP, SP-SM). Este horizonte sólo se detectó en los pozos 7, 8, 9A, 9B, 10, 11 y 12.
3	Indefinido > 3 m	Roca de color gris a verde detectada solamente en un pozo (n°17), el cual está muy arriba en la quebrada, es decir abajo la roca está muy profunda para efectos del proyecto, la roca sólo se encuentra al principio de las quebradas donde se puede ver incluso en los taludes.

Tabla 5.5 Estratigrafía representativa brazo sur quebrada Bonilla

Horizonte	Espesor Estrato	Suelo
Cauce Principal		
1	Variable entre 0,3 y más de 0,9 metros.	Relleno conformado por arena suelta y grava superficial, detectado sólo en algunos pozos que son de la parte más baja (pozos 2, 3, 4, 5, 9, 12 y 13), corresponde a una mezcla de lo que hay en el sector, probablemente son rellenos antrópicos que han sido depositados con el objetivo de dejar plano o alguna intención de este tipo. Es un suelo muy suelto que hay que remover o compactar para poder fundar sobre este.
2	Variable entre 2,0 y más de 3,0 metros.	Suelo granular conformado por estratos de grava arenosa o arena gravosa, localmente se encuentra arena fina con algo de limo, compacidad media a baja y localmente alta. Gravitas, bolones y clastos de tamaño máximo 3", 8" y 20"x10" respectivamente. Algunos trozos de roca y en forma aislada se encuentran lentes de arena gruesa y arena fina (GW, GW-GM, SP-SM, SP, SW, SM).
3	Mayor a 0.3 metros.	Arena fina limosa cementada (igual a la de Bonilla Norte), pero sólo se detectó en un pozo (n°10), por lo tanto, este estrato es casi inexistente o está mucho más debajo de la profundidad excavada de las calicatas.
Afluente 1		
1	Variable entre 2.2 y más de 3.0 metros.	Grava areno limosa o arena gravo limosa, de estructura estratificada, compacidad media a baja. Gravitas, bolones y clastos de tamaño máximo 3", 6"x8" y 28"x36". Las rocas y clastos se presentan en aproximadamente un 40% en volumen (GW o SW-SM).
2	Indefinido	Roca con fracturas menores. Sólo se detectó en el pozo 3 que es el pozo más alto del Afluente 1, a una profundidad de 2.2 m.
Afluente 2		
1	Mayor a 3 metros.	Grava areno limosa o arena gravo limosa, de estructura estratificada, compacidad media a baja. Gravitas y bolones de tamaño máximo 3", 5" respectivamente (GW o SW-SM).

5.5. USO DE SUELOS Y PLAN REGULADOR

Se analizó el área de estudio desde el punto de vista del uso de suelo actual y futuro para lo cual se revisó lo señalado en el Plan Regulador Comunal de Antofagasta y Plan de Emergencia elaborado por la ONEMI para las ciudades costeras de la región.

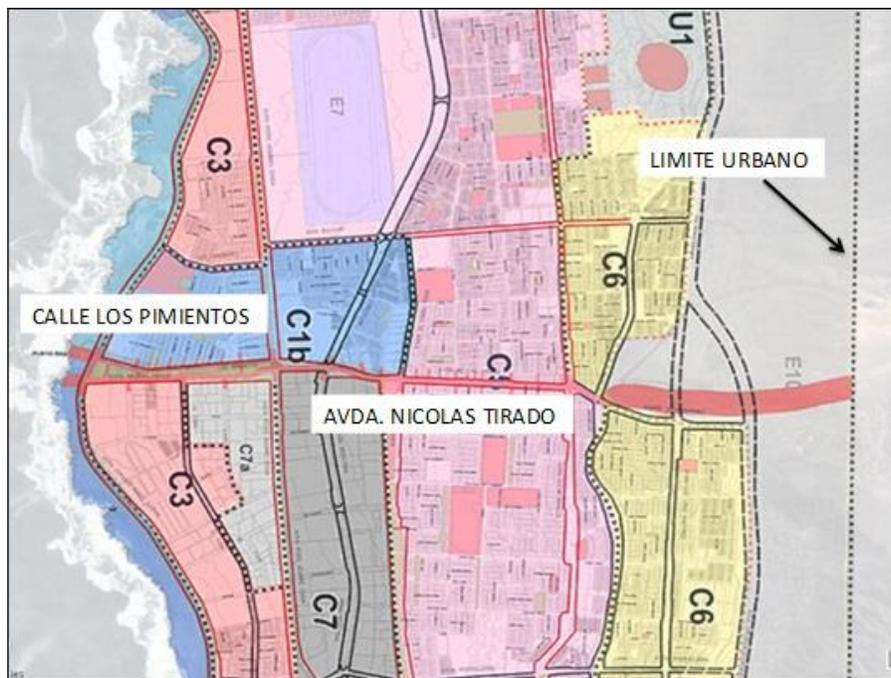
Conjuntamente con lo anterior, se analizaron los antecedentes recopilados durante la visita a terreno efectuada la cual forma parte del Anexo II “Reconocimiento de terreno”.

El detalle en extenso del análisis de uso de suelo del área de estudio se incluye dentro del Anexo VIII “Uso de suelos con fines urbanos y plan de emergencia”.

5.5.1. Plan Regulador Comunal de Antofagasta

El Plan Regulador Comunal de Antofagasta vigente, el cual fue aprobado el año 2001, clasifica el área de estudio como zona E-10 que se define como zona no edificable, según muestra la Figura 5.5.

Figura 5.5 Plan regulador de Antofagasta



Hacia aguas abajo del área de estudio (zona de influencia) las zonas están definidas como uso principalmente residencial.

En el artículo 63 de la ordenanza se hace referencia a los sistemas aluviales urbanos, los cuales tuvieron por objetivo mantener su trazado y ancho para el paso de crecidas que atraviesan la ciudad de Antofagasta.

Se define como sistema aluvial urbano al conjunto de 3 elementos básicos: Embudo superior, avenida aluvial y desembocadura.

Particularmente para la quebrada Bonilla se tiene que el embudo superior considera una franja de reserva de 50 m de ancho a cada lado del eje de las quebradas. Esta franja tiene prohibición de construcción.

5.5.2. Plan Regulador Intercomunal Borde Costero de la Región de Antofagasta

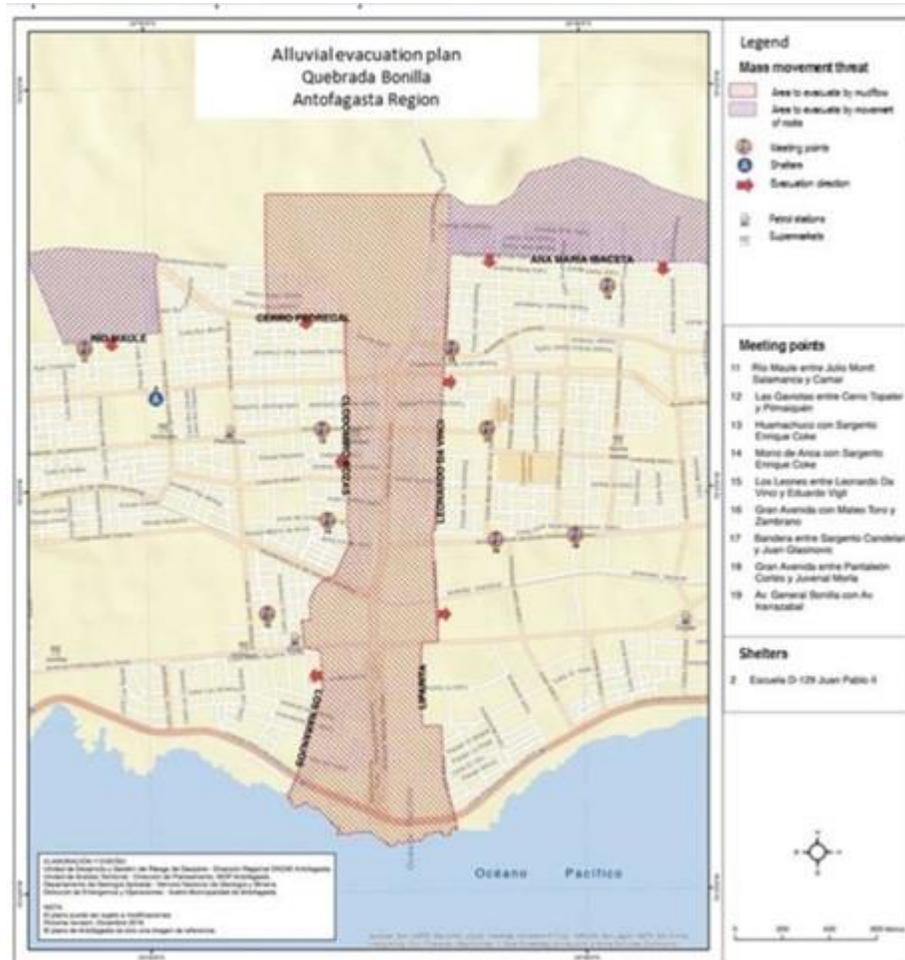
De acuerdo al Plan Regulador Intercomunal Borde Costero de la Región de Antofagasta (PRIBCA) vigente desde el año 2004, la parte de la quebrada Bonilla fuera del límite urbano definido en el PRC de la ciudad se encuentra en la zona ZPIP, la que se describe como zona con componentes paisajísticos naturales, capaces de generar polos de atracción turística.

5.5.3. Plan de Emergencia de la ONEMI

La ONEMI elaboró el año 2017 un plan de emergencia para eventos de remoción en masa para la región de Antofagasta, cuyo objetivo fue entregar una estructura normalizada, lógica y razonada para responder ante un evento de remoción en masa y tomar decisiones de evacuación. En el plan se definen distintos niveles de alerta y activación de protocolos según la categoría de la emergencia, planteándose una zonificación de la amenaza, definiendo las zonas expuestas a la ocurrencia de estos desastres naturales.

Para la quebrada Bonilla se estableció la vía aluvional que se muestra en la Figura 5.6 donde se ha identificado con el polígono rojo el área a evacuar a causa de los flujos detríticos. Además, el organismo identifica una población de 12.840 habitantes viven dentro del área de riesgo de flujo de lodo, por lo que disminuir el riesgo asociado al paso de crecidas aluvionales en esta área conllevaría un beneficio directo en cuanto a seguridad para esas personas.

Figura 5.6 Área de riesgo de flujo de lodo en quebrada Bonilla



5.5.4. Análisis de la situación actual y futura con proyecto

Como se ha señalado anteriormente, en el área de estudio existen actualmente actividades de índole minero y en construcción la subestación eléctrica Guardiamarina.

Durante la visita a terreno realizada durante el mes de septiembre (Anexo II “Reconocimiento de terreno”), se observó que no hay construcciones de viviendas ni campamentos establecidos, a excepción de un par de rucos.

En el futuro esta condición debiera mantenerse a menos que se modifique el Plan Regulador Comunal de Antofagasta y cambie la zonificación actual de “no habitable” (Zona E-10 en la Figura 5.5).

5.6. REVISIÓN Y ANÁLISIS CRÍTICO DEL PROYECTO DOH - EWI & AC (2000)

El detalle en extenso de la revisión crítica del proyecto se incluye dentro del Anexo I “Revisión y análisis crítico del proyecto EWI – AC Ingenieros Consultores”.

5.6.1. Parámetros y resultados de diseño

a) Periodo de retorno

El estudio adoptó un periodo de retorno de 50 años para el dimensionamiento de las obras el cual se obtuvo a partir de un análisis técnico-económico que consideró los criterios y metodología que recomendaba MIDEPLAN (MIDSO) para el análisis de la inversión pública en proyectos de defensas fluviales o control de crecidas e inundaciones.

b) Caudales de diseño:

El caudal total líquido de la quebrada Bonilla es 7,7 m³/s, 3,9 m³/s para brazo norte y 3,8 m³/s brazo sur.

Estos valores fueron obtenidos aplicando la Fórmula Racional para una lluvia de intensidad media de 8,2 mm/hora de 3 horas de duración.

El caudal total detrítico de la quebrada Bonilla es 16,2 m³/s; para el brazo norte dicho caudal es 7,8 m³/s, en tanto para el brazo sur es de 8,4 m³/s. Estos valores se obtuvieron considerando concentraciones volumétricas de sólidos (CV)⁵ de 50% para el brazo norte y de 55 % para el brazo sur.

c) Volumen de detritos afluente

El aluvión de diseño de la quebrada Bonilla tiene un volumen del orden 140.000 m³ de detritos, de los cuales 67.000 m³ para el brazo norte y 72.000 m³ para el brazo sur.

d) Volumen de detritos efluente

Cada poza de decantación (con disposición en serie) retiene un 70% de sólidos y un 30% de agua, con lo que se consigue que la concentración de salida de sólidos del flujo efluente no supere el 15%.

Se determinó que para el brazo norte se debe embalsar el 64% del volumen total de detritos, y para el brazo sur el 73%.

Además, se determinó que el caudal máximo de detritos efluentes es 4,6 m³/s, con un volumen aproximado de 44.000 m³.

e) Muros reductores de pendiente

El proyecto estableció de manera conservadora una pendiente horizontal para la separación entre muros consecutivos, obteniéndose una altura de muro máxima entre 3 y 3,5 m medidos desde el fondo del cauce, con un ancho de coronamiento de 30 a 35 cm.

⁵ Valores obtenidos del Estudio "Diseño de Sistemas Alternativos de Disipación de Energía en las Quebradas de Antofagasta" – EWI (Electrowatt Ingenieros consultores (Chile) S.A.) – 1995.

f) Muros de tierra y pozas de decantación

Se diseñaron excavadas en el terreno natural y con un pretil compactado de manera de aumentar la capacidad de almacenamiento, acorde con el requerimiento de volumen total de detritos a retener aguas abajo de la poza considerando:

- Altura máxima de rellenos de 2,5 m.
- Vertedero con revancha de 0,5 m.
- Rápido de descarga con altura normal y revancha de 0,50 m incluyendo huelga para ondas rodantes.
- Enrocado de protección en doble capa en pretil en talud de aguas arriba.
- Enrocado de doble capa al pie del rápido.
- Diente de aguas abajo.

g) Canal colector de sección rectangular en base a pavimento asfáltico u hormigón proyectado, con los siguientes caudales de diseño:

- Colector individual brazo norte: 2,2 m³/s.
- Colector individual brazo sur: 2,4 m³/s.
- Colector unificado quebrada Bonilla: 4,6 m³/s.

5.6.2. Análisis crítico del proyecto

a) Contexto y alcance

Considerando que han transcurrido más de 20 años desde que el proyecto de obras de control aluvional de la Quebrada Bonilla, fue realizado y aprobado, es natural que en la actualidad se disponga de mayor conocimiento y experiencia acerca de este tipo de obras, como también que hayan ocurrido cambios significativos en la morfología de ciertos tramos de la quebrada.

Dentro de ese contexto, se efectuó un análisis crítico de las principales consideraciones, criterios y parámetros de diseño empleados en dicho proyecto con el propósito de establecer cuáles de ellos podrían requerir ajustes u optimizaciones de acuerdo a los nuevos antecedentes recopilados y en especial, de las condiciones actuales de la quebrada Bonilla.

b) Periodo de retorno

En primer lugar destaca que el proyecto fue desarrollado para un periodo de retorno de $T= 50$ años sin variable de cambio climático.

Dado que el objeto de la presente asesoría es diseñar obras para un periodo de retorno que maximice los beneficios del proyecto, incluyendo la variable de cambio climático y los cambios que ha experimentado el

entorno urbano de la quebrada, esto implica que los caudales máximos líquidos y detritos pueden requerir ser recalculados.

5.6.2.1. Caudal y volumen de detritos

Sin duda una de las variables fundamentales del diseño corresponde al volumen de detritos del aluvión de diseño, el cual depende del caudal máximo líquido y de la concentración volumétrica de sólidos.

En el proyecto se consideró un valor constante de 50 % para el brazo norte y 55%, para el brazo sur.

En estricto rigor este valor no es constante y solo se tendrá un peak de concentración, asociado al peak del hidrograma, ya que la capacidad de arrastre de material de los cauces depende también del caudal líquido de la crecida.

De manera similar en el proyecto se consideró un valor constante de 15% para el flujo efluente del sistema de barreras y pozas, teniendo presente que en el dimensionamiento de las pozas se usó un criterio altamente conservador al suponer que las barreras estabilizadoras de pendiente no serían eficaces en detener el flujo aluvional, no obstante que el aterramiento que genera su presencia disminuye la capacidad de arrastre de sólidos a un mínimo, haciendo que solo las fracciones finas del sedimento puedan ser acarreadas hacia aguas abajo del tramo intervenido por ellas.

c) Muros reductores de pendiente

Tanto en el brazo norte como en el brazo sur de la quebrada Bonilla se proyectaron muros reductores de pendiente, en los cauces afluentes aguas arriba de los respectivos conos de deyección.

Como criterio conservador se supuso una pendiente horizontal del depósito detrítico, con lo cual se obtiene una separación menor entre muros, aumentando la cantidad de muros dentro del tramo intervenido.

En los hechos, los detritos no se acumulan de manera horizontal sino que responden a una pendiente crítica de arrastre o condición de transporte incipiente, asociada al tamaño de acorazamiento del sedimento si es de granulometría gruesa y extendida, como ocurre en los lechos areno-gravosos de estos dos brazos.

Por otro lado, los propios conos generan una reducción de la capacidad de arrastre de sólidos por cuanto en ellos el flujo se expande lateralmente produciendo menores alturas, velocidades y esfuerzos de corte sobre el lecho, además de experimentar éste y al mismo tiempo que escurre el aluvión, un acorazamiento que aumenta las pérdidas de carga por conformarse una superficie más rugosa e irregular, que se constituye en un factor adicional de reducción de la capacidad de arrastre.

Al incorporar estas consideraciones al diseño, se podrán construir menos muros y/o más distanciados lo cual implicará en una disminución de costos, e incluso reducir la longitud de ciertos tramos intervenidos en los cauces afluentes superiores de ambos brazos.

Por otro lado, en el brazo norte se consultó la construcción de este mismo tipo de muros aguas abajo de las pozas de decantación. En la actualidad el tramo intervenido presenta un cauce arenoso que a partir de un cierto punto (a medida que se avanza hacia aguas abajo) horadado en un lecho de arena cementada.

A simple vista se aprecia que dicho cauce presenta características de lecho fijo y manifiestamente resistente a la erosión de una crecida específica, donde no sería necesario ni conveniente usar muros reductores de pendiente, ya que éstos se emplean para estabilizar cauces de lecho móvil.

d) Pozas de decantación

El proyecto original consideró para la construcción de las pozas de decantación que estas se harían preferentemente en terreno a excavar, y con una restricción de diseño para los rellenos compactados de 2,5 m de altura máxima, para la elaboración de los pretilos.

Dado que, en la actualidad las condiciones topográficas del área de estudio han cambiado significativamente, la utilización de las hondonadas existentes en el área permitirá disminuir las excavaciones y por ende, reducir costos asociados al movimiento de tierra.

e) Canales colectores

Para el brazo norte de la quebrada Bonilla el proyecto original consideró muros reductores de pendiente (M-BON-13 a M-BON-1), los cuales tienen un ancho promedio de 14,2 m.

Por lo comentado anteriormente, de manera preliminar, se estima que la construcción de canales que incorporen alguna obra de disipación local de energía (por ejemplo, gradas), en caso de que las velocidades sean altas, podría ser más conveniente técnica y económicamente como alternativa a los muros reductores de pendiente del proyecto original.

f) Métodos de cálculo

En general, los métodos de cálculo empleados se ajustan plenamente a las prácticas de la ingeniería actual ya que la mayoría de las fórmulas siguen siendo válidas.

Es posible que en el uso de algunos parámetros de cálculo, sea conveniente efectuar algún análisis de sensibilidad para analizar con más fundamento el uso de éstos en el diseño.

6. ESTUDIO GEOLÓGICO

En este capítulo se describe sintéticamente el estudio geológico llevado a cabo que se detalla en el Anexo III "Geología" del presente informe, el cual resume la información recopilada entre ella:

- Geología Regional
- Geología Local
- Geología Estructural
- Geomorfología

- Prospecciones previas
- Visita a Terreno
- Peligros Geológicos

En este estudio se profundiza el análisis de estos temas, particularmente lo referente a la geología local identificando las principales formaciones geológicas que se presentan en la quebrada Bonilla, lo cual se resume en planos geológicos para ambos brazos de la quebrada.

Además, se aborda la Geología Estructural y Geomorfología de Antofagasta.

También se analizan los peligros geológicos, dentro los cuales los relevantes en la quebrada Bonilla son los de movimiento en masa.

Finalmente se describe la información de prospecciones y estratigrafías de los suelos de ambos brazos de la quebrada.

Complementa este análisis el mapa geológico elaborado que se incluye en el Anexo III “Geología”.

6.1. GEOLOGÍA LOCAL

Centrándose en el sector en estudio, según lo mapeado por SERNAGEOMIN, las quebradas deberían coincidir con la unidad geológica de la Formación La Negra y en las zonas bajas del escarpe costero cubren diferentes depósitos como los marinos, aluvionales y coluviales antiguos, eólicos y aluvionales y coluviales modernos, lo cual ha sido corroborado con la visita a terreno.

6.1.1. Formación La Negra

Se caracteriza por la presencia de rocas volcánicas principalmente correspondientes a andesitas de piroxeno, en menor medida basaltos de olivino, las cuales presentan variedades texturales cómo: porfídicas, afaníticas, amigdaloidales y brechosas.

Presenta intercalaciones de areniscas rojas, brechas sedimentarias y conglomerados brechosos.

Esta unidad es intruida por diferentes cuerpos plutónicos en el área de Mantos de Vara y es cubierta por diferentes depósitos en la zona occidental.

Las Figura 6.1 y Figura 6.2 muestran fotos de terreno que ilustran esta formación.

Figura 6.1 Afloramientos Formación La Negra – Quebrada Bonilla Norte

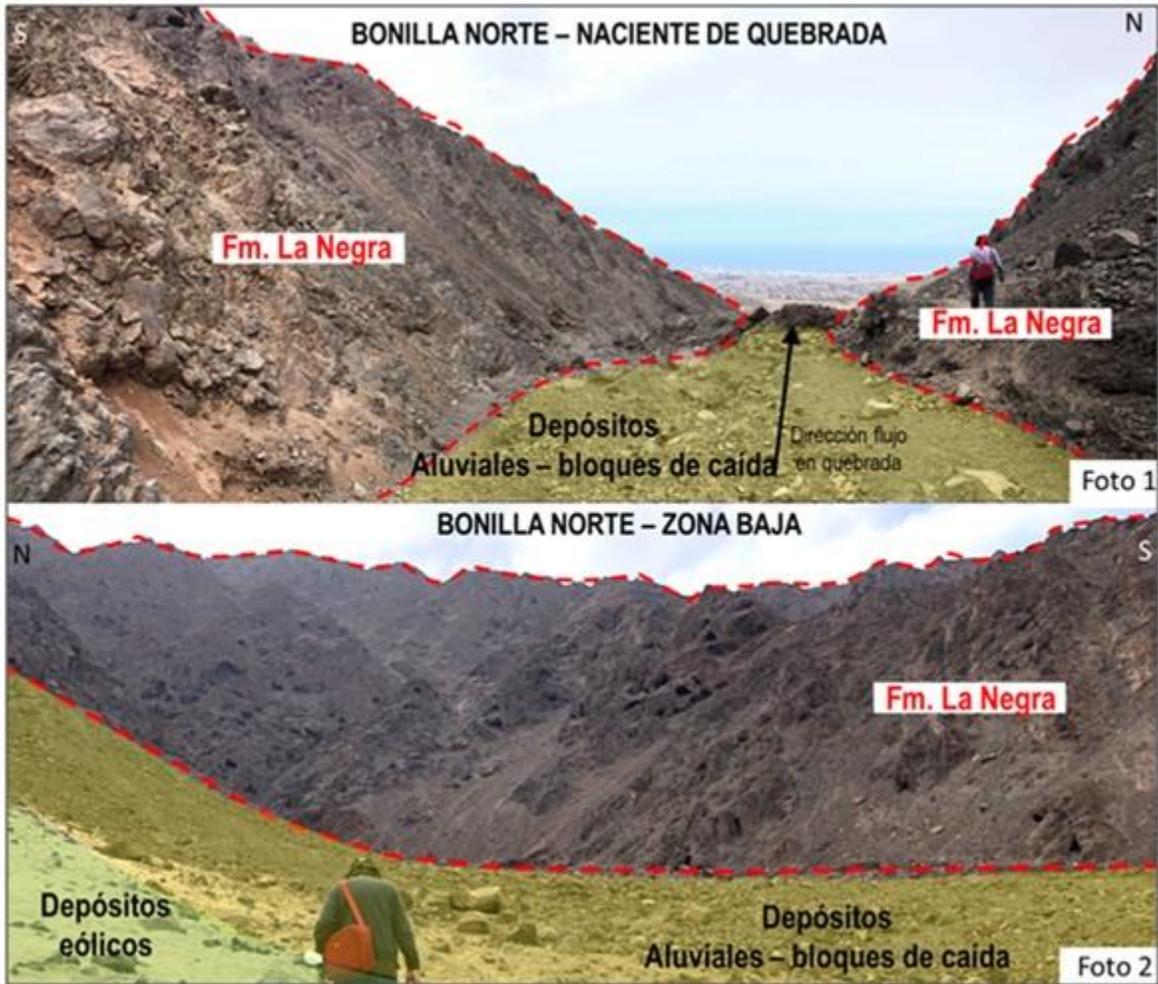


Figura 6.2 Afloramientos Formación La Negra – Quebrada Bonilla Sur



6.1.2. Depósitos aluvionales y coluviales antiguos

Esta unidad se caracteriza por depósitos sedimentarios continentales constituidos principalmente por gravas y arenas.

Representan antiguos conos coluviales o abanicos aluviales de baja pendiente, que se encuentran seccionados por los cauces de las quebradas actuales o parcialmente cubiertos por los depósitos aluviales cuaternarios.

Son originados por flujos gravitacionales o por corrientes de barro, están constituidos por bloques, gravas, arenas y limos, con intercalaciones menores de ceniza volcánica retrabajada. Se presentan en parte mal estratificados, semiconsolidados y parcialmente cementados por cloruros (halita) y sulfatos (anhidrita y yeso).

Estos depósitos, de hasta 50 m de potencia, rellenan cuencas intramontanas de la Cordillera de la Costa.

6.1.3. Depósitos eólicos inactivos

Corresponden a depósitos eólicos semiconsolidados que tienen gran cantidad de fragmentos bioclásticos aportados desde la zona litoral.

Estos depósitos afloran en la vertiente occidental de la Cordillera de la Costa, donde forman cuerpos que alcanzan un espesor máximo de 5 m.

6.1.4. Depósitos eólicos activos

Son depósitos no consolidados de arenas finas a medias, muy bien seleccionadas, de color pardo claro a amarillo, que ocupan principalmente la vertiente occidental de los cordones montañosos más prominentes de la Cordillera de la Costa.

En algunos sectores, se presentan interestratificados con los depósitos aluviales modernos, con los que forman cuerpos de hasta 5 m de espesor.

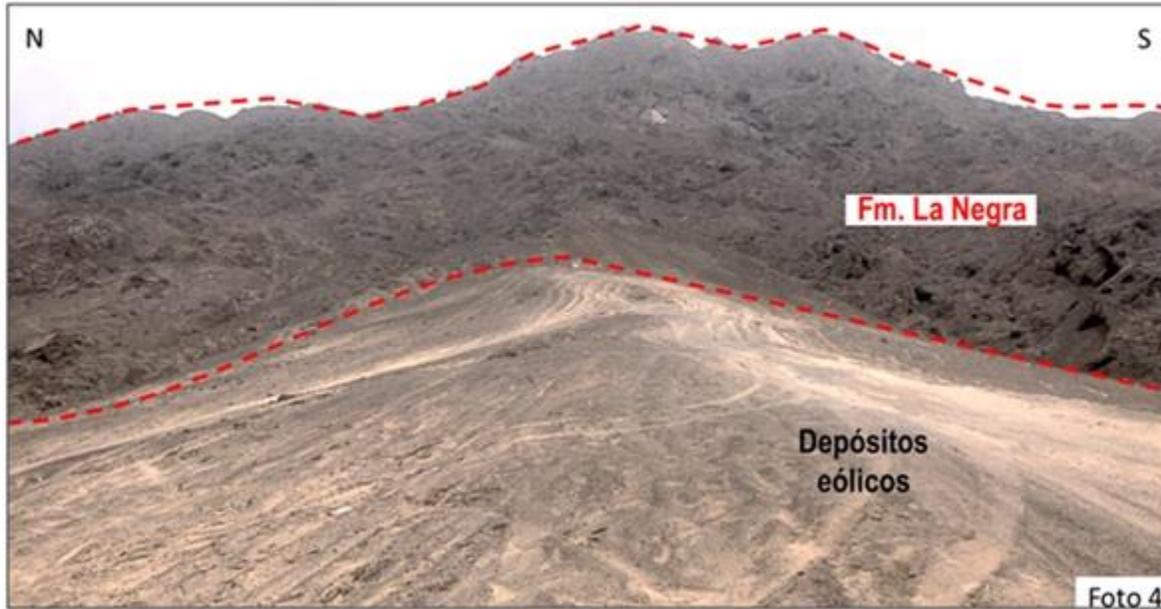
Tomando en consideración que gran parte de las acumulaciones eólicas están aún en proceso de formación, se les asigna al Holoceno.

La foto de la Figura 6.1 ilustra la presencia de este tipo de depósito en el brazo norte de la quebrada Bonilla

6.1.5. Depósitos aluvionales y coluviales modernos

Se refieren a depósitos no consolidados de gravas y arenas de composición variada (polimíctica) y monomíctica que contienen intercalaciones lenticulares de arcillas y limos.

Figura 6.3 Duna a los pies de Formación La Negra – Quebrada Bonilla Norte

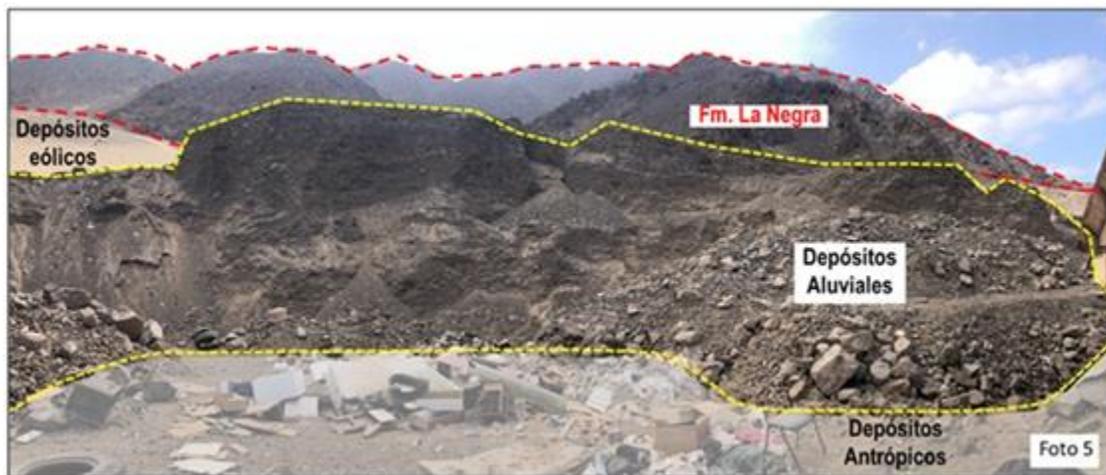


Constituyen el relleno actual de las quebradas en cuyas desembocaduras conforman sistemas de abanicos aluviales coalescentes.

Su origen está ligado a flujos intermitentes de agua, generados durante lluvias intensas.

Debido a que estos depósitos se encuentran aún en formación, se estima que su edad se restringe al lapso pleistoceno tardío-holoceno.

Figura 6.4 Corte en cono de depósitos aluviales – Quebrada Bonilla Norte



6.1.6. Depósitos antrópicos

Estos depósitos no han sido incluidos dentro de la Carta Geológica Antofagasta – Punta Tetras, pero son necesarios de mapear e incluir tras la visita al terreno.

Estos abarcan desde rellenos artificiales a residuos domiciliarios e industriales. Se observan residuos domiciliarios sólidos, principalmente, en las quebradas, aledaño a los sectores urbanos y en los bordes de los caminos secundarios.

6.2. PLANOS GEOLÓGICOS.

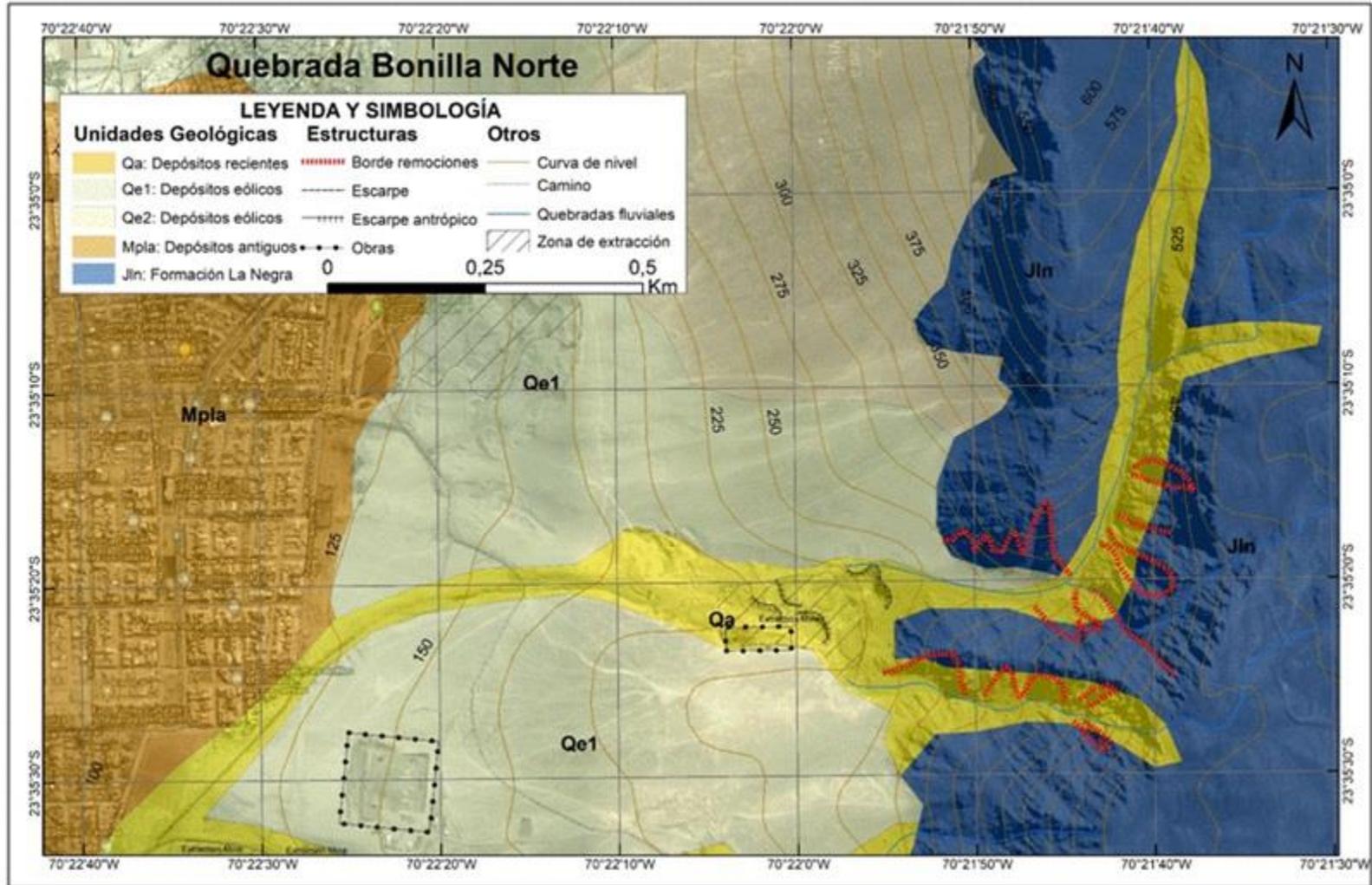
En la Figura 6.5 se presenta el plano geológico local de la Quebrada Bonilla Norte y en la Figura 6.6 el de la Quebrada Bonilla Sur.

6.3. GEOLOGÍA ESTRUCTURAL Y GEOMORFOLOGÍA

En la Cordillera de la Costa, la estructura dominante está dada por el Sistema de Fallas de Atacama, en su segmento Salar del Carmen, de dirección norte-sur. Las estructuras pertenecientes al Sistema de Fallas de Atacama, tales como las fallas Bolfin, Caleta Coloso y Salar del Carmen, segmentan la Cordillera de la Costa en bloques tectónicos de orientación submeridiana. Estrías subhorizontales y desplazamientos de contactos litológicos evidencian que las fallas tienen un carácter de tipo transcurrente sinistral, con desplazamientos medibles en magnitudes kilométricas (hasta 4 km).

A lo largo del borde oriental de la Cordillera de la Costa, es posible observar que la Falla Salar del Carmen ha experimentado una reactivación de tipo normal, marcada por conspicuos escarpes que afectan los depósitos aluviales y coluviales antiguos. La ciudad de Antofagasta se caracteriza por una fuerte influencia tectónica que ha producido variados alzamientos y hundimientos del terreno, asociados a regresiones y transgresiones marinas, las cuales han quedado evidenciadas en los distintos depósitos sedimentarios presentes.

Figura 6.5 Geología Local – Bonilla Norte



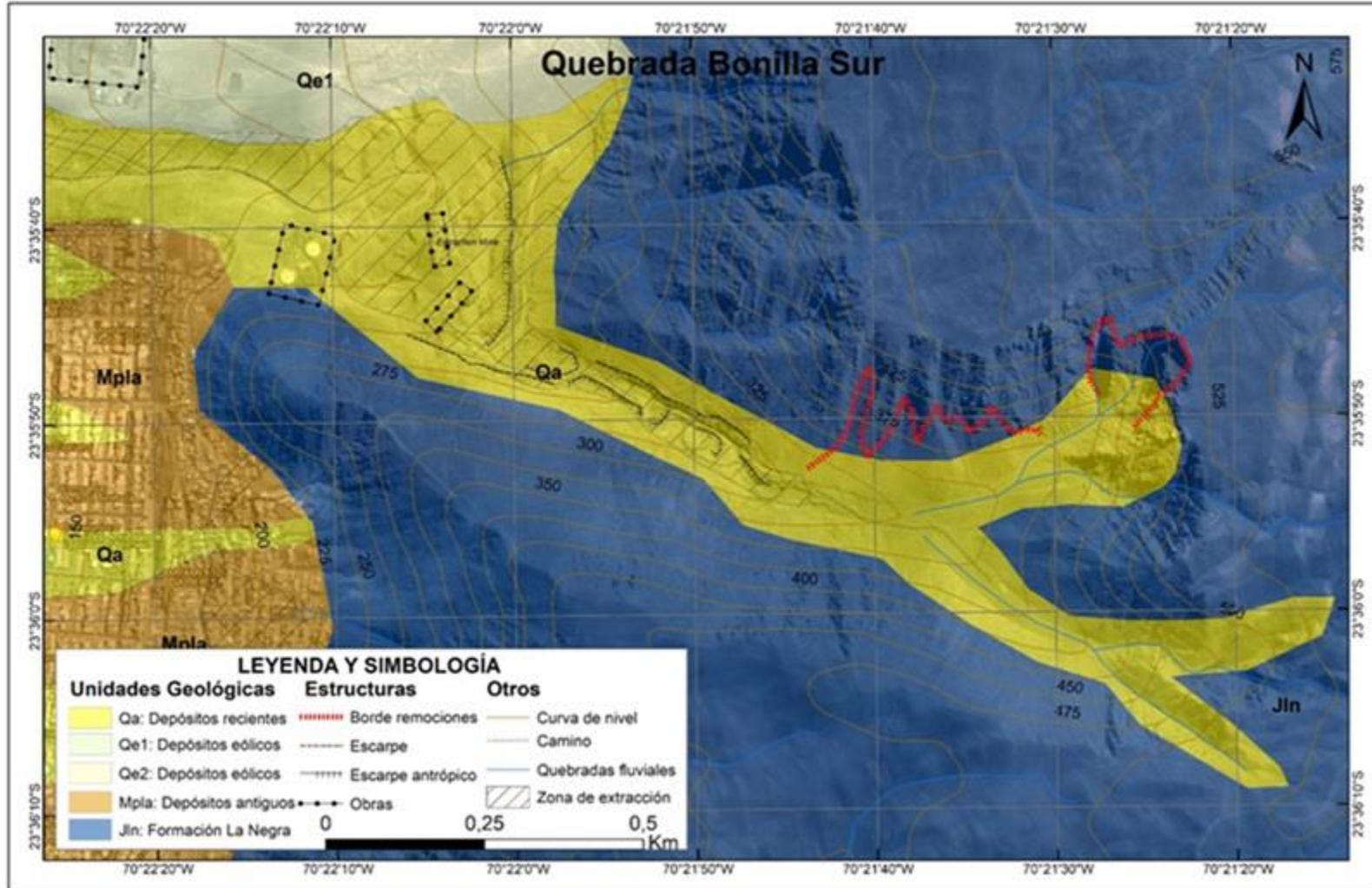
ACTUALIZACIÓN DE DISEÑO DE OBRAS DE CONTROL ALUVIONAL EN QUEBRADA BONILLA, ANTOFAGASTA

APRISA - AC INGENIEROS CONSULTORES LTDA.

Informe Final - Rev.0 Dic. 2022

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

Figura 6.6 Geología Local – Bonilla Sur



ACTUALIZACIÓN DE DISEÑO DE OBRAS DE CONTROL ALUVIONAL EN QUEBRADA BONILLA, ANTOFAGASTA

APRISA - AC INGENIEROS CONSULTORES LTDA.

Informe Final - Rev.0 Dic. 2022

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

La geomorfología de Antofagasta se caracteriza por la Cordillera de la Costa en dirección N-S, que en su flanco occidental desarrolla el Escarpe Costero, el cual genera un desnivel de cerca de 300 msnm que da paso a la Planicie Costera, de pendiente suave, que son diferentes niveles de terrazas de abrasión, donde se asienta la ciudad.

Estos tres dominios geomorfológicos, son las que modelan la ciudad de Antofagasta. La Planicie Costera se extiende de norte a sur en la ciudad de Antofagasta, va desde el nivel del mar hasta alturas cercanas a los 200-250 msnm., cuya pendiente promedio es cercana a 5°, presentando un ancho máximo aproximado de 4 km en la zona norte del área de estudio, y un ancho mínimo, de orden métrico, en la zona sur del área de estudio, en el sector de Caleta Coloso. En el sector del centro de la ciudad de Antofagasta, presenta un ancho aproximado de 2 km.

Como se mencionó, esta geoforma está comprendida por una serie de superficies escalonadas, que corresponden a terrazas de abrasión marina, elongadas en dirección general N-S, sobre las cuales se disponen diversos abanicos aluviales.

El Escarpe Costero, que marca la topografía de la ciudad y funciona como límite natural de la zona urbana por el sector oriente, es también el límite oriental de la planicie costera, con una pendiente que oscila entre 20 a 45 grados, generalmente, cuando las pendientes son menores es por la cobertura de depósitos aluviales sedimentados sobre este, alcanzando alturas entre 400 a 700 msnm.

Por último, la Cordillera de la Costa es una cadena montañosa, que en el área de estudio presenta un ancho variable entre 4 y 11 km y alcanza alturas de hasta 2.000 msnm. Hacia el occidente, limita con el escarpe costero y hacia el oriente limita, fuera del área de estudio, con la Depresión Intermedia, límite que está determinado por la Falla Salar del Carmen.

6.4. PELIGRO DE REMOCIONES EN MASA

6.4.1. Flujo de detritos

Conocidos comúnmente como aluviones, corresponden a flujos locales repentinos, o torrentes de volumen relativamente grande y de corta duración. Estos desbordan los cauces en valles secos, debido a que transportan una enorme carga de barro y fragmentos rocosos, generalmente vinculados a lluvias de corta duración y gran intensidad.

Debido a sus características geomorfológicas ya expuestas, el escarpe y la planicie costera, junto con las esporádicas lluvias y la alta disponibilidad de material movilizable (arena, rocas, suelo y residuos domiciliarios) en las cuencas hidrográficas, incrementan la posibilidad de ocurrencia de flujos de detritos.

Sin embargo, existen otros factores que, eventualmente, intensifican el fenómeno, como son el fuerte aumento de pendiente de las quebradas, asociado al escarpe costero, lo que imprime mayor energía a los flujos antes de la depositación en los abanicos aluviales de la franja costera; y el intenso fracturamiento, y la desfavorable posición espacial, con un fuerte manto al oeste, de los estratos de la Formación La

Negra, lo que contribuye a potenciar la generación de bloques rocosos de gran tamaño y su susceptibilidad de desplazamiento a favor de la pendiente.

Cabe mencionar que la diferencia de tipo y granulometría del material disponible para moverse, tanto en las cuencas como en las zonas altas de la planicie costera, condiciona su intensidad, generando flujos de mayor o menor poder destructivo. Dichas diferencias en la composición granulométrica de los depósitos generados y en el consecuente impacto del material movilizado, se puede observar entre las quebradas Farellones y El Toro, ubicadas en el sector central de la ciudad, donde los flujos movilizan detritos más gruesos y con menor porcentaje de matriz, lo cual les confiere un mayor poder destructivo, y la quebrada El Huáscar, ubicada en el sector sur de la ciudad, donde los detritos son de tamaño medio a fino, con mayor porcentaje de matriz y menor poder destructivo.

6.4.2. Caída de rocas

La caída de rocas corresponde a un tipo de remoción en masa en el cual uno o varios bloques de suelo o roca, se desprenden de una ladera. Una vez desprendido, el material cae desplazándose principalmente por el aire, pudiendo efectuar golpes, rebotes y rodamiento. En el área de estudio, las caídas de rocas se generan, principalmente, en la zona del escarpe costero, el que presenta altas elevaciones y pendientes. Los principales factores condicionantes corresponden al grado de fracturamiento y meteorización de la roca, y al alta pendiente.

Cabe mencionar que durante el sismo de Mw 8,0 del 30 de julio de 1995, se registraron desprendimientos de bloques rocosos de aproximadamente 200 m³, así como deslizamientos relacionados con la aparición de numerosas grietas. Esto evidencia el significativo aumento del peligro de caída de rocas durante la ocurrencia de sismos de gran magnitud en este sector.

6.4.3. Deslizamientos

Es un movimiento ladero abajo de una masa de suelo o roca, cuyo desplazamiento ocurre generalmente a lo largo de una superficie de falla.

Se han registrado eventos rotacionales, estos son un tipo de deslizamiento en el cual la masa se mueve a lo largo de una superficie de falla curva y cóncava.

Los movimientos en masa rotacionales muestran una morfología distintiva caracterizada por un escarpe principal pronunciado y un contrapendiente de la superficie de la cabeza del deslizamiento hacia el escarpe principal.

En las Figura 6.7 y Figura 6.8 se pueden observar las zonas mapeadas para peligro geológicos identificadas en terrenos.

Figura 6.7 Mapeo de zonas de peligro geológico - Bonilla Norte

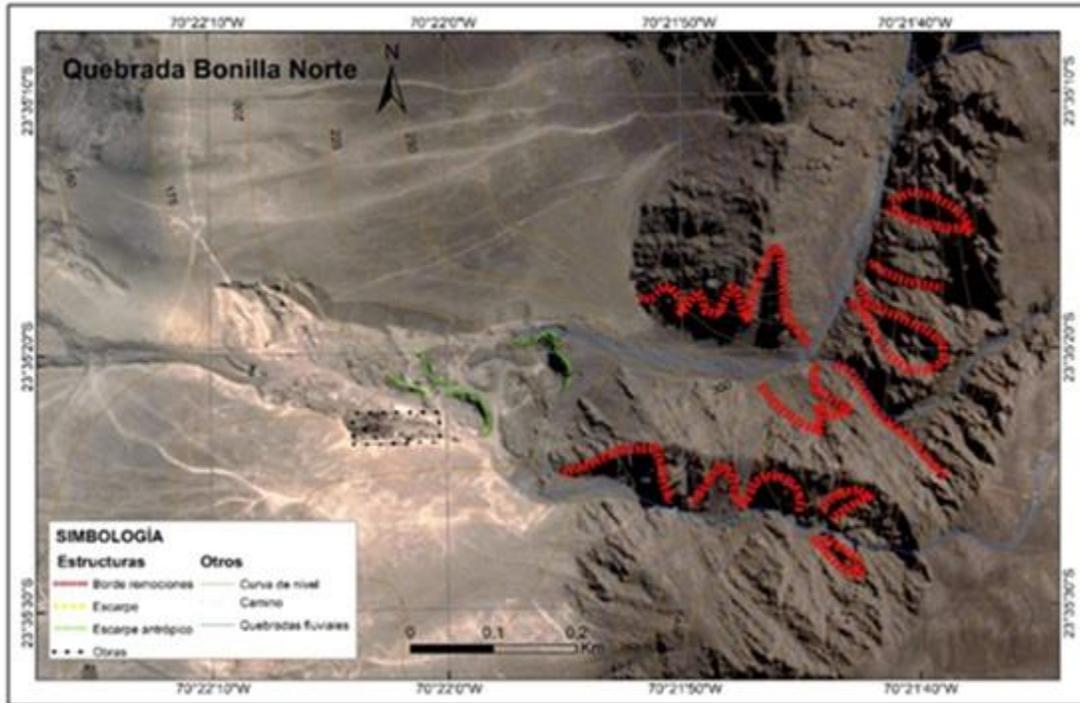
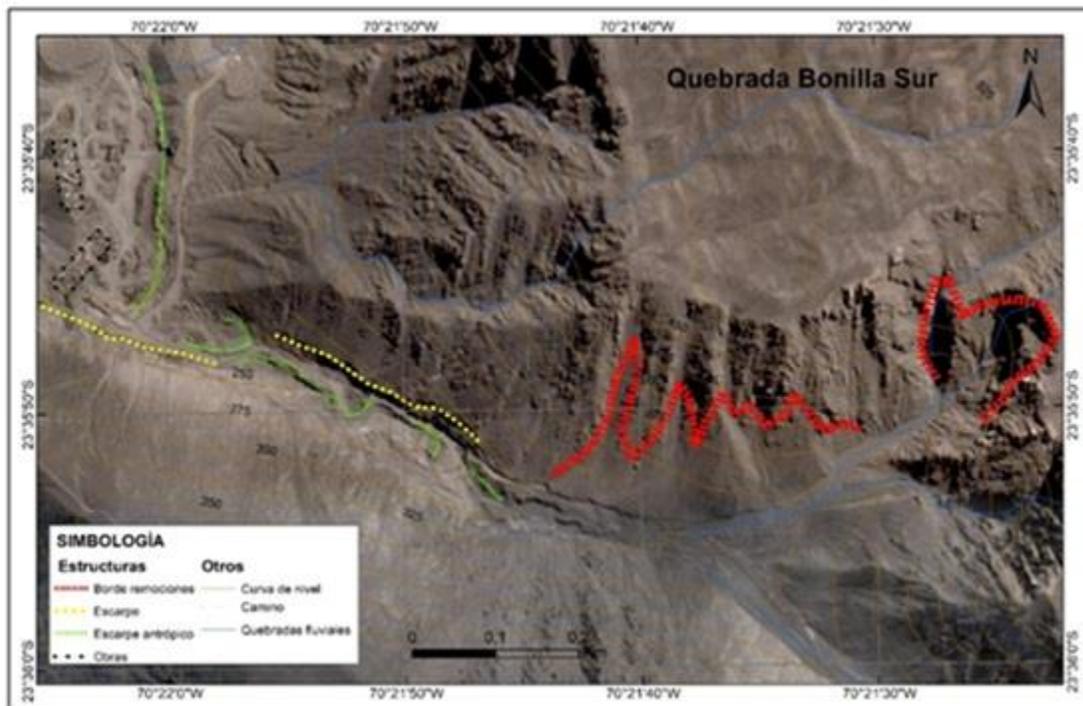


Figura 6.8 Mapeo de zonas de peligro geológico - Bonilla Sur



En Bonilla Norte se aprecia gran cantidad de conos en los flancos de la quebrada en la zona naciente, donde la quebrada es encajonada por la Formación La Negra.

A continuación, en el sector medio de la quebrada existen escarpes antrópicos, generados por la extracción de áridos en la zona los cuales aterrazan la quebrada, disminuyendo el avance de posibles flujos provenientes de la naciente de la quebrada.

En tanto, para Bonilla Sur, se tiene que en las nacientes de la quebrada existen zonas de conos que llegan a la quebrada, principalmente por el flanco norte de la quebrada, siendo los que se aprecian más activos y con mayor cantidad de material suelto en superficie, siendo capaces de entregar gran aporte de material a la quebrada bajo ciertas circunstancias, por ejemplo, lluvias.

Además, en el sector medio de la quebrada se aprecian escarpes, tanto naturales como antrópicos. Los naturales se concentran en el flanco sur de la quebrada, teniendo un gran corte.

En tanto, los antrópicos son propios de la extracción de áridos, al igual que en Quebrada Norte, estos aterrazan la quebrada, lo cual puede ser un aporte al momento de existir un aluvión, ya que disminuiría la velocidad del flujo

7. LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO

El objetivo de este capítulo es entregar los antecedentes, criterios y resultados de las mediciones topográficas realizadas en el contexto de los objetivos planteados en este estudio.

Previo al inicio de los trabajos se elaboró una propuesta metodológica la cual detallaba los sectores a levantar, equipo a emplear y otras consideraciones del trabajo. En base a esta propuesta se ejecutaron los levantamientos topográficos.

Los trabajos fueron desarrollados durante el periodo noviembre - diciembre del año 2021 (levantamientos topográficos) y septiembre 2022 (replanteos).

Cabe señalar que los trabajos se efectuaron según se establece en el documento "Especificaciones Técnicas Topográficas", (ETT-DOH, 2011), y en el documento denominado "Topografía Aplicada para Diseño de Obras de Defensas Fluviales", de la Dirección de Obras Hidráulicas del MOP.

Todos los detalles, así como el Informe topográfico, los anexos, planos y archivos digitales de respaldo se incluyen en el Anexo V "Trabajos topográficos" del presente informe.

7.1. ALCANCE DE LOS TRABAJOS

Se realizaron los siguientes levantamientos:

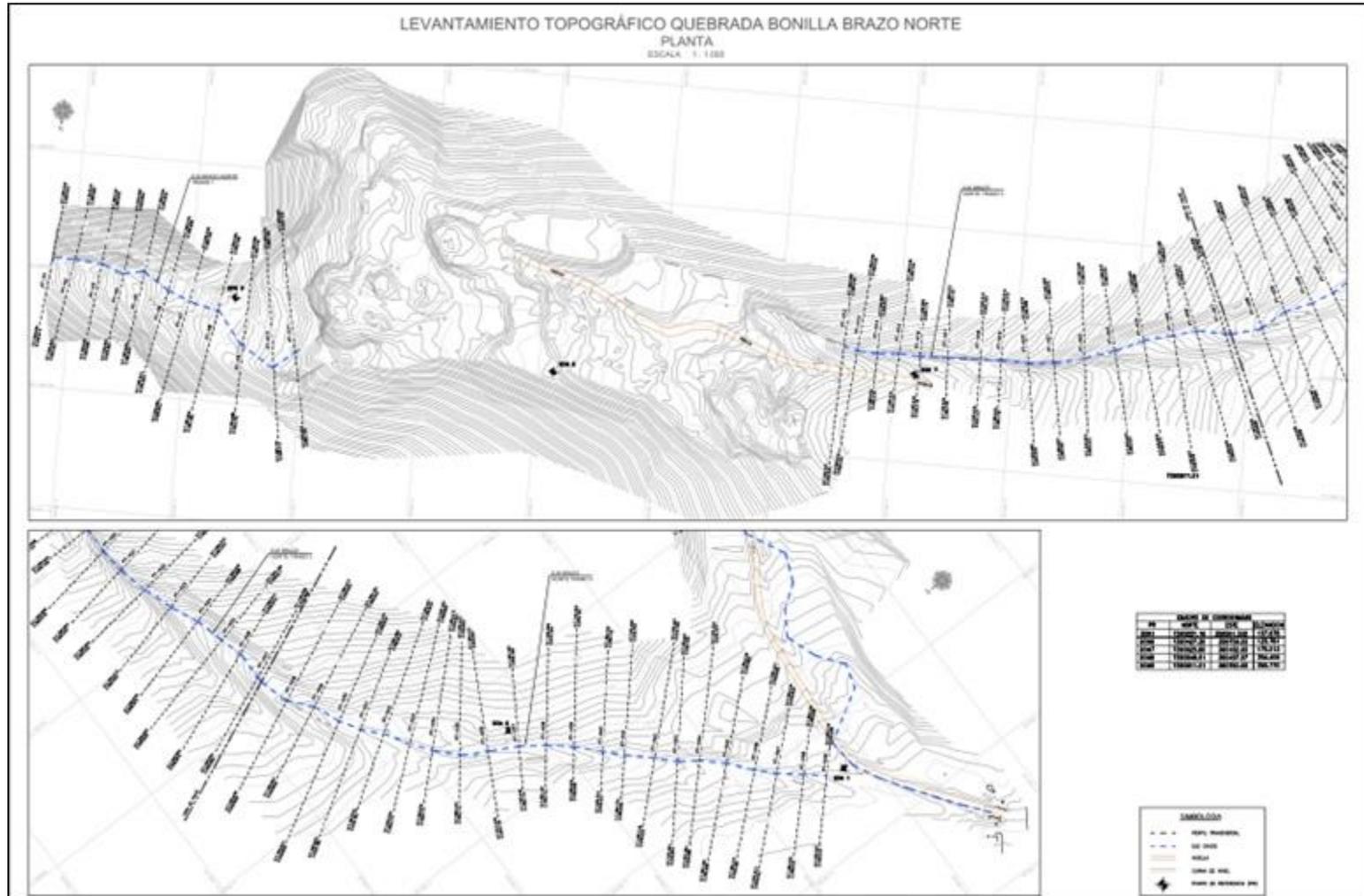
- Levantamiento de perfiles transversales cada 25 m aproximadamente y en las mismas ubicaciones de los perfiles levantados en el proyecto EWI & AC Ingenieros Consultores (2000) en la parte alta y baja de los brazos norte y sur de la quebrada Bonilla.

- En el brazo norte se levantaron 11 perfiles en el tramo bajo y medio (Tramo 1) a partir de la junta con el brazo sur, con una longitud del cauce de 245,9 m y 38 perfiles en el tramo alto, aguas arriba del cono de deyección (Tramo 3), abarcando 827,1 m.
- En el brazo sur se levantaron 28 perfiles en el tramo bajo y medio (Tramo 1) a partir del punto de descarga en la calle Nicolás Tirado del tramo común de ambos brazos, con una longitud del cauce de 618,0 y 35 perfiles en el tramo alto, aguas arriba del cono de deyección (Tramo 3), abarcando 869,7 m.
- Levantamiento topográfico de detalle escala 1:500 en las áreas intervenidas por las actividades mineras. Este levantamiento permite determinar volúmenes de almacenamiento disponibles en hondonadas dejadas por la extracción así como identificar aéreas de botaderos. Longitud aproximada del cauce a levantar 950 m. El área total que se propone levantar 9,5 ha en brazo norte y 14 ha en brazo sur, totalizando es 23,5 ha.
- Topografía de detalle escala 1:100 desde confluencia canales colectores unitarios norte y sur hasta descarga en Avenida Nicolás Tirado, donde se propone construir un dissipador de energía. Longitud aproximada del cauce a levantar 40 m abarcando un área aproximada de 2200 m².
- Toma de puntos topográficos en las calicatas prospectadas (Anexo IV “Mecánica de Suelos y Geotecnia”).
- Replanteo de los vértices de los ejes principales del proyecto definitivo, tanto en el brazo norte como sur de la quebrada Bonilla.

En la Figura 7.1 se muestran las zonas del levantamiento de perfiles transversales a los cauces, en las mismas posiciones del levantamiento del proyecto 2000, y el tramo del sector de hondonadas y explanadas, que queda aguas abajo del cono de deyección de este brazo.

La Figura 7.2 ilustra el levantamiento análogo del brazo sur con perfiles coincidiendo en las posiciones de los del año 2000 y el tramo intermedio aguas abajo del cono de deyección de la quebrada.

Figura 7.1 Zona de levantamiento topográfico del brazo norte de la quebrada Bonilla



ACTUALIZACIÓN DE DISEÑO DE OBRAS DE CONTROL ALUVIONAL EN QUEBRADA BONILLA, ANTOFAGASTA

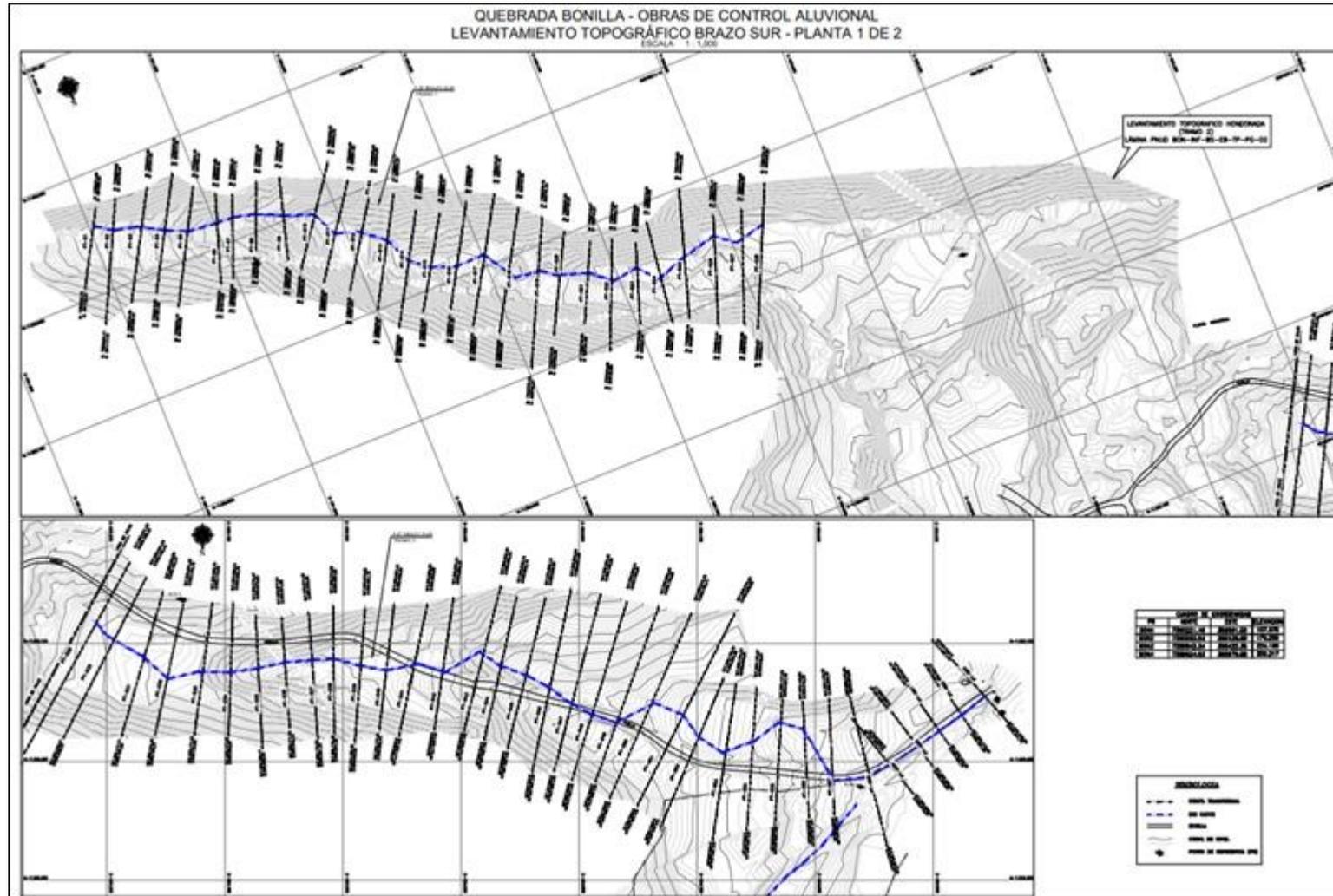
APRISA - AC INGENIEROS CONSULTORES LTDA.

Informe Final - Rev.0 Dic. 2022

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

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

Figura 7.2 Zona de levantamiento topográfico del brazo sur de la quebrada Bonilla



ACTUALIZACIÓN DE DISEÑO DE OBRAS DE CONTROL ALUVIONAL EN QUEBRADA BONILLA, ANTOFAGASTA

APRISA - AC INGENIEROS CONSULTORES LTDA.

Informe Final - Rev.0 Dic. 2022

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

7.2. CONFORMACIÓN DE RED DE PR'S

7.2.1. Red de PR's

Se conformó una red de 9 PR's para la realización de los trabajos topográficos en la quebrada Bonilla.

De estos PR's, 4 corresponden a monolitos existentes construidos durante el desarrollo del Proyecto DOH-EWI-AC (2000) y 5 fueron construidos específicamente para el presente estudio.

La Figura 7.3 muestra la ubicación de la red de PR's señalada.

Figura 7.3 Red de PR's quebrada Bonilla



7.2.2. PR's existentes

Durante la visita de reconocimiento del área de estudio (Anexo II "Reconocimiento de terreno") se pudo encontrar los siguientes 4 monolitos de PRs de un total de 7 del Proyecto DOH-EWI-AC (2000):

- Uno (1) común para ambos brazos (BON-1).
- Dos (2) en el brazo sur (BON-4 y BON-5).
- Uno (1) en el brazo norte (BON-6).

La Figura 7.4 incluye fotografías de los monolitos PR BON-5, BON-4, BON-1 y BON-6 (de derecha a izquierda, de arriba hacia abajo).

Figura 7.4 Fotografía de monolito de PRs existentes encontrados



7.2.3. Construcción de nuevos PR's

Se monumentaron 5 nuevos PRs, 4 de ellos mediante monolitos de concreto de 30 cm x 30 cm y 50 cm de profundidad con fierro estriado en el centro, y uno con placa metálica con perno central empotrada en roca.

Empleando de base las normas de la DOH Se construyeron los siguientes PRs: BON-2, BON-3, BON-7, BON-8 y BON-9.

La Figura 7.5 muestra fotografías de los monolitos construidos.

Figura 7.5 Fotografía de monolitos construidos



7.3. VINCULACIÓN GEODÉSICA Y POLIGONALES

7.3.1. Sistema de referencia y unidades

El sistema de unidades utilizado corresponde al Sistema Métrico Decimal.

El DATUM de referencia para el desarrollo de los trabajos topográficos fue el SIRGAS, en el sistema UTM, Huso 19 y el origen altimétrico corresponde al nivel medio del mar.

7.3.2. Vinculación al sistema sirgas

La vinculación planimétrica se realizó al vértice IGM denominado PMEJ, ubicado en Mejillones.

En base al vértice PMEJ y empleando los PR's BON-1, BON-9 y BON-5 se conformó la denominada Red Principal, generando los siguientes circuitos:

- Vinculación norte: punto PMEJ – BON-1 – BON-9
- Vinculación sur: punto PMEJ – BON-1 – BON-5

7.3.3. Poligonales

Se definieron 2 poligonales, una por cada brazo de la quebrada Bonilla, siendo su disposición el esquema propuesto de forma de poder controlar las precisiones de cierre de la poligonal geodésica, de forma de dar cumplimiento a lo establecido en Manual de Carreteras. Volumen 2.

La tolerancia para una poligonal GPS que parte en un vértice de una red mayor y cierra sobre otro vértice de una red de mayor orden es de 2PPM o 2mm por Km, lo que en razón es 1:500.000.

El proceso de ajuste realizado y tiene sentido cuando existe una red GPS, esto quiere decir, que hay vértices generados por varios vectores. Generalmente el ajuste se realiza por mínimos cuadrados y los resultados deben superar pruebas estadísticas como Chi-cuadrado o Tau.

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 permitan el control de precisión, es decir que los vectores observados posibiliten ecuaciones independientes.

Para el transporte de coordenadas mediante GNSS, se emplearon observaciones estáticas diferenciales de doble frecuencia.

Las poligonales de la red secundaria son las siguientes:

- Poligonal Norte: BON-1 – BON-6 – BON-7 – BON-8 – BON-9
- Poligonal Sur: BON-1 – BON-2 – BON-3 – BON-4 – BON-5

La configuración escogida tiene los vértices monumentados e intervisibles (PRS).

Finalmente, empleando el Software Topográfico Específico TRIMBLE BUSINESS CENTER, se determinaron las coordenadas UTM de cada PR. Para el traslado de coordenadas se utilizó Equipos GPS Marca TRIMBLE de doble frecuencia y GLONNAS, empleando el método estático con post proceso de vectores.

7.3.4. Cuadro de coordenadas

En base al procedimiento descrito en el acápite anterior se obtuvieron las coordenadas UTM de cada PR definido, las cuales se presentan en la Tabla 7.1.

Tabla 7.1 Cuadro de coordenadas

PR	Coordenada (UTM Huso 19)	
	Norte	Este
BON-1	7.390.221,16	359.561,50
BON-2	7.390.062,94	360.136,69
BON-3	7.389.842,34	360.422,35
BON-4	7.389.624,93	360.979,88
BON-5	7.389.516,04	361.314,34
BON-6	7.390.427,30	359.759,03

PR	Coordenada (UTM Huso 19)	
	Norte	Este
BON-7	7.390.625,80	360.182,63
BON-8	7.390.649,91	360.487,57
BON-9	7.390.611,01	360.760,63

7.3.5. Nivelación geométrica de PR's

Para obtener la referencia altimétrica del proyecto se realizó una Nivelación Geométrica de todos los PR's de la Tabla 7.2, basándose en los mismos circuitos de las poligonales de la red Secundaria antes definidas, es decir, BON-1 a BON-5 y BON-1 a BON-9.

Se utilizó la elevación de referencia de BON-1 obtenida del estudio de Vinculación.

El método de nivelación corresponde a Nivelación Corriente, según lo indicado en el punto 9 NIVELACION de las ETT-DOH.

Los resultados de la nivelación de PR's se presentan en detalle en el Anexo V "Trabajos topográficos" del presente informe.

Tabla 7.2 Nivelación de PR's

Poligonal	PR	Desnivel (m)	Elevación (m.s.n.m.)
Brazo norte	BON-1		107,678
	BON-6	16,103	123,781
	BON-7	46,232	170,012
	BON-8	34,393	204,405
	BON-9	46,364	250,768
Brazo sur	BON-1		107,678
	BON-2	68,640	176,318
	BON-3	48,037	224,355
	BON-4	76,070	300,425
	BON-5	55,721	356,146

7.4. LEVANTAMIENTOS

7.4.1. Levantamiento perfiles transversales y longitudinales

Se efectuó el levantamiento de perfiles transversales y longitudinales en ambos brazos de la quebrada Bonilla, aguas arriba y aguas abajo de los sectores de hondonadas que se mencionan en el siguiente acápite.

En total se levantaron 112 perfiles transversales distanciados en promedio a 23 m y con un ancho promedio de 112 m. La longitud de cauce levantada fue de 2.561 m.

Cabe señalar que para la ubicación de los perfiles transversales se consideró la misma ubicación o muy similar de los perfiles levantados en el proyecto EWI & AC Ingenieros Consultores (2000).

La Tabla 7.3 resume las principales características del levantamiento de perfiles realizado.

Se definió como Tramo 1 al sector ubicado inmediatamente aguas arriba de las hondonadas y Tramo 3, al de aguas abajo.

Los perfiles fueron levantados uno por uno posicionando el instrumento frente a cada perfil y utilizando el método de TRISECCION de la estación total, se midió con y sin asistencia de alarifes, pues en los lugares que no fue posible ubicarse físicamente se utilizó la medición láser.

A partir de la información de cada perfil, se obtuvo el dato con la cual se generó el respectivo perfil longitudinal de cada quebrada.

Tabla 7.3 Resumen perfiles transversales y longitudinales levantados

Brazo Qda. Bonilla	Tramo	Perfil Longitudinal (m)	Perfiles Transversales			
			Cantidad (N°)	Inicial - Final	Separación promedio (m)	Ancho promedio (m)
Norte	1	245,9	11	1 - 11	22,4	115
	3	827,1	38	12 - 49	21,8	124
Sur	1	618,0	28	1-28	22,7	85
	3	869,7	35	29-63	24,8	119
Totales		2.560,7	112		22,9	112

7.4.2. Levantamientos en sectores hondonadas

Se levantaron topográficamente los sectores con hondonadas dejadas por la actividad minera en ambos brazos de la quebrada Bonilla.

Para ello se empleó una estación total marca TRIMBLE M3 de 5" de precisión angular y \pm (2mm+2ppm) en mediciones de distancia esto a objeto de asegurar la precisión de estas mediciones.

Estos levantamientos se realizaron con una densidad de puntos suficiente para obtener planos con curvas de nivel cada 0,5m o equivalentemente escala 1:500, según la EETT-DOH.

En el sector norte se levantó una superficie igual a 15,9 ha y en el sur 20,2 ha.

7.4.3. Levantamiento en sector de descarga y dissipador de energía

Se levantó topográficamente el sector de descarga y dissipador de energía, en la zona próxima a Avenida Nicolás Tirado.

Para ello se empleó una estación total marca TRIMBLE M3 de 5" de precisión angular y \pm (2mm+2ppm) en mediciones de distancia esto a objeto de asegurar la precisión de estas mediciones.

Estos levantamientos se realizaron con una densidad de puntos suficiente para obtener planos con curvas de nivel cada 0,1 m o equivalentemente escala 1:100, según la EETT-DOH.

Longitud aproximada del cauce levantada es 180 m abarcando un área aproximada de 1,7 ha.

7.4.4. Georreferenciación de calicatas

A fin de tener precisión en la ubicación de las calicatas prospectadas (Anexo IV “Mecánica de Suelos y Geotecnia”) en marco del presente estudio se tomaron puntos topográficos en cada una de ellas.

La ubicación de las calicatas se incluye dentro de los planos de mecánica de suelos respectivos.

7.5. REPLANTEOS

7.5.1. Alcance de los replanteos

Se realizó el replanteo mediante el estacado de los puntos coordinados definidos como puntos importantes en las obras del proyecto definitivo, tanto en el brazo norte como sur de la quebrada Bonilla.

- Las obras replanteadas fueron las siguientes:
- Muros de Tierra MT-N1 a MT-N5 en brazo norte y MT-S1 a MT-S3, en brazo sur.
- Muros estabilizadores de pendiente MEP-1 a MEP-5 en brazo sur.
- Canalón de descarga MEP's en brazo sur.
- Canales colectores unitarios y unificado.
- Caminos de servicio.

7.5.2. Actividades topográficas

7.5.2.1. Utilización de PR's

El replanteo fue referido a los PR's del presente proyecto (Tabla 7.1) con metodología GPS_RTK, la cual garantiza una tolerancia de 1 cm en planta y 1.5 cm en altura.

7.5.2.2. Georreferenciación de puntos

Se utilizó un GPS BASE posicionado en un PR con coordenadas conocidas y luego se ubicaron los puntos a replantear desplazándose por el área de trabajo con un GPS MOVIL. Una vez ubicado el punto, dada la naturaleza rocosa del área de estudio se consideró el uso de estacas de fierro estriado de ½ de 30 cm de longitud con banderola roja atada con su correspondiente identificación, o pintura roja en la roca, dependiendo del caso.

Dentro del universo de puntos a estacar (más de 100), no se pudo replantear 5 de ellas (menos del 5%), pues eran paredes inaccesibles.

7.5.2.3. Fotografía de cada punto estacado

Cada estaca posicionada fue objeto de una fotografía georreferenciada.

Estas fotografías, junto con el listado de puntos replanteados se incluyen dentro del Apéndice J del presente Anexo V “Trabajos topográficos “.

8. MECÁNICA DE SUELOS

8.1. ALCANCE

El estudio de mecánica de suelos de la quebrada Bonilla se basó principalmente en la recopilación y análisis de los antecedentes bibliográficos del Proyecto EWI & AC (2000) más los resultados de una campaña exploratoria en la cual se excavaron 36 calicatas.

A todas las calicatas se les hizo una caracterización estratigráfica y a 4 de ellas ensayos de permeabilidad, sales solubles, Proctor modificado y clasificación completa.

Solo a las calicatas situadas en las partes altas de los brazos norte y sur de la quebrada Bonilla se les realizó ensayos de macrogranulometrías (9 en total).

Forma parte integral del presente capítulo el Anexo IV “Mecánica de Suelos y Geotecnia”, en el cual se presenta con mayor detalle, resultados específicos, fotografías, criterios de diseño, cálculos y especificaciones técnicas constructivas para las obras del proyecto.

8.2. RESULTADOS DE ESTRATIGRAFÍAS

Se realizaron 36 calicatas en los sectores de la quebrada (norte y sur), 18 en el brazo norte, 15 en el brazo sur y 3 en el tramo aguas abajo de la confluencia de ambos brazos.

Lo anterior con el fin de efectuar descripciones estratigráficas y obtener muestras para realizar diferentes ensayos de mecánica de suelos con la finalidad de determinar las propiedades geotécnicas de los suelos y realizar el cálculo de capacidad de soporte y los asentamientos de los suelos donde se fundarán las obras

La ubicación de las calicatas en coordenadas UTM (Datum WGS 84, huso 19), se presentan en la Tabla 8.1, en tanto la Figura 8.1 permite visualizar las calicatas a lo largo de ambos brazos de la quebrada y del tramo aguas debajo de la junta.

Tabla 8.1 Coordenadas UTM de las prospecciones realizadas en Quebrada Bonilla.

Coordenadas UTM			
Prospección	Este	Norte	Zona
N1	359583	7390265	19 K
N2	359651	7390330	19 K
N3	359723	7390409	19 K
N4	359782	7390490	19 K
N5	359868	7390545	19 K
N6	359926	7390568	19 K
N7	360072	7390614	19 K
N8	360187	7390613	19 K
N9	360258	7390629	19 K
N10	360319	7390625	19 K
N11	360425	7390600	19 K

Coordenadas UTM			
Prospección	Este	Norte	Zona
N12	360513	7390616	19 K
N13	360535	7390559	19 K
N14	360635	7390589	19 K
N15	360758	7390642	19 K
N16	360844	7390623	19 K
N17	360928	7390603	19 K
N18	360992	7390625	19 K
C1	359455	7390151	19 K
C2	359491	7390185	19 K
C3	359543	7390216	19 K
S1	359672	7390214	19 K
S2	359763	7390181	19 K
S3	359869	7390147	19 K
S4	359954	7390133	19 K
S5	360109	7390111	19 K
S6	360162	7390094	19 K
S7	360166	7390144	19 K
S8	360257	7390103	19 K
S9	360310	7390059	19 K
S10	360402	7389956	19 K
S11	360577	7389836	19 K
S12	360736	7389753	19 K
S13	360849	7389672	19 K
S14	361007	7389590	19 K
S15	361152	7389560	19 K

Fig. 8.1 Plano de ubicación de las calicatas excavadas



8.3. MODELACIÓN ESTRATIGRÁFICA

Se presenta a continuación, un resumen estratigráfico de las calicatas efectuadas en el sitio del proyecto. De las calicatas realizadas se puede establecer que los horizontes representativos del suelo son los que se pueden observar a continuación en las Figura 8.2 y Figura 8.3.

8.4. ENSAYOS GEOTÉCNICOS DE LABORATORIO

Con el objetivo de efectuar la caracterización geotécnica de los suelos detectados en las calicatas, se realizaron ensayos de laboratorio sobre las muestras obtenidas durante la campaña de terreno. Los ensayos consistieron en: granulometría, humedad, límites de Atterberg, densidad de partículas sólidas, clasificación U.S.C.S. además, se realizaron ensayos de macrogranulometría insitu y en laboratorio, Proctor modificado, permeabilidad y contenido de sales. El especialista geotécnico en función de los análisis estratigráficos efectuados definió, dentro del marco de la cantidad de ensayos geotécnicos disponibles para el proyecto, las calicatas cuyas muestras serían sometidas a ensayos. Dicha definición se encuentra resumida en la Tabla 8.2.

Figura 8.1 Representación estratigráfica de las calicatas del brazo norte

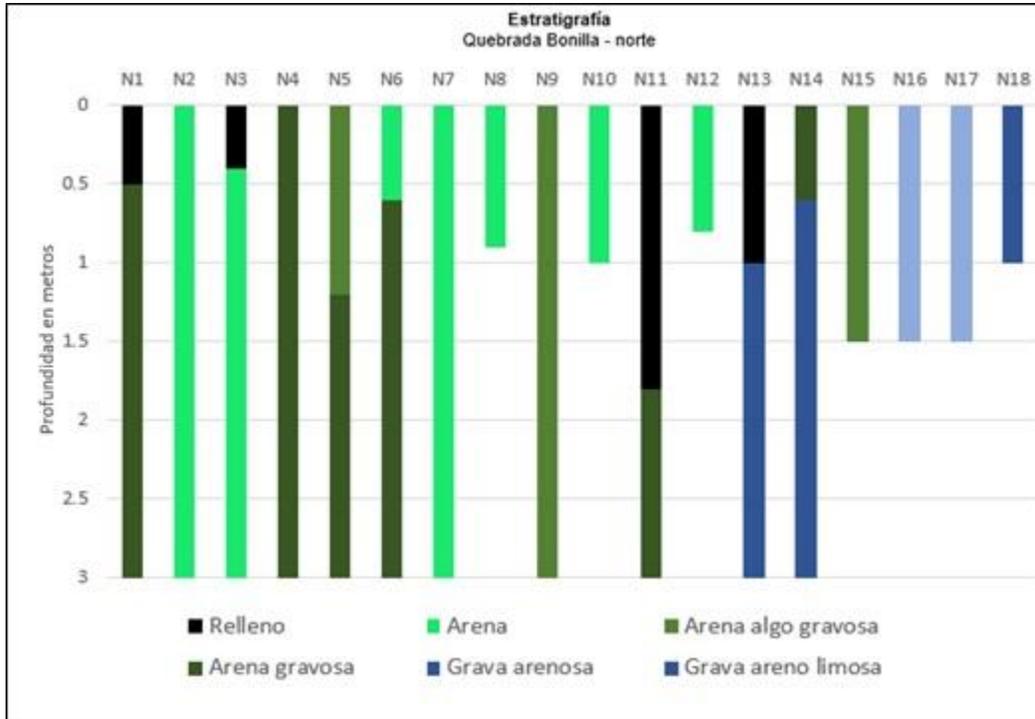


Figura 8.2 Representación estratigráfica de las calicatas de la confluencia del brazo sur

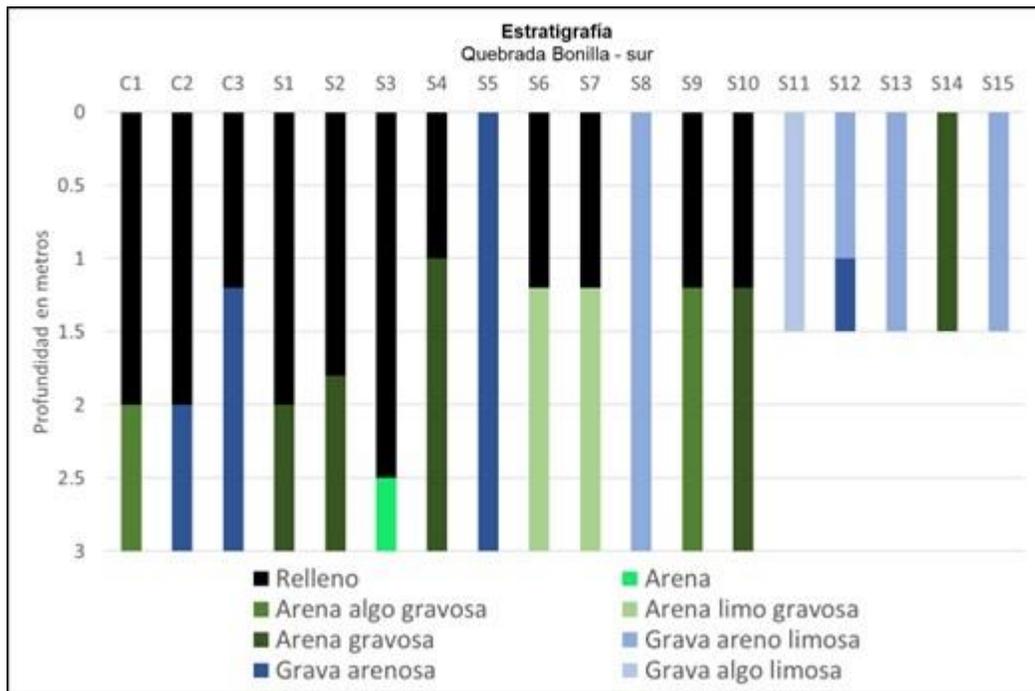


Tabla 8.2 Ensayos realizados a las distintas muestras.

Calicata	N° de muestra	Ensayos				
		Clasificación completa	Macro-granulometría	Proctor modificado	Sales solubles	Permeabilidad
N5	36578-1	1		1	1	1
N7	36578-4	1		1	1	1
N15	36580-3		1			
N15	36580-4		1			
N16	36581-1		1			
N17	36581-2		1			
N18	36581-3		1			
S6	36573-2	1		1	1	1
S10	36574-1	1		1	1	1
S11	36574-2		1			
S11	36574-3		1			
S12	36574-4		1			
S12	36575-1		1			
S13	36575-1		1			
S13	36575-2		1			
S14	36575-4		1			
S15	36576-1		1			

8.5. CARACTERIZACIÓN DE SUELOS

8.5.1. Sectorización del trazado

A modo de simplificación de la caracterización de los suelos se ha dividido el trazado tanto de la quebrada Bonilla Norte como Bonilla Sur en una sectorización que contempla 4 tipos de suelo predominantes del lugar.

En la Figura 8.4 se puede observar la sectorización realizada con un color asignado a cada tipo de suelo, que se indica en la Tabla 8.3, además de las calicatas asociadas a cada sector.

Tabla 8.3: Sectorización del trazado según tipo de suelo y calicatas asociadas

Suelo	Color	Calicatas
Arena	Verde	N1 a N7
Grava	Azul	N12 a N18
Arena Gravosa	Rojo	N8 a N11; S1 a S10 y C1 a C3
Grava Arenosa	Amarillo	S11 a S15

Figura 8.3 Sectorización del trazado según tipo de suelo



8.5.2. Asociación de las obras a cada sector

A continuación, en la Tabla 8.4 se muestran las obras pertenecientes al brazo Norte de la quebrada Bonilla y en la Tabla 8.5 pertenecientes al brazo Sur y Confluencia, indicando en cada una el suelo de la sectorización efectuada que corresponde.

Tabla 8.4: Asociación sectorización con obras del brazo Norte.

Brazo Norte	
Sector Suelo	Obra
Grava	Muro Guardaradier (*)
	MT-N1
	MT-N2
Arena Gravosa	MT-N3
	MT-N4
	MT-N5
Arena	Canal Unitario Norte

(*): El muro guardaradier se ubica dentro del sector denominado como grava, sin embargo, se puede ver que específicamente en el lugar de esta obra que calza con la calicata N15 presenta una estratigrafía de arena algo gravosa por lo menos hasta 1.5 metros de profundidad.

Tabla 8.5: Asociación sectorización con obras del brazo Sur y Confluencia.

Brazo Sur	
Sector	Obra
Grava Arenosa	Muro Estabilizador de Pendiente
Arena Gravosa	Muro de Tierra MT-S1
	Muro de Tierra MT-S2
	Muro de Tierra MT-S3
	Canal Unitario Sur
Confluencia	
Arena Gravosa	Canal Unificado
	Disipador de Energía

8.5.3. Propiedades geotécnicas de los materiales

De los antecedentes obtenidos en base a la información estratigráfica en terreno, la experiencia del consultor y a proyectos cercanos anteriores, se adoptan los siguientes parámetros geotécnicos a los suelos de cada sector definido en el ítem anterior.

- Clasificación según U.S.C.S. Arena – SP SM
- Angulo de fricción Interna $\phi = 33^\circ$
- Cohesión $c = 0.01 \text{ kg/cm}^2$
- Coeficiente empuje Activo $K_a = 0.29$
- Coeficiente empuje Pasivo $K_p = 3.39$
- Coeficiente empuje Reposo $K_o = 0.46$
- Coeficiente empuje Activo Sísmico $K_{as} = 0.43$
- Coeficiente empuje Pasivo Sísmico $K_{ps} = 3.00$
- Peso Unitario Húmedo $\gamma_w = 1.90 \text{ ton/m}^3$
- Peso Unitario Boyante $\gamma_b = 1.18 \text{ ton/m}^3$
- Humedad $w = 0.4 \%$
- Módulo de Young $E = 400 \text{ kg/cm}^2$
- Módulo de Poisson $\nu = 0.20$
- Clasificación según U.S.C.S. Gravas – GP ó GW
- Angulo de fricción Interna $\phi = 45^\circ$
- Cohesión $c = 0.02 \text{ kg/cm}^2$ (trabazón)
- Coeficiente empuje Activo $K_a = 0.17$
- Coeficiente empuje Pasivo $K_p = 5.83$

• Coeficiente empuje Reposo	K_o	=	0.29	
• Coeficiente empuje Activo Sísmico	K_{as}	=	0.27	
• Coeficiente empuje Pasivo Sísmico	K_{ps}	=	5.33	
• Peso Unitario Húmedo	γ_w	=	2.30	ton/m ³
• Peso Unitario Boyante	γ_b	=	1.47	ton/m ³
• Humedad	w	=	0.7	%
• Módulo de Young	E	=	800	kg/cm ²
• Módulo de Poisson	ν	=	0.15	
• Clasificación según U.S.C.S.	Arena Gravosa			
• Angulo de fricción Interna	ϕ	=	40°	
• Cohesión	c	=	0.01	kg/cm ²
• Coeficiente empuje Activo	K_a	=	0.22	
• Coeficiente empuje Pasivo	K_p	=	4.60	
• Coeficiente empuje Reposo	K_o	=	0.36	
• Coeficiente empuje Activo Sísmico	K_{as}	=	0.33	
• Coeficiente empuje Pasivo Sísmico	K_{ps}	=	4.15	
• Peso Unitario Húmedo	γ_w	=	2.00	ton/m ³
• Peso Unitario Boyante	γ_b	=	1.24	ton/m ³
• Humedad	w	=	0.9	%
• Módulo de Young	E	=	400	kg/cm ²
• Módulo de Poisson	ν	=	0.20	
• Clasificación según U.S.C.S.	Grava -Arenosa			
• Angulo de fricción Interna	ϕ	=	42°	
• Cohesión	c	=	0.05	kg/cm ²
• Coeficiente empuje Activo	K_a	=	0.20	
• Coeficiente empuje Pasivo	K_p	=	5.04	
• Coeficiente empuje Reposo	K_o	=	0.33	
• Coeficiente empuje Activo Sísmico	K_{as}	=	0.30	
• Coeficiente empuje Pasivo Sísmico	K_{ps}	=	4.58	
• Peso Unitario Húmedo	γ_w	=	2.20	ton/m ³
• Peso Unitario Boyante	γ_b	=	1.40	ton/m ³

- Humedad $w = 0.7 \%$
- Módulo de Young $E = 800 \text{ kg/cm}^2$
- Módulo de Poisson $\nu = 0.15$

Consideraciones:

- Por ningún motivo las estructuras proyectadas podrán fundarse algún relleno no controlado que se encuentre dentro del sector a fundar. Los suelos orgánicos no pueden ser considerados como suelos de fundación para obras de arte.
- En algunos sectores del brazo Norte se encuentran arenas cementadas a aproximadamente 1 metro de profundidad (Calicatas N8 y N10) lo que dificultará la excavación si se desea llegar a una profundidad mayor.
- En caso de utilizar relleno controlado (granular) se entregan sus parámetros mecánicos y se deben seguir las recomendaciones indicadas en el Anexo IV del presente informe.

8.5.3.1. Constante de Balasto

Considerando una placa cuadrada de 0,30 m. de lado, el coeficiente de reacción o de Balasto de los suelos se puede considerar equivalente a los valores que se muestran en la Tabla 8.6 tanto para el caso estático como también el valor recomendado para el caso sísmico.

Tabla 8.6: Valores de los coeficientes de Balasto para cada suelo

Suelo	Coeficiente de Balasto [kg/cm ³]	
	Estático (Ks)	Sísmico (Ks')
Arena	4	6
Grava	10	14
Arena gravosa	6	9
Grava arenosa	8	12

9. ANÁLISIS HIDROLÓGICO CON PROYECCIONES DE CAMBIO CLIMÁTICO

9.1. ALCANCE

El presente capítulo tiene como objetivo estimar los caudales máximos instantáneos asociados a eventos de máxima precipitación según diferentes periodos de retorno y evaluar la sensibilidad de dichas estimaciones en escenarios de clima cambiante.

Los antecedentes, resultados, análisis y conclusiones que se presentan en este capítulo, se encuentran detallados en el Anexo VI “Análisis hidrológico con componente de cambio climático” del presente informe.

La adaptación al cambio climático supone una planificación estratégica a corto, mediano y largo plazo, debe considerar diferentes escenarios futuros posibles para asegurar la resiliencia de las soluciones que se propongan y que con dicha meta desde hace algunas décadas el Panel Intergubernamental del Cambio

Climático (IPCC) y la comunidad científica internacional han trabajado en el desarrollo (y actualización) de potenciales trayectorias que podrían seguir las emisiones de gases de efecto invernadero y, con ello, estudiar la evolución del clima futuro.

Para Chile y el mundo, diferentes estudios muestran un futuro de condiciones extremas, como por ejemplo, aumento de temperaturas, aumento en la intensidad de precipitación, aumento en la ocurrencia y persistencia de sequías meteorológicas, entre otras, los pueden traer consigo la ocurrencia de crecidas y, de darse las condiciones, flujos aluvionales.

La ciudad de Antofagasta ha sido testigo de diferentes eventos meteorológicos extremos que han puesto en riesgo la seguridad de sus habitantes y de la ciudad en general, como el evento aluvional ocurrido en junio de 1991, el cual tuvo asociadas lamentables pérdidas humanas y enormes costos sociales y económicos.

Si bien estos eventos resultan esporádicos, cabe mencionar que entre 1916 y 1999 en Antofagasta se reportaron 7 aluviones por lo que, en un escenario de clima cambiante, resulta importante incluir la incertidumbre asociada al cambio climático en el diseño de obras de control de crecidas.

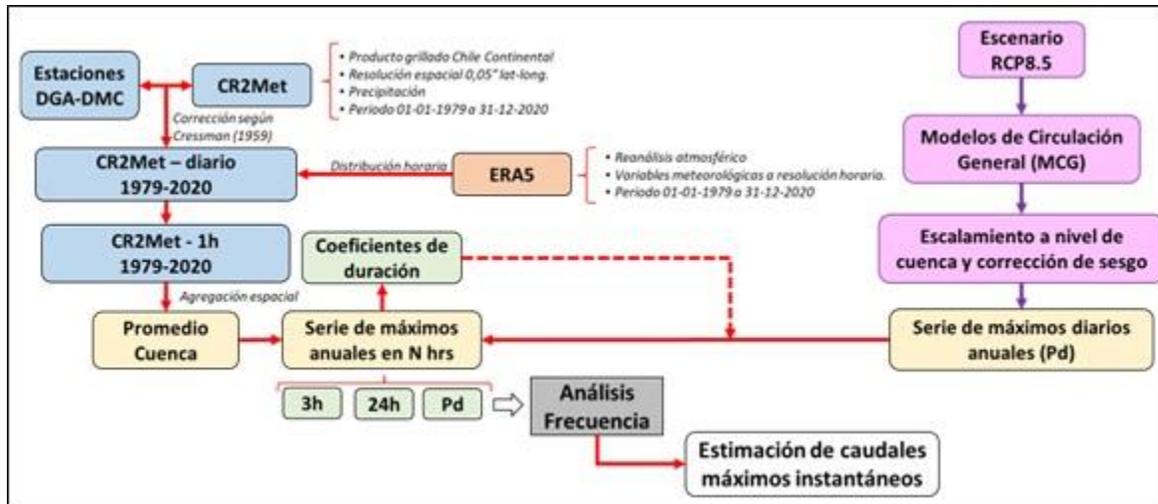
Consecuente con lo anterior, en el presente estudio se determinaron las precipitaciones y estimaron los caudales líquidos máximos instantáneos de la quebrada Bonilla para el diseño de las obras de control aluvional proyectadas en ella.

Las determinaciones de los montos e intensidades de precipitación se realizaron dentro del contexto de cambio climático utilizando el escenario RCP8.5 y los resultados de cuatro modelos de cambio climático (CCSM4, CSIRO-Mk3-6-0, IPSL-CM5A-LR y MIROC-ESM), los cuales fueron seleccionados tomando en cuenta su implementación en proyectos como la Actualización del Balance Hídrico Nacional (DGA, 2019a, 2019b, 2018, 2017) y ARCLIM (<https://arclim.mma.gob.cl/>), dada la habilidad de los mismos para replicar patrones climáticos locales y modos de variabilidad como, por ejemplo, El Niño Oscilación del Sur (ENOS) y Modo Anular del Sur (SAM).

9.2. ASPECTOS METODOLÓGICOS GENERALES

La metodología empleada para la incorporación de la variable cambio climático en el análisis hidrológico se esquematiza en la Figura 9.1, la cual radica en la utilización del producto de precipitación de CR2MET versión 2.0 (DGA, 2019b), espacialmente distribuido a 0,05° latitud-longitud y a resolución temporal diaria en el periodo 1979-2020, corregido según el método de Cressman (Cressman, 1959) a partir de observaciones in-situ derivadas de estaciones meteorológicas de la red DGA-DMC con buena continuidad de registros en el periodo 1979-2020 (se exige completitud del 70% de los días).

Figura 9.1 Esquema metodológico



A su vez, para desagregar a nivel horario los valores diarios de CR2MET v2.0, se utiliza la distribución horaria derivada del reanálisis atmosférico ERA5 (C3S, 2017) de manera análoga a lo realizado en DGA (2019b).

Una vez desagregadas las series de precipitación a nivel horario, se agregan espacialmente a escala de cuenca hidrográfica (definida por las quebradas Bonilla Norte y Sur) y se calculan los máximos anuales de precipitación en bloques continuos de 1 a 72 horas de duración. Dichos bloques de máxima precipitación en “N hrs” permiten establecer una relación con la máxima precipitación diaria anual (i.e., registrada de 8 am a 8 am del día siguiente), según lo cual se estiman coeficientes de duración que vinculan en forma directa dichas magnitudes. Así, se utilizan las series de máximos de precipitación anual para realizar un análisis de frecuencia con algunas duraciones de interés y verificar la aplicación de los coeficientes de duración como estimadores de la precipitación en N horas a partir de la máxima precipitación diaria.

Por otro lado, se escalan y corrigen por sesgo las precipitaciones diarias en el periodo 1900-2100 derivadas de cuatro modelos de circulación general (MCG) utilizados en el estudio Actualización del Balance Hídrico Nacional (DGA, 2019a, 2019b, 2018, 2017) y ARClím (<https://arclim.mma.gob.cl/>), según el escenario RCP8.5. Con ello, la serie de máximos de precipitación diaria anual derivada de los cuatro MCG son utilizados para aplicar un análisis de frecuencia y, a través de los coeficientes de duración previamente definidos, se traducen a la duración requerida (e.g., 24 hrs, tiempo de concentración de las redes hidrográficas de estudio, etc.).

Finalmente, los máximos de precipitación diaria asociados a diferentes periodos de retorno serán utilizados como insumo para la aplicación de un método precipitación-escorrentía para la estimación de caudales máximos instantáneos de crecida, recomendado en la literatura nacional (DGA, 1995), como lo es el método racional.

9.3. EVENTOS DE MÁXIMA PRECIPITACIÓN EN EL PERÍODO HISTÓRICO Y PROYECCIONES FUTURAS A 2060

Entre los resultados presentados en el Anexo VI “Análisis hidrológico con componente de cambio climático” donde se presenta la recopilación de antecedentes de este tema, se debe destacar que las series de máximos de precipitación diaria anual en el periodo 1979-2020 eran estadísticamente análogas, lo cual se pudo comprobar al estudiar diferentes estadísticos como la media, desviación estándar, algunos percentiles, entre otros.

Dado lo anterior, se propuso considerar los casos más desfavorables derivados del análisis de frecuencia individual por quebrada, como representativos para la zona de estudio completa.

Así, en el caso de reportar para las quebradas Bonilla Norte y Sur, por ejemplo, máximas precipitaciones diarias de 7,6 mm y 8,4 mm para un periodo de retorno de 10 años respectivamente, se adoptó como representativa de la zona de estudio la condición más desfavorable, es decir, aquella que se podría generar con la mayor precipitación de 8,4 mm.

Análogamente, para otro periodo de retorno como, por ejemplo T= 100 años, Bonilla Norte y Sur reportan máximas precipitaciones diarias de 42,8 mm y 46,0 mm respectivamente, según lo cual se debe adoptar para ambas cuencas una magnitud de 46,0 mm.

Como se ejemplificó anteriormente para los periodos de retorno T= 10 y 100 años, el análisis antes mencionado se repite para cada caso en que fuese necesario determinar algún valor representativo para las quebradas de estudio.

Para la desagregación a nivel subdiario de los valores de máxima precipitación diaria, la metodología propuesta consideró la aplicación de coeficientes de duración, los cuales fueron derivados de la distribución horaria del reanálisis atmosférico ERA5 (C3S, 2017; Hersbach et al., 2020) y los montos de precipitación diaria de CR2MET v2.0 (DGA, 2019b) corregido según el método de Cressman (Cressman, 1959).

De este modo, tomando en cuenta que en el periodo histórico 1979-2020 se disponía de las series horarias de precipitación, se estimaron los coeficientes de duración (CD) que permiten vincular la máxima precipitación diaria (Pd; registrada de 8 am a 8 am del día siguiente) anual con una cierta precipitación máxima en N horas de duración, lo cual se expresa según:

$$P(D = N \text{ hrs}) = CD_{Nh} \cdot P_d \rightarrow CD_{Nh} = \frac{P(D = N \text{ hrs})}{P_d}$$

Aplicando la ecuación definida anteriormente a los valores asociados a cada quebrada de manera individual, y seleccionando los coeficientes de duración más desfavorables, en la Tabla 9.1 se resumen los coeficientes adoptados como representativos de la zona de estudio para diferentes duraciones de interés.

Cabe recordar que, dado que se cuenta con series horarias de precipitación en el periodo 1979-2020, para cada duración de interés se pueden estimar 41 Coeficientes de Duración (i.e., un CD por año del periodo cuando la precipitación es no nula), por lo que resulta posible realizar un análisis estadístico de los valores asociados a los CD.

Así, como se muestra en la Tabla 9.1, se pueden estimar las probabilidades de excedencia asociadas a los 41 valores no nulos por duración, con lo cual se obtiene, por ejemplo, que para el CD asociado a 1 hr, un 75% de los valores excede el valor de 0,22.

Tabla 9.1: Coeficientes de duración (CD) de Bonilla Norte y Sur según percentiles

Percentil (Prob. No excedencia)	Probabilidad de excedencia	Coeficiente de duración (CD) asociado a tormentas de duración D (hrs)					
		D = 1	D = 2	D = 3	D = 6	D = 12	D = 24
5%	95%	0,13	0,23	0,33	0,55	0,68	1,00
25%	75%	0,22	0,35	0,48	0,71	0,95	1,06
50%	50%	0,35	0,57	0,72	0,92	1,17	1,38
75%	25%	0,55	0,87	1,01	1,29	1,56	1,86
95%	5%	0,89	1,25	1,43	2,04	3,15	4,05

Adicionalmente, resulta importante mencionar que, en algunos casos, los valores asociados al percentil 95% exceden considerablemente la magnitud 1,0 (caso en que la máxima precipitación diaria se concentra completamente en N hrs de duración), lo cual se explica principalmente por la magnitud del numerador y denominador en la expresión empleada para estimar los CD.

Por ejemplo, en el año 1985 para Quebrada Bonilla Norte se obtuvo un valor de máxima precipitación diaria anual de aproximadamente 0,4 mm, mientras que la máxima precipitación anual en 24 hrs fue de aproximadamente 1,6 mm, con lo cual se obtiene un CD igual a 4,0. Para evitar la sobrestimación de las magnitudes de precipitación en N horas producto de la aplicación de CD extremos, se limitaron los CD aplicables a las probabilidades de excedencia de 25% y 75%.

A modo de verificar la validez de los CD estimados, se compararon de manera individual por quebrada los resultados derivados del análisis de frecuencia para las series de máximos de precipitación anual en bloques de 3 y 24 horas de duración, según lo cual se determinó que los CD representaban una cota superior a los resultados derivados del análisis de frecuencia. Tomando en cuenta los casos más desfavorables, la Tabla 9.2 resume las precipitaciones adoptadas como representativas de la zona de estudio para diferentes duraciones y periodos de retorno.

Tabla 9.2: Máxima precipitación diaria (Pd) en Quebrada Bonilla del periodo (1979-2020)

Periodo de retorno (años)	Máxima precipitación (mm) para una duración D								Pd
	D = 3 hrs				D = 24 hrs				
	AF	CD _{P25%}	CD _{P50%}	CD _{P75%}	AF	CD _{P25%}	CD _{P50%}	CD _{P75%}	
2	0,9	0,7	1,0	1,4	1,9	1,5	1,9	2,6	1,4
5	2,7	2,1	3,2	4,4	5,2	4,7	6,1	8,2	4,4
10	5,4	4,0	6,0	8,5	9,4	8,9	11,6	15,6	8,4
25	9,5	8,4	12,7	17,8	18,8	18,7	24,3	32,7	17,6
50	14,1	13,9	20,8	29,2	30,4	30,6	39,9	53,8	28,9
75	18,3	18,3	27,4	38,5	39,8	40,4	52,6	70,9	38,1
100	21,8	22,1	33,1	46,5	48,0	48,8	63,5	85,6	46,0

Nota. AF: Valores de precipitación diaria máxima obtenidos del análisis de frecuencia

CD_{P25%}, CD_{P50%} y CD_{P75%}: Valores de precipitación diaria máxima obtenidos de los Coeficientes de Duración de probabilidad de excedencia, 75%, 50% y 25%, respectivamente

A su vez, se comparan los resultados derivados del análisis de frecuencia para duraciones de 3 y 24 horas (extraídos de Tabla 4.14 del Anexo VI “Análisis hidrológico con componente de cambio climático”) y los estimados a partir de los coeficientes de duración asociados a las probabilidades de excedencia de 75%, 50% y 25%, presentados en la tabla anterior.

Los resultados presentados dan cuenta de lo mencionado anteriormente, pues al aplicar los CD sobre la probabilidad de excedencia de 75%, se sobrestiman los valores derivados del análisis de frecuencia de la serie de duración 3 y 24 horas respectivamente.

Ahora bien, resulta interesante notar que al aplicar el CD asociado a la probabilidad de excedencia 75% a los resultados de máxima precipitación diaria para diferentes periodos de retorno, se obtienen valores similares a los derivados del análisis de frecuencia propio de las series de máxima precipitación en 3 y 24 hrs respectivamente. Así, para efectos del presente estudio, se considera el coeficiente de duración asociado a la probabilidad de excedencia de 75% (i.e., percentil 25% - CD_{P25%}) como válido para estimar la precipitación máxima en D horas a partir de la máxima precipitación diaria (Pd), pues permite mantener la coherencia con los resultados derivados del análisis propio de las series de máximas precipitaciones en 3 y 24 horas.

Cabe mencionar que de la Tabla 9.2 se desprende que sólo en un 25% de los casos se verifica que la precipitación diaria se concentraría en intervalos de duración no mayores a tres horas (supuesto considerado en estudios anteriores, principalmente debido a que el evento de 1991 se concentró en 3 hrs), por lo que dicha condición no es lo más frecuente o probable. En consecuencia, adoptar dicho supuesto puede conllevar a una sobrestimación de los valores de precipitación o intensidad media en un determinado intervalo de tiempo.

Por otro lado, en relación a los cambios futuros en los eventos extremos de precipitación, la Tabla 9.3 muestra la máxima precipitación diaria en el periodo 1903-2060 adoptada como representativa para las quebradas Bonilla Norte y Sur.

Tabla 9.3 Máxima precipitación diaria (1903-2060) quebrada Bonilla. Escenario RCP 8.5

Periodo de retorno (años)	Máxima precipitación diaria según modelos de circulación general MCG (mm)					
	CCSM4	CSIRO-Mk3-6-0	IPSL-CM5A-LR	MIROC-ESM	Promedio MCG	Desv. Std
2	2,0	1,7	1,6	1,6	1,7	0,2
5	8,7	5,6	4,9	5,9	6,3	1,7
10	15,0	9,8	8,9	10,3	11,0	2,7
25	26,7	19,6	20,4	21,0	21,9	3,3
50	34,9	31,5	33,2	30,2	32,5	2,0
75	43,4	38,7	47,5	34,5	41,0	5,6
100	47,2	48,4	56,6	40,9	48,3	6,5

Allí se observa que, por ejemplo, para el periodo de retorno 100 años, la máxima precipitación diaria alcanzaría un valor promedio de 48,3 mm.

Puede apreciarse que los resultados promedio de los modelos de circulación general (MCG) presentan una alta dispersión en torno a la magnitud de los cambios (~10-20%). No obstante, en general la mayoría de los cambios proyectados apuntan en la misma dirección (mayor magnitud de los eventos en comparación a la línea base).

9.4. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE PRECIPITACIONES SEGÚN EXTENSIÓN ESTADÍSTICA

A modo de caracterizar la sensibilidad al periodo de estadísticas utilizado para el análisis de frecuencia, en la Tabla 9.4 se muestran los resultados de máxima precipitación diaria adoptados como representativos para la zona de interés según diferentes subperiodos de estadísticas.

Adicionalmente, se aumentaron los periodos de retorno reportados para facilitar la comparación de los cambios futuros en la magnitud de los eventos de precipitación respecto al periodo de referencia.

Tabla 9.4 Máxima precipitación diaria promedio de MCG s/subperiodos de estadísticas

Periodo AF	Máxima precipitación diaria (mm) promedio entre MCG según periodo de retorno T (años)										
	T = 2	T = 5	T = 10	T = 25	T = 50	T = 75	T = 100	T = 150	T = 200	T = 250	T = 500
1903-1991	2,0	6,4	11,1	21,5	31,8	40,4	47,4	57,1	65,9	75,0	104,3
1903-1996	2,0	6,6	11,6	22,3	32,6	41,5	48,7	58,1	67,5	76,4	106,0
1903-2020	1,8	6,1	10,7	20,7	30,4	38,8	45,5	55,9	64,8	71,4	103,7
1903-2060	1,7	6,3	11,0	21,9	32,5	41,0	48,3	59,7	69,0	76,2	111,9
1979-2020	1,4	4,4	8,4	17,6	28,9	38,1	46,0	59,6	71,3	81,8	123,5
1979-2060	1,4	4,7	9,3	20,1	31,1	42,0	49,6	62,7	74,5	86,2	130,6
2025-2060	1,3	5,7	12,0	26,8	42,7	58,4	71,7	92,2	112,2	132,8	210,1
2030-2065	1,6	6,4	12,6	27,3	44,8	63,9	80,2	106,5	132,2	158,5	263,2
2065-2100	1,5	5,6	11,4	26,4	41,6	55,5	66,5	82,3	97,9	114,2	177,9

Los resultados muestran que, para periodos de retorno menores a 10 años, las dispersiones son menores al 50% respecto al promedio. Periodos de retorno más altos alcanzan valores mayores, por ejemplo, 55% para T= 50 años y 74% para T= 100 años. Esto muestra la dependencia que existe entre los resultados obtenidos del análisis de frecuencia respecto a la extensión del periodo de estadísticas analizado.

A su vez, resulta interesante notar que existe una alta coherencia entre la magnitud de los valores obtenidos para periodos que incluyen el periodo histórico (1903-2020 y 1979-2020), lo cual no se refleja directamente en periodos futuros (2025-2060, 2030-2065 y 2065-2100), los cuales resultan ser prácticamente 1,5 a 2 veces de los valores estimados en el periodo histórico.

Adicionalmente, resulta importante notar que, si bien la señal es similar, existen diferencias entre los MCG y el promedio presentado en la Tabla 9.4, lo que queda en evidencia a través de los análisis de frecuencia que se muestran en el Anexo VI “Análisis hidrológico con componente de cambio climático” del presente informe, donde a su vez se observa que a mayor periodo de retorno existe una mayor dispersión en torno al promedio. Asimismo, se observa que al incluir información pasada e histórica en el análisis de frecuencia (panel A) la dispersión es menor en comparación al caso de no incluirla (panel B), disminuyendo a su vez la magnitud de los valores estimados.

Ahora bien, el análisis de periodos aislados (sin incluir la estadística completa) supone desconocer en cierto grado la ocurrencia de eventos en el pasado, razón por la cual, para efectos del presente estudio, se proponen adoptar los valores más desfavorables derivados del análisis de frecuencia de los subperiodos 1903-2060 y 1979-2060.

Aplicando el coeficiente de duración para transformar los valores máximos diarios a precipitaciones máximas en 3 horas de duración, la Tabla 9.5 (de Tabla 9.4) muestra las intensidades medias en 3 horas promedio entre los MCG según diferentes periodos de retorno y subperiodos de estadísticas.

Tabla 9.5: Intensidad media de precipitación en 3 horas promedio entre MCG

Periodo AF	Intensidad de precipitación media en 3 hrs (mm/hr) promedio entre modelos de circulación general (MCG)										
	T = 2	T = 5	T = 10	T = 25	T = 50	T = 75	T = 100	T = 150	T = 200	T = 250	T = 500
1903-1991	0,3	1,0	1,8	3,4	5,1	6,5	7,6	9,1	10,5	12,0	16,7
1903-1996	0,3	1,1	1,9	3,6	5,2	6,6	7,8	9,3	10,8	12,2	17,0
1903-2020	0,3	1,0	1,7	3,3	4,9	6,2	7,3	8,9	10,4	11,4	16,6
1903-2060	0,3	1,0	1,8	3,5	5,2	6,6	7,7	9,6	11,0	12,2	17,9
1979-2020	0,2	0,7	1,3	2,8	4,6	6,1	7,4	9,5	11,4	13,1	19,8
1979-2060	0,2	0,8	1,5	3,2	5,0	6,7	7,9	10,0	11,9	13,8	20,9
2025-2060	0,2	0,9	1,9	4,3	6,8	9,3	11,5	14,8	18,0	21,2	33,6
2030-2065	0,3	1,0	2,0	4,4	7,2	10,2	12,8	17,0	21,2	25,4	42,1
2065-2100	0,2	0,9	1,8	4,2	6,7	8,9	10,6	13,2	15,7	18,3	28,5

En la tabla se observa que, en el periodo histórico, todos los casos reportan valores de intensidad de precipitación menores a lo reportado en estudio previos, los que estiman en 4,2, 8,2 y 16 mm/hr la intensidad media máxima en 3 hrs para periodos de retorno de T= 25, 50 y 100 años respectivamente.

Esto se atribuye principalmente al supuesto de considerar que la precipitación máxima diaria se concentra en menos de 3 horas, de manera similar a lo ocurrido en 1991. No obstante, dicha condición no resulta ser la más probable (sólo se verifica en un 25% de los años en el periodo 1979-2020), e incluso sobreestima los resultados derivados del propio análisis de frecuencia de la serie de máxima precipitación en 3 hrs (ver Tabla 9.2).

9.5. ESTIMACIÓN DE CAUDALES MÁXIMOS INSTANTÁNEOS CON CLIMA CAMBIANTE

Considerando las características geomorfológicas de las cuencas de estudio, las cuales corresponden principalmente a quebradas con área aportante menor a 15 km², los caudales de diseño se estimaron empleando el denominado método racional (DGA, 1995), el cual se define según la siguiente expresión:

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

Donde la intensidad media “i” en el tiempo de concentración “t_c” está dada en mm/hr, el área aportante (A) en km² y el coeficiente de escorrentía (C) es un adimensional que da cuenta de la precipitación efectiva que, en el caso de estudio, estaría asociada a un tipo de suelo semi-permeable (arena arcillosa o limosa) y sin vegetación.

En la Tabla 9.6 se resumen los parámetros morfométricos requeridos para aplicar el método racional y estimar los QMI asociados ambas quebradas.

Tabla 9.6 Parámetros morfométricos de las cuencas Norte y Sur

Quebrada	Área – A (km ²)	Tiempo de concentración (promedio California y Kirpich)- t _c (min)	Coef. Escorrentía – c (-)
Bonilla Norte	3,25	24	0,50
Bonilla Sur	5,64	30	0,50

Nota: t_c redondeado de resultados de fórmulas (brazo norte 23,97 y sur, 31,20).

Cabe mencionar que se adoptó un coeficiente de escorrentía C = 0,5 para ambas cuencas con el objeto de mantener coherencia con estudios previos, tomando en cuenta que i) en el tiempo la zona no ha tenido cambios significativos en la cobertura de suelo que puedan alterar la generación de escorrentía durante eventos de precipitación.

Considerando que los tiempos de concentración asociados a las quebradas son menores a 1 hr, para estimar las intensidades de precipitación en dicho tiempo y para cualquier periodo de retorno T se aplicó la fórmula de Bell, la cual se expresa en términos del tiempo (t) en minutos y la intensidad de precipitación en 1 hr para el periodo de retorno T expresada en mm/hr (I_T(1 hr)) según:

$$P_T(t) = (0,54 \cdot t^{0,25} - 0,5) \cdot P_T(1 \text{ hr})$$

Dada la formulación propuesta en el presente estudio para abordar la magnitud de precipitaciones diferentes a la máxima diaria (aplicación de coeficientes de duración), la ecuación anterior se puede expresar como:

$$I_T(t) = \frac{(0,54 \cdot t^{0,25} - 0,5) \cdot CD(1 \text{ hr}) \cdot P_d^T}{(t/60)}$$

Donde P_d^T corresponde a la máxima precipitación diaria en mm/día, asociada al periodo de retorno "T" en años, y $CD(1 \text{ hr})$ es el coeficiente de duración asociado a 1 hr (ver Tabla 9.1).

Finalmente, tomando en cuenta los tiempos de concentración adoptados para las quebradas Bonilla Norte (24 min) y Sur (30 min) y $C=0,5$, el caudal máximo instantáneo por quebrada queda expresado por:

$$I_T(t_c) = \begin{cases} 0,172 \cdot P_d^T, & \text{Qda. Bonilla Norte} \\ 0,263 \cdot P_d^T, & \text{Qda. Bonilla Sur} \end{cases}$$

Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 9.7 y Tabla 9.8, para quebrada Bonilla Norte y Sur, respectivamente, los cuales se obtienen a partir de eventos de precipitación con intensidades de magnitud igual a las reportadas en la Tabla 9.5 (promedio entre los MCG).

Tabla 9.7 Caudal líquido máximo instantáneo de crecida (QMI) en Quebrada Bonilla Norte

Periodo AF	Caudal máximo instantáneo (m³/s) según periodo de retorno T (años) - Qda. Bonilla Norte										
	T = 2	T = 5	T = 10	T = 25	T = 50	T = 75	T = 100	T = 150	T = 200	T = 250	T = 500
1903-1991	0,3	1,1	1,9	3,7	5,5	6,9	8,2	9,8	11,3	12,9	17,9
1903-1996	0,3	1,1	2,0	3,8	5,6	7,1	8,4	10,0	11,6	13,1	18,2
1903-2020	0,3	1,0	1,8	3,6	5,2	6,7	7,8	9,6	11,1	12,3	17,8
1903-2060	0,3	1,1	1,9	3,8	5,6	7,1	8,3	10,3	11,9	13,1	19,2
1979-2020	0,2	0,8	1,4	3,0	5,0	6,5	7,9	10,3	12,3	14,1	21,2
1979-2060	0,2	0,8	1,6	3,5	5,3	7,2	8,5	10,8	12,8	14,8	22,5
2025-2060	0,2	1,0	2,1	4,6	7,3	10,0	12,3	15,9	19,3	22,8	36,1
2030-2065	0,3	1,1	2,2	4,7	7,7	11,0	13,8	18,3	22,7	27,3	45,3
2065-2100	0,3	1,0	2,0	4,5	7,2	9,5	11,4	14,2	16,8	19,6	30,6

Nota. En negrita se muestran los QMI estimados para el periodo histórico y en rojo los máximos QMI

Tabla 9.8 Caudal líquido máximo instantáneo de crecida (QMI) en Quebrada Bonilla Sur

Periodo AF	Caudal máximo instantáneo (m³/s) según periodo de retorno T (años) - Qda. Bonilla Sur										
	T = 2	T = 5	T = 10	T = 25	T = 50	T = 75	T = 100	T = 150	T = 200	T = 250	T = 500
1903-1991	0,5	1,7	2,9	5,7	8,4	10,6	12,5	15,0	17,3	19,7	27,4
1903-1996	0,5	1,7	3,1	5,9	8,6	10,9	12,8	15,3	17,8	20,1	27,9
1903-2020	0,5	1,6	2,8	5,4	8,0	10,2	12,0	14,7	17,0	18,8	27,3
1903-2060	0,4	1,7	2,9	5,8	8,5	10,8	12,7	15,7	18,1	20,0	29,4
1979-2020	0,4	1,2	2,2	4,6	7,6	10,0	12,1	15,7	18,8	21,5	32,5
1979-2060	0,4	1,2	2,4	5,3	8,2	11,0	13,0	16,5	19,6	22,7	34,3

Periodo AF	Caudal máximo instantáneo (m³/s) según periodo de retorno T (años) - Qda. Bonilla Sur										
	T = 2	T = 5	T = 10	T = 25	T = 50	T = 75	T = 100	T = 150	T = 200	T = 250	T = 500
2025-2060	0,3	1,5	3,2	7,0	11,2	15,4	18,9	24,2	29,5	34,9	55,3
2030-2065	0,4	1,7	3,3	7,2	11,8	16,8	21,1	28,0	34,8	41,7	69,2
2065-2100	0,4	1,5	3,0	6,9	10,9	14,6	17,5	21,6	25,7	30,0	46,8

Nota. En negrita se muestran los QMI estimados para en el periodo histórico y en rojo los máximos QMI

Los resultados muestran que los análisis derivados del periodo 1979-2020 y 1903-2020 conducen a caudales máximos instantáneos de crecida (líquidos) similares.

Por otro lado, al extender el análisis hacia 2060 (periodo 1903-2060) los principales cambios se observan en los periodos de retorno por sobre los 10 años, donde los QMI aumentan entre un 5%-7% respecto a los estimados en el periodo 1903-2020.

Se considera que el promedio de los MCG es un buen estimador del valor esperado en el futuro o “más probable”, pero sin dejar de lado la existencia de incertidumbre tanto en los MCG como en los métodos de escalamiento utilizados.

A partir de lo indicado anteriormente, donde se reconoce el valor de incorporar la estadística completa en el análisis de frecuencia (periodo pasado, histórico y futuro), en la Tabla 9.9 se resumen los caudales líquidos máximos instantáneos adoptados para ambas quebradas de interés.

Dichos caudales corresponden al máximo QMI obtenido entre el periodo 1903-2020 y 1979-2020 para cada periodo de retorno en el caso “Línea Base”, y el máximo QMI entre el periodo 1903-2060 y 1979-2060 en el caso “Cambio Climático”.

Tabla 9.9 Caudales líquidos máximos instantáneos adoptados para Bonilla Norte y Sur

Qda.	Caso	Caudal máximo instantáneo (m³/s) adoptados según periodo de retorno T (años)										
		T = 2	T = 5	T = 10	T = 25	T = 50	T = 75	T = 100	T = 150	T = 200	T = 250	T = 500
Brazo Norte	Línea Base	0,3	1,0	1,8	3,6	5,2	6,7	7,9	10,3	12,3	14,1	21,2
	Cambio Climático	0,3	1,1	1,9	3,8	5,6	7,2	8,5	10,8	12,8	14,8	22,5
	Δ (%)	0	10	6	6	8	7	8	5	4	5	6
Brazo Sur	Línea Base	0,5	1,6	2,8	5,4	8,0	10,2	12,1	15,7	18,8	21,5	32,5
	Cambio Climático	0,4	1,7	2,9	5,8	8,5	11,0	13,0	16,5	19,6	22,7	34,3
	Δ (%)	-20	6	4	7	6	8	7	5	4	6	6

9.6. HIDROGRAMAS

La forma del hidrograma generado de cada cauce es de tipo trapecial, donde se supuso que los caudales crecen linealmente hasta alcanzar el valor del caudal máximo en un tiempo igual al tiempo de concentración, tiempo a partir del cual sigue manteniéndose el peak hasta que termina la lluvia.

Esta suposición es conservadora ya que supone que una vez alcanzado el peak no existe capacidad significativa de regulación de las cuencas por ser muy pequeñas y en general, bastante empinadas (sus

cauces presentan pendientes en los tramos encajonados, aguas arriba de los conos de deyección, sobre 15%).

En el Anexo VI “Análisis hidrológico con componente de cambio climático” del presente informe se encuentran tabulados los hidrogramas líquidos para un periodo de retorno $T= 50, 100$ y 200 años se considerando la información de cada cuenca de los brazos norte y sur, particularmente su caudal peak QMI, el área aportante, el tiempo de concentración y el tiempo base considerando una lluvia de duración 3 horas, que se resume en la Tabla 9.10.

Tabla 9.10 Características de los hidrogramas líquidos de la quebrada Bonilla

Brazo norte			
Parámetro	T=50 años	T=100 años	T=200 años
QMI (m ³ /s)	5,3	8,5	12,8
Área, A (km ²)	3,25	3,25	3,25
Tiempo concentración, t_c (min)	24	24	24
Tiempo base del hidrograma, t_B (min)	204	204	204
Brazo sur			
Qmax (m ³ /s)	8,5	13,0	19,6
Área, A (km ²)	5,64	5,64	5,64
Tiempo concentración, t_c (min)	30	30	30
Tiempo base del hidrograma, t_B (min)	210	210	210

En la Figura 9.2 y Figura 9.3 aparecen graficados los hidrogramas para los periodos de retorno de $T= 50, 100$ y 200 años para los brazos norte y sur, respectivamente. Dichos hidrogramas se consideran los hidrogramas líquidos de diseño para la determinación de los hidrogramas de detritos de diseño de las obras de control aluvional.

Figura 9.2 Hidrogramas líquidos de crecidas de $T=50, 100$ y 200 años en brazo norte

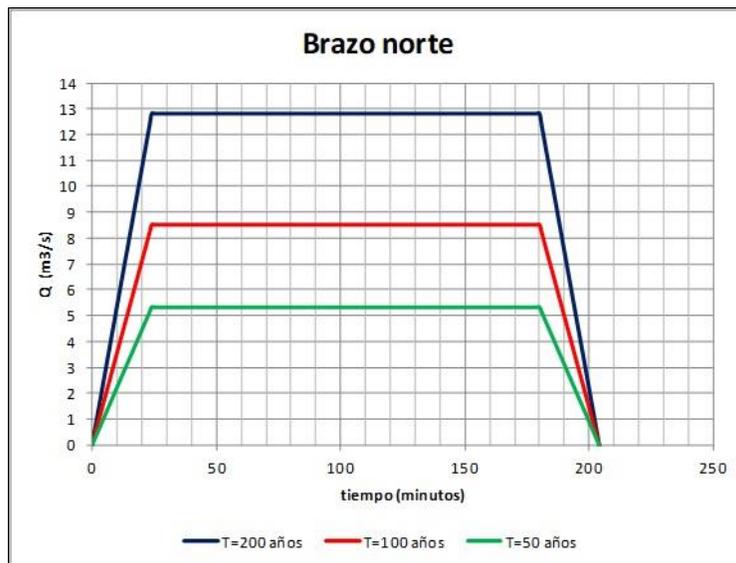
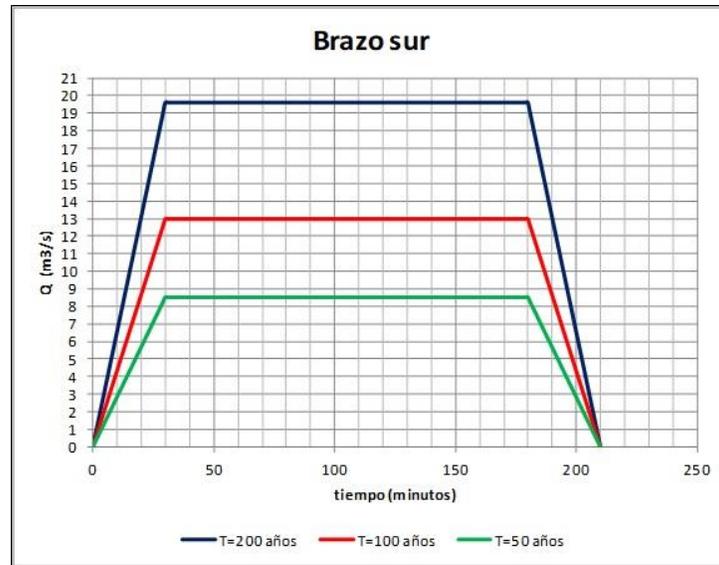


Figura 9.3 Hidrogramas líquidos de crecidas de T=50, 100 y 200 años en brazo sur



10. ESTUDIO DE HIDRÁULICA ALUVIONAL

10.1. ALCANCE

El presente capítulo tiene como objetivo presentar los cálculos, supuestos y consideraciones efectuadas para la determinación de los caudales detríticos de diseño en ambos brazos de la quebrada Bonilla.

En el Anexo VII “Estudio de hidráulica aluvional” se presenta la modelación hidráulica y mecánico fluvial, realizada incorporando la información de los levantamientos topográficos de ambos cauces y las curvas granulométricas obtenidas de las prospecciones y macrogranulometrías realizadas en la campaña de terreno de Mecánica de Suelos.

10.2. DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA EMPLEADA

La metodología empleada para obtener los caudales detríticos en los cauces, consistió en recopilar, analizar y procesar la información básica de topografía, sedimentos e hidrología, para a continuación desarrollar la modelación hidráulica y mecánico fluvial, en cada cauce del tramo alto de cada brazo (aguas arriba de los conos de deyección correspondientes).

Como resultado se obtuvieron los gastos sólidos que potencialmente puede transportar el flujo líquido de cada brazo, los que incluyeron tanto el transporte de sedimento de fondo como el de suspensión de las arenas del lecho como el washload.

Finalmente se determinó la concentración volumétrica asociada a los caudales líquidos de crecidas de T= 100 años y el gasto sólido total correspondiente, para calcular finalmente el caudal detrítico asociado.

10.3. INFORMACIÓN BÁSICA

Para la simulación hidráulica se utilizó el levantamiento topográfico realizado sobre los brazos norte y sur de la Quebrada Bonilla.

De manera análoga a la caracterización topográfica de los cauces, para caracterizar la granulometría de los sedimentos constitutivos de sus lechos, se consideraron en cada brazo de la quebrada, las macro granulometrías proveniente de las muestras tomadas en las calicatas de los tramos encajonados.

Para las simulaciones hidráulicas y cálculos de mecánica fluvial se consideraron las crecidas con períodos de retorno de $T= 50, 100$ y 200 años consignadas en el Anexo VI “Análisis hidrológico con componente de cambio climático”.

10.4. MODELACIÓN Y SIMULACIONES HIDRÁULICAS

Las simulaciones hidráulicas y la modelación de las avenidas en ambos brazos se realizaron mediante el software HEC-RAS, suponiendo un flujo permanente y un modelado unidimensional de ambos brazos.

10.5. MECÁNICA FLUVIAL Y CÁLCULO DE CAUDALES DETRÍTICOS

A partir de la información básica y las simulaciones HEC-RAS 1D, se estimaron los gastos sólidos asociados al transporte de sedimentos generado por flujos líquidos de crecidas.

La determinación del gasto sólido se hizo separadamente para cada componente de transporte sólido, a saber.

- Transporte sólido de fondo;
- Transporte en suspensión de sólidos del lecho;
- Transporte de material fino proveniente del lavado de los suelos de la cuenca o washload.

A partir de lo anterior se obtuvo el gasto sólido total que representa la capacidad de transporte del tramo encajonado de cada brazo de la quebrada Bonilla, calculándose con ella la concentración de sólidos para caracterizar los flujos de detritos asociados a cada crecida en los dos brazos.

Estos cálculos se realizaron con simulaciones hidráulicas que supusieron distintos valores de la rugosidad de Manning con el fin de representar a través de ellos los coeficientes de resistencia de los flujos detríticos, a modo de análisis de sensibilidad.

10.6. RESULTADOS HEC RAS

Las simulaciones hidráulicas se realizaron de manera independiente tanto para el brazo norte como para el brazo sur de la quebrada Bonilla para el caudal peak de las crecidas de periodo de retorno y para coeficientes de Manning $n=0,035$ hasta $0,150$.

Para el brazo norte se simularon los periodos de retorno $T= 50$ años ($Q= 5,3 \text{ m}^3/\text{s}$) $T= 100$ años ($Q= 8,5 \text{ m}^3/\text{s}$) y $T= 200$ años ($Q= 12,8 \text{ m}^3/\text{s}$), lo mismo que para el brazo sur: $T= 50$ años ($Q= 8,5 \text{ m}^3/\text{s}$) $T= 100$ años ($Q= 13 \text{ m}^3/\text{s}$) y $T= 200$ años ($Q= 19,6 \text{ m}^3/\text{s}$).

Los resultados muestran que en ambos brazos, el n de Manning es determinante en condicionar el tipo de régimen hidráulico, observándose que en el entorno de $n = 0,100$ el flujo se torna cercano a la crisis y que para valores mayores, cambia a subcrítico. Este cambio va acompañado de una reducción de la velocidad y de un correspondiente aumento de la altura y del esfuerzo de corte.

Lo anterior es revelador de la interrelación que existe entre el potencial de arrastre de estos cauces y el factor de resistencia al flujo, representado en este caso el n de Manning el que a su vez puede considerarse como un parámetro que mide indirectamente la carga de sedimento: a mayor n de Manning, mayor es la resistencia al flujo por el aumento de concentración de sólidos. Sin embargo, al cambiar del régimen supercrítico al subcrítico, se evidencia un límite en el potencial de transporte sólido y por lo tanto, de la capacidad para generar flujos aluvionales.

De este modo, para los cauces que se han estudiado aquí, es esperable que las mayores concentraciones de sólidos del flujo queden acotadas a flujos supercríticos o cercanos a la crisis, lo que se traduce en valores de n en el rango de 0,035 a 0,050 según los resultados de las tablas ya comentados.

10.7. MODELACIÓN MECÁNICO FLUVIAL

La modelación mecánico fluvial se basó en considerar como hipótesis básica de cálculo, el hecho que la movilización de los sólidos de un cauce con lecho conformado por sedimentos granulares, está asociada a partículas:

- (1) Provenientes del fondo, transportadas por la corriente en contacto permanente con el lecho que son partículas continuamente rodando, resbalando o dando pequeños saltos, impulsadas por la turbulencia de la corriente. La tasa de transporte de esta componente medida como caudal o gasto másico, se le acostumbra a denominarla gasto sólido de fondo;
- (2) Originadas en el lecho y transportadas en suspensión por la turbulencia del flujo, básicamente arenas. La tasa de transporte de esta componente, también medida como caudal o gasto másico, denomina gasto sólido en suspensión (del lecho).
- (3) Vinculadas a fenómenos de erosión laminar de los suelos de la cuenca por escorrentía de aguas lluvia o de derretimiento de nieves o hielos, constituidos por sedimentos finos, bajo la malla 200 (limos y arcillas) que son transportados en suspensión y permanecen en el seno del fluido mientras son movilizados. La tasa de transporte de esta componente medida también como caudal o gasto másico, se le acostumbra a denominarla gasto sólido de washload.

Por lo tanto, para estimar la capacidad de arrastre total de un lecho móvil, deben sumarse los gastos sólidos de fondo, en suspensión del lecho y el washload.

Con este fin se emplearon distintos métodos de cálculo según la componente sólida movilizada.

Respecto del transporte de fondo, para ríos de granulometría gruesa y extendida, y pendientes fuertes, los métodos de la Envolvente Inferior (EI) y de la Envolvente Superior (ES), recomendados en el Manual de Carreteras y de Wilcock y Crowe (W-C), resultan posibles de emplear, pero en el presente estudio, se optó por aplicar solo este último método por considerarse que incorpora de manera más completa e integrada todos los datos hidráulicos y de características del sedimento de los lechos, disponibles en el tramo encajonado de cada uno de los brazos de la quebrada Bonilla.

Para cuantificar el transporte del sedimento en suspensión del lecho, el cual, considera solo las fracciones de sedimento del rango de las arenas, circunscribiendo los tamaños a los diámetros comprendidos entre 0,074 mm (malla 200) y 2 mm (malla 10), se empleó el modelo de Rouse que describe el proceso de difusión turbulenta o dispersión de las partículas de sedimentos suspendidos en la columna de agua.

El transporte de washload está asociado al sedimento fino en suspensión proveniente de la erosión laminar de los suelos de la cuenca, bajo los 0,074 mm, variando significativamente sus concentraciones en un flujo según las características del río y la de los suelos de su cuenca, como también de su geomorfología.

De acuerdo con datos recopilados y analizados por el consultor, en distintos sistemas fluviales del país, la concentración más alta de sedimento de washload se dan en condiciones de grandes crecidas que ocurren en cuencas con suelos deleznable y laderas de alta pendiente.

En este caso se consideró que las concentraciones de washload pueden alcanzar excepcionalmente valores sobre el 5%, como ocurre en ríos que acarrear grandes cargas sólidas durante crecidas.

10.8. CONCENTRACIONES VOLUMÉTRICAS DE SÓLIDOS ADOPTADAS

Para ambos brazos de la quebrada Bonilla, los cálculos de transporte de sedimento fueron realizados mediante el empleo de los métodos anteriormente mencionados, considerando los tres caudales líquidos y los 4 coeficientes de rugosidad estudiados indicados.

En la Tabla 10.1 se resumen los resultados expresados en términos de concentraciones volumétricas de sólidos, en función de los caudales de cada brazo, concluyéndose a partir de ellos que es recomendable adoptar una concentración volumétrica de sólidos de 30% como representativa de ambos brazos de la quebrada Bonilla.

Tabla 10.1 Concentraciones volumétricas de sólidos de flujos aluvionales en quebrada Bonilla

T (años)	Norte	CV/Cvmax=0,50	Sur	CV/Cvmax=0,40	CV ponderado por Q
	Q (m3/s)	CV	Q (m3/s)	CV	
50	5,3	33%	8,5	26%	28%
100	8,5	33%	13	26%	29%
200	12,8	33%	19,6	26%	29%

Nota: Cvmax es la concentración máxima de empaque, es decir el volumen máximo que puede ocupar la masa sólida cuando sus granos se tocan sin compactación dejando intersticios equivalentes a la porosidad del suelo.

11. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

La solución desarrollada en el proyecto consiste en obras de retención del material sólido acarreado por los aluviones, de estabilización de pendientes, encauzamientos y canales, ubicadas en los cauces de los brazos norte y sur de la quebrada Bonilla y de su tramo final común.

Mediante estas obras se conseguirá una reducción efectiva de la carga de sólidos de la mezcla aluvional en los sectores y altos y medios de la quebrada, y seguidamente, la conducción controlada de un flujo de agua con menor contenido de sólidos a través de canales de hormigón, hasta una obra final disipadora de energía que permitirá descargar las aguas a la calle Guardiamarina Fernández. El detalle de las obras proyectadas se encuentra en el Anexo X “Descripción del proyecto y diseño hidráulico”.

En la Figura 11.1 se muestra una imagen satelital que grafica la ubicación en planta de las obras que consulta el proyecto, con fotos que ilustran el tipo de obra a construir.

11.1. BRAZO NORTE

A continuación se describen las obras de control aluvional desde aguas arriba hacia aguas abajo proyectadas para el brazo norte de la quebrada Bonilla, cuya disposición general se muestra en la Figura 11.2, identificando en color rojo las obras hidráulicas y en color verde los caminos de servicio proyectados.

Figura 11.1 Obras de control aluvional proyectadas en la quebrada Bonilla



11.1.1. Muro guardarradier

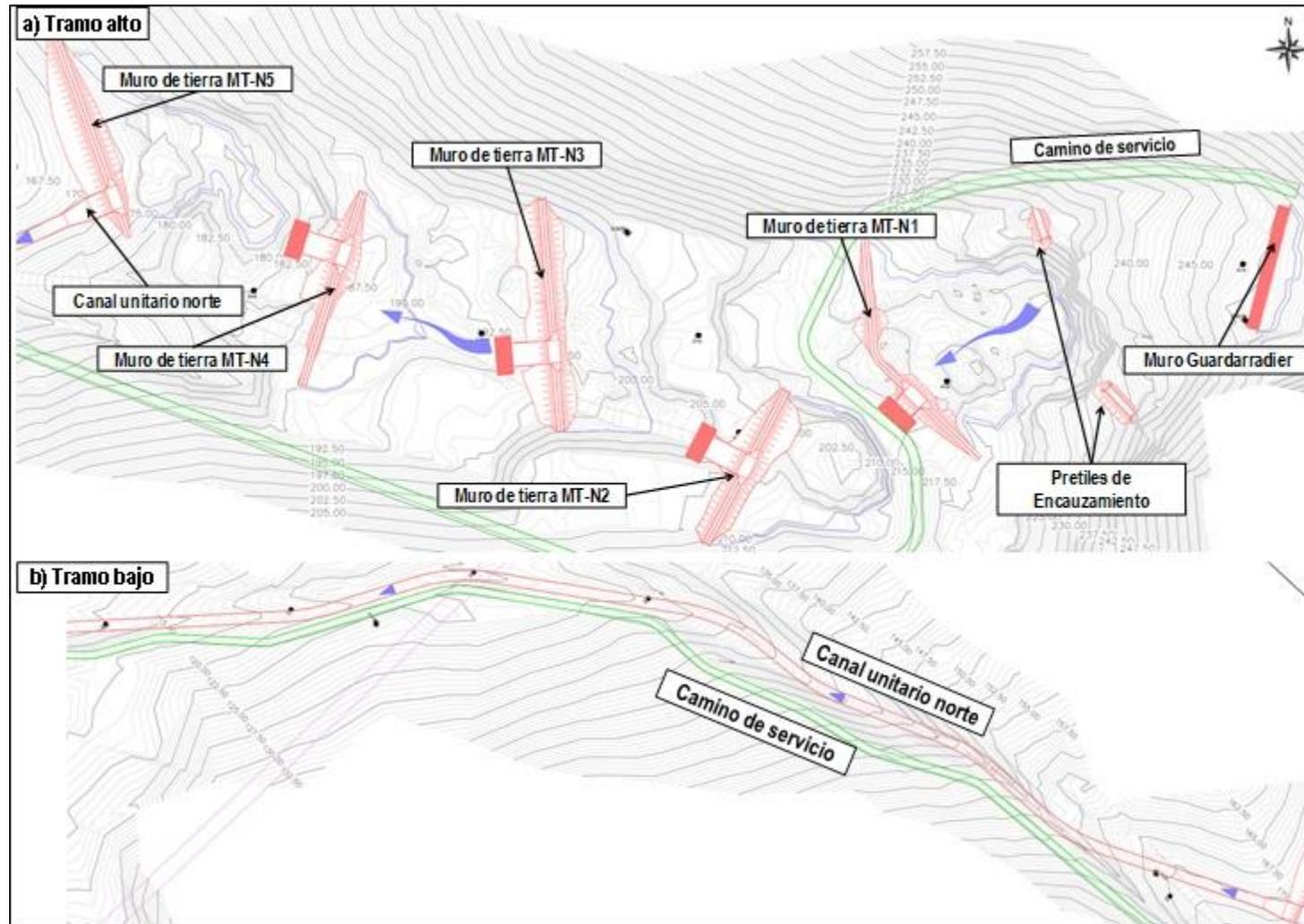
Este muro se proyectó aguas arriba del cono de deyección del brazo norte, tal como se aprecia en la Figura 11.2.

Esta obra consiste en un muro de hormigón armado, dispuesto de manera transversal al cauce y diseñado con una protección de enrocado ante la socavación local y/o retrógrada a su pie.

Este muro se extiende a lo ancho del cauce por una longitud de 58,8 m con alturas que varían entre 2,5 m y 3,5 m sobre el lecho, teniendo una cota de coronamiento 251,86 msnm.

Dispone de un vertedero de 20 m de ancho, de forma triangular con pendiente de 1:10 (H:V) hacia el centro con su punto más bajo, situado a la cota 250,86 msnm como se muestra en la Figura 11.3.

Figura 11.2 Disposición general de las obras de control aluvional del brazo norte de la quebrada Bonilla



ACTUALIZACIÓN DE DISEÑO DE OBRAS DE CONTROL ALUVIONAL EN QUEBRADA BONILLA, ANTOFAGASTA

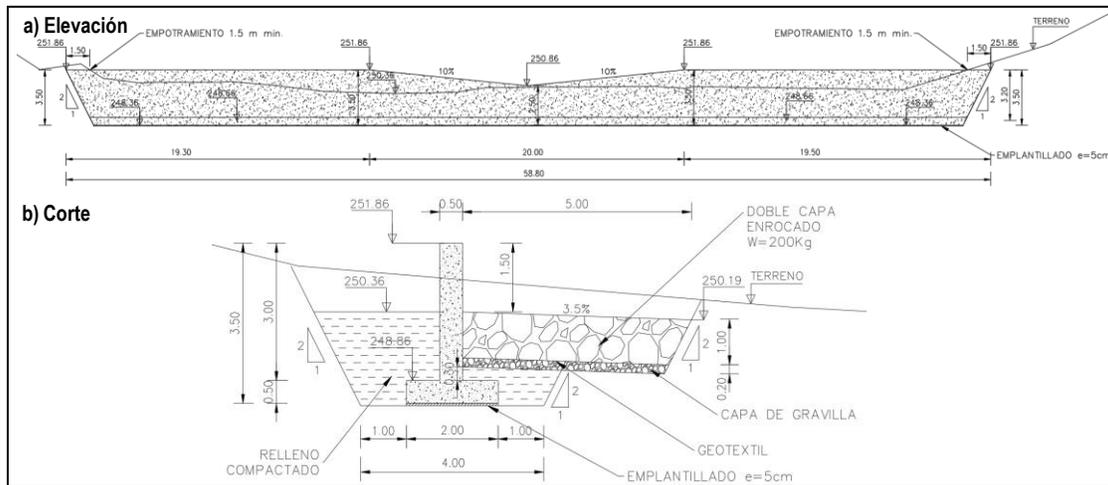
APRISA - AC INGENIEROS CONSULTORES LTDA.

Informe Final - Rev.0 Dic. 2022

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

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

Figura 11.3 Muro guardarradier



Para la protección de las fundaciones del muro ante la socavación se consulta un enrocado al pie a una profundidad mínima de 1 m a todo su lo largo (55,8) m abarcando una extensión en el sentido del escurrimiento de 5,5 m.

11.1.2. Pretilos de encauzamiento (PDE)

Estos pretilos de tierra corresponden a pequeñas barreras construidas con material aluvial compactado, extraído de empréstitos de la misma quebrada, cuya función es cerrar el paso del flujo por brazos menores, asegurando encauzarlo por el cauce principal hacia las hondonadas y pozas de retención de sólidos.

Se proyectaron 2 pretilos de encauzamiento de tierra (PDE), entre el muro guardarradier y el término del cono de deyección con la función de bloquear el paso del flujo por puntos bajos y reconducirlo a la hondonada ubicada aguas abajo del cono. La ubicación de los pretilos se señala en la Figura 11.2.

La Tabla 11.1 presenta las principales características geométricas de los PDE, donde se especifica la cota del umbral del pretil, ancho de coronamiento, largo, altura, talud de aguas arriba y talud de aguas abajo.

Tabla 11.1 Dimensiones de los pretilos de encauzamiento (PDE)

Variable	PDE	
	PDE N°1	PDE N°2
Cota umbral pretil	230,30	236,25
Ancho coronamiento	3,0	3,0
Largo	13,7	16,2
Altura	1,5	1,5
Talud aguas arriba (H:V)	2:1	2:1
Talud aguas abajo (H:V)	2:1	2:1

11.1.3. Muros de tierra (MT) y pozas de decantación.

Estas obras corresponden a barreras construidas como pretilos de tierra compactada que se ubicarán en la parte media del brazo norte, donde se encuentran las depresiones generadas por la actividad de extracción de áridos.

Sobre el coronamiento de estos muros se consulta la construcción de muros de aproximación y vertederos de evacuación con sus respectivos rápidos de descarga construidos en hormigón armado, aguas abajo de los cuales se proyectó una protección al pie mediante enrocados para evitar la socavación local del lecho.

Se proyectaron 5 muros de tierra para el cierre del brazo norte de la quebrada Bonilla (MT-N), con el objeto de formar pozas de decantación, tal como se observa en las Figura 11.1 y Figura 11.2.

En la Tabla 11.2 se muestran las dimensiones definidas de los muros de tierra, incluyendo los vertederos y rápidos de descarga, mientras que la Figura 11.4 muestra la vista en planta y un corte longitudinal típico de estas obras.

Tabla 11.2 Dimensiones muro de tierra (MT) y obras anexas

Variable	Unidades	Muros				
		MT-N1	MT-N2	MT-N3	MT-N4	MT-N5
Cota umbral pretil	msnm	216,80	210,5	199,8	189,55	175,1
Altura	m	4,50	4,50	4,50	4,50	3
Largo	m	118,370	83,120	106,030	95,950	106,480
Talud aguas arriba (H:V)	-	2:1	2:1	2:1	2:1	2:1
Talud aguas abajo (H:V)	-	2:1	2:1	2:1	2:1	2:1
Volumen de muro	m ³	1482	3824	7358	2155	4000
Volumen retenido	m ³	9331	13071	2839	8333	8430
Cota umbral vertedero	msnm	216,20	209,9	199,2	188,95	174,5
Ancho vertedero	m	10	10	10	10	10
Altura vertedero	m	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
Alto rápido de descarga	m	1	1	1	1	1
Ancho rápido de descarga	m	10	10	10	10	10
Peso nominal enrocado	kg	200	200	200	200	200
Ancho enrocado	m	14,4	14,4	14,4	14,4	-
Largo Enrocado	m	5	5	5	5	-

11.1.4. Canal unitario norte

El canal unitario norte conecta el rápido de descarga del muro MT-N5 y el canal unificado en una longitud de 880 m, según se observa en la Figura 11.2.

El canal es de hormigón armado con una sección rectangular de ancho de 6 m y altura variable entre 1 m y 1,3 m.

En la Figura 11.5 se muestra la sección transversal del canal unitario norte.

Figura 11.4 Planta del MT típico del brazo norte con corte del rápido de descarga

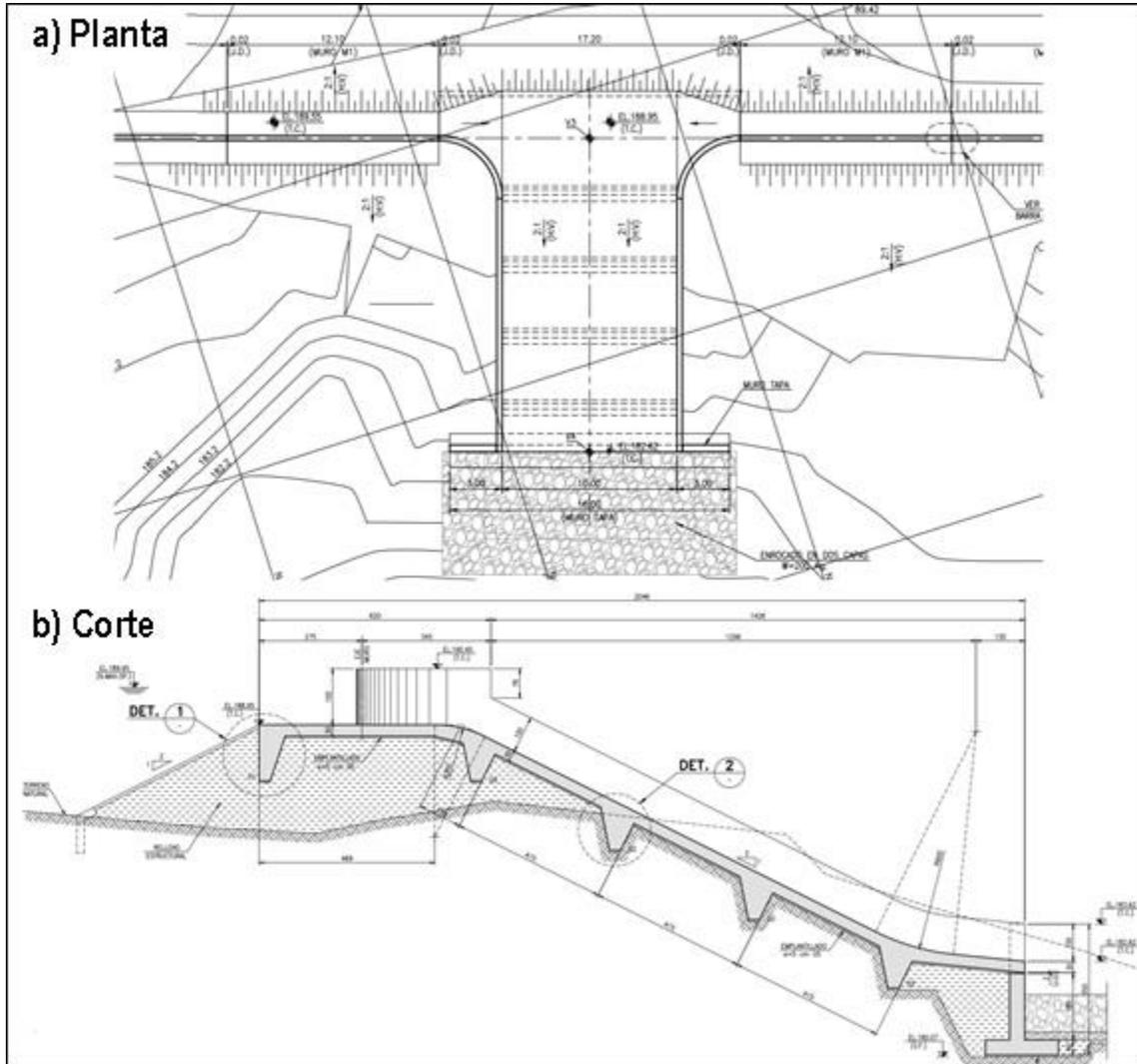
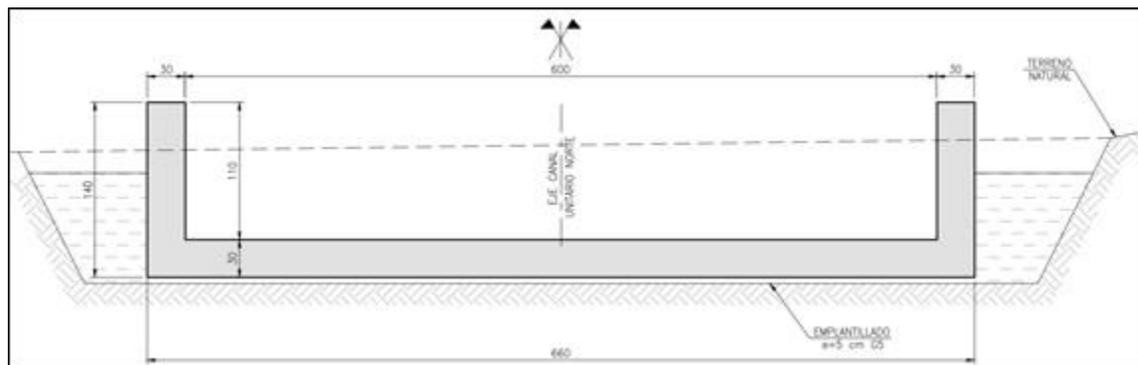


Figura 11.5 Sección canal unitario norte



En cuanto a las curvas del trazado, estas se diseñaron con radios de curvatura de 100 m, para las cuales se consideró una revancha adicional de hasta 0,25 m para contener las sobreelevaciones por el peraltamiento del flujo en el borde externo de dichas curvas.

La pendiente longitudinal del canal varía entre 1% y 15,2%. En los tramos de mayor pendiente se proyectaron gradas de bajada limitar las velocidades del escurrimiento.

11.2. BRAZO SUR

Las obras de control aluvional proyectadas para el tramo alto y bajo de la quebrada Bonilla se esquematizan en la Figura 11.6.

11.2.1. Muros estabilizadores de pendiente (MEP)

Los muros estabilizadores de pendiente son estructuras de hormigón armado con protección al pie contra la socavación, proyectados en la zona alta del brazo sur, aguas arriba de los conos de deyección de la quebrada, donde el cauce se encuentra confinado entre laderas. El objetivo de estos muros es retener el material proveniente de los flujos aluvionales, generando el “aterrazamiento” del lecho al reducir la pendiente longitudinal del cauce, quedando los sedimentos de mayor tamaño depositados sobre el lecho.

En la Figura 11.6 se muestra la disposición general de los 5 muros estabilizadores de pendiente (MEP) proyectados en la parte alta de la quebrada, cuyas dimensiones se resumen en la Tabla 11.3.

Tabla 11.3 Dimensiones muros estabilizadores de pendiente (MEP)

Variable	Unidades	Muros				
		MEP-1	MEP-2	MEP-3	MEP-4	MEP-5
Cota de coronamiento	msnm	258,48	252,75	248,5	244,9	240,06
Ancho de coronamiento	m	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Ancho basal	m	3,4	3,4	3,27	3,4	4,11
Altura	m	3,9	3,9	3,7	3,9	4,9
Largo	m	57,45	58,08	23,74	21,74	18,53
Profundidad de fundación	m	2,8	2,8	2,8	4,1	2,8
Peso nominal enrocado	kg	200	200	200	200	200
Ancho enrocado	m	29	29	14	12	17,73-14,74
Largo enrocado	m	5	5	5	5	5

En las Figura 11.7 y Figura 11.8 se muestran vistas en planta, de elevación y corte de los muros proyectados.

11.2.2. Encauzamiento del brazo sur aguas abajo de MEP

Se proyectó el perfilamiento del fondo del cauce entre los muros estabilizadores de pendiente y el muro de tierra S1, lo que permitirá conducir de manera controlada y dirigir el flujo aluvional hacia la depresión y poza de decantación, y evitando su dispersión sobre el cono de deyección de la quebrada.

Figura 11.6 Disposición general de las obras de control aluvional del brazo sur de la quebrada Bonilla

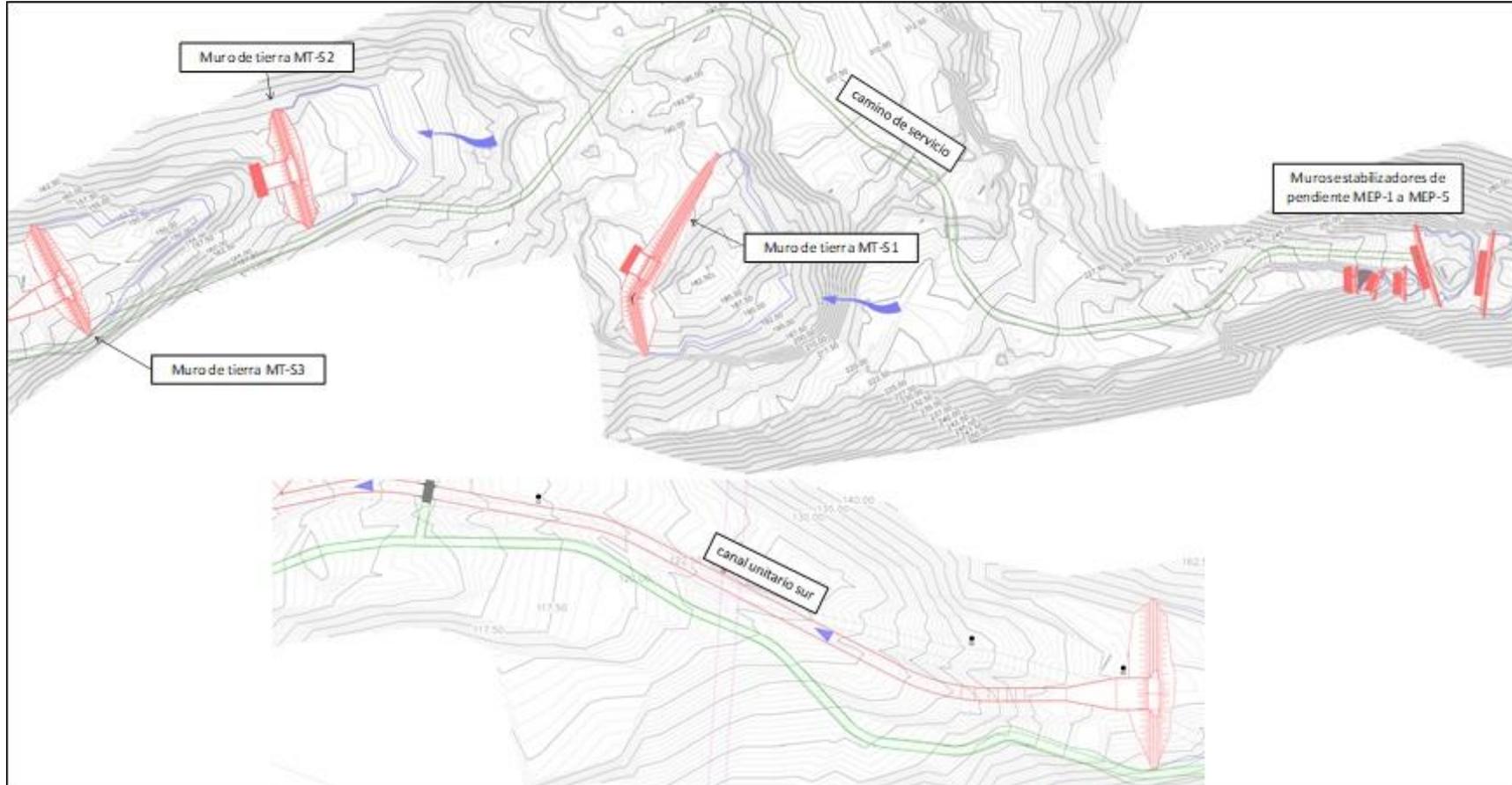


Figura 11.7 Planta y disposición general de muros estabilizadores de pendiente (MEP)

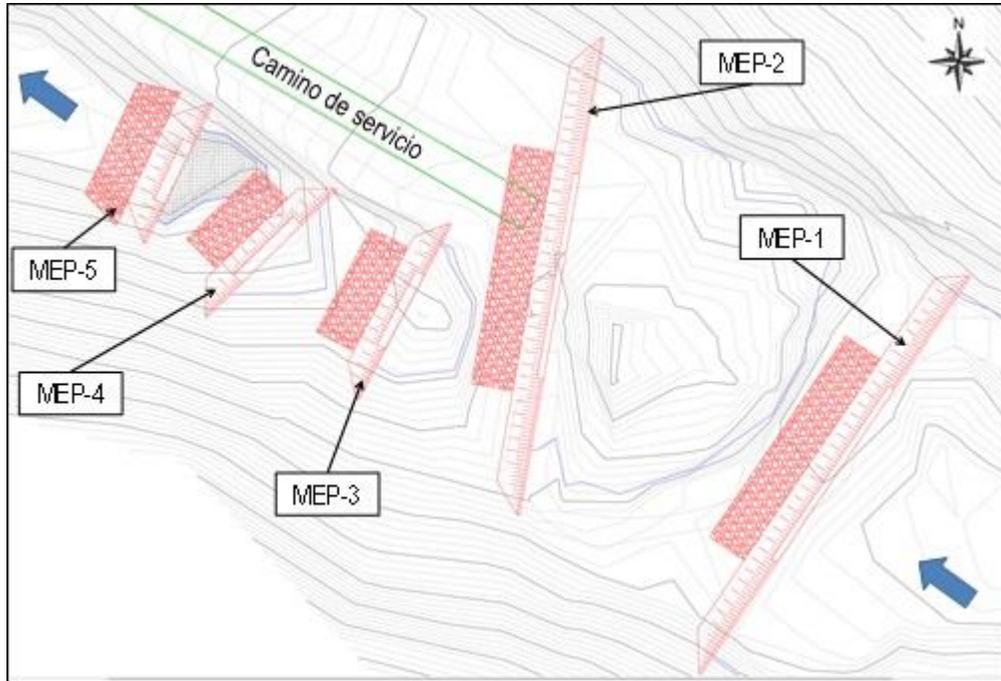
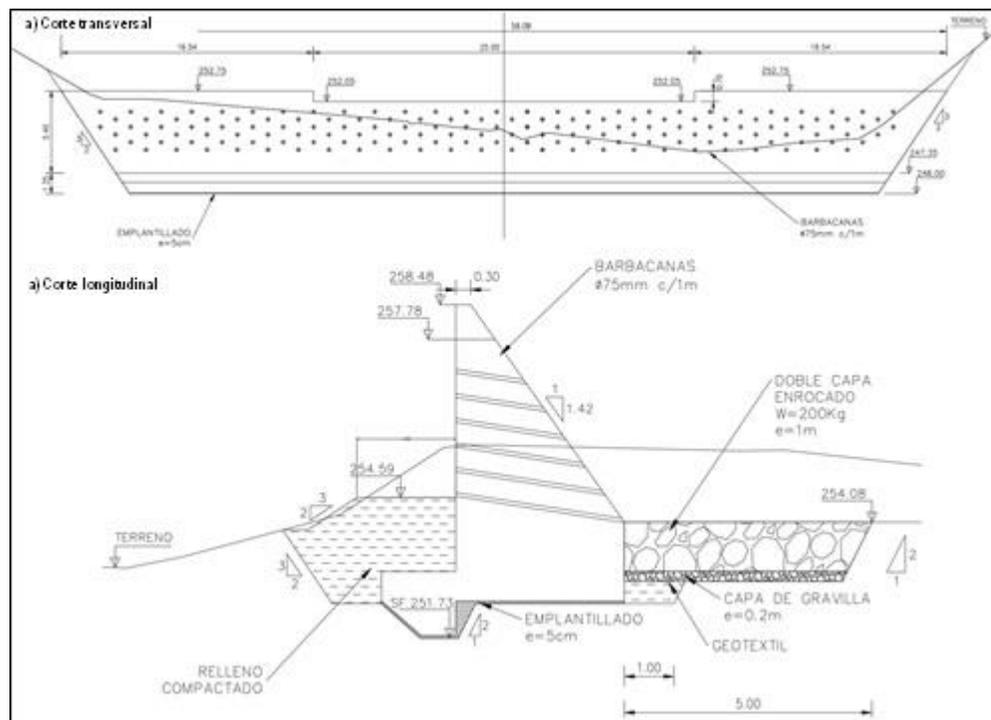


Figura 11.8 Corte transversal y longitudinal de los muros estabilizadores de pendiente (MEP)



En la Figura 11.16 se muestra la disposición de dicho encauzamiento, el que se extiende por una longitud de 332 m con un ancho basal entre 8 m y 12 m, con taludes en corte de 2:3 (H:V) y 3:2 para los taludes en terraplén. La pendiente longitudinal del cauce se proyectó entre 2,3% y 9%, en función de las características topográficas del terreno.

11.2.3. Muros de tierra (MT) y áreas de depositación

Estos muros son análogos en configuración y funciones a los descritos para el brazo norte de la quebrada. En el brazo sur de la quebrada se proyectaron tres muros de tierra (MT-S) con sus respectivos vertederos y rápidos de descarga, tal como se muestra en la Figura 11.16.

Las dimensiones de cada uno de estos muros y la información de detalle de las obras anexas se presentan en la Tabla 11.4, mientras que la planta y la sección transversal se muestran en la Figura 11.9.

Tabla 11.4 Dimensiones de los muros de tierra (MT) y obras anexas del brazo sur

Variable	Unidades	Muros		
		MT-S1	MT-S2	MT-S3
Cota umbral pretil	msnm	191,15	169,9	151,3
Altura	m	4,5	4,5	4,5
Largo	m	148,5	84,47	81,21
Talud aguas arriba (H:V)	-	2:1	2:1	2:1
Talud aguas abajo (H:V)	-	2:1	2:1	2:1
Volumen de muro	m ³	6459	4306	4487
Volumen retenido	m ³	29000	20530	7797
Cota umbral vertedero	msnm	190,55	169,3	150,7
Ancho vertedero	m	15	15	15
Altura vertedero	m	1,5	1,5	1,5
Alto rápido de descarga	m	1	1	1
Ancho rápido de descarga	m	15	15	15
Peso nominal enrocado	kg	200	200	200
Ancho enrocado	m	19,4	19,4	-
Largo Enrocado	m	5	5	-

11.2.4. Canal unitario sur

Esta obra es análoga a la proyectada sobre el brazo norte, y considera el mismo tipo de sección, materialidad y función.

Este canal se desarrolla entre la salida del rápido de descarga del MT-S3 y la confluencia con el canal unitario norte, según se aprecia en la Figura 11.6.

El canal unitario sur tiene una longitud de 440 m y una pendiente de fondo variable entre 4,6% y 10,5%. Al igual que para el canal unitario norte, en esta obra se proyectaron gradas de bajada para limitar las pendientes, a fin de lograr menores pendientes en el trazado.

Figura 11.10 Sección transversal del canal unitario sur

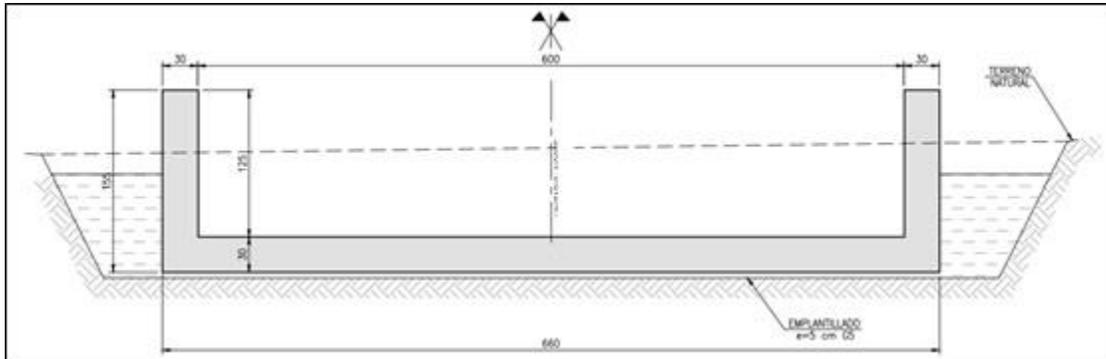
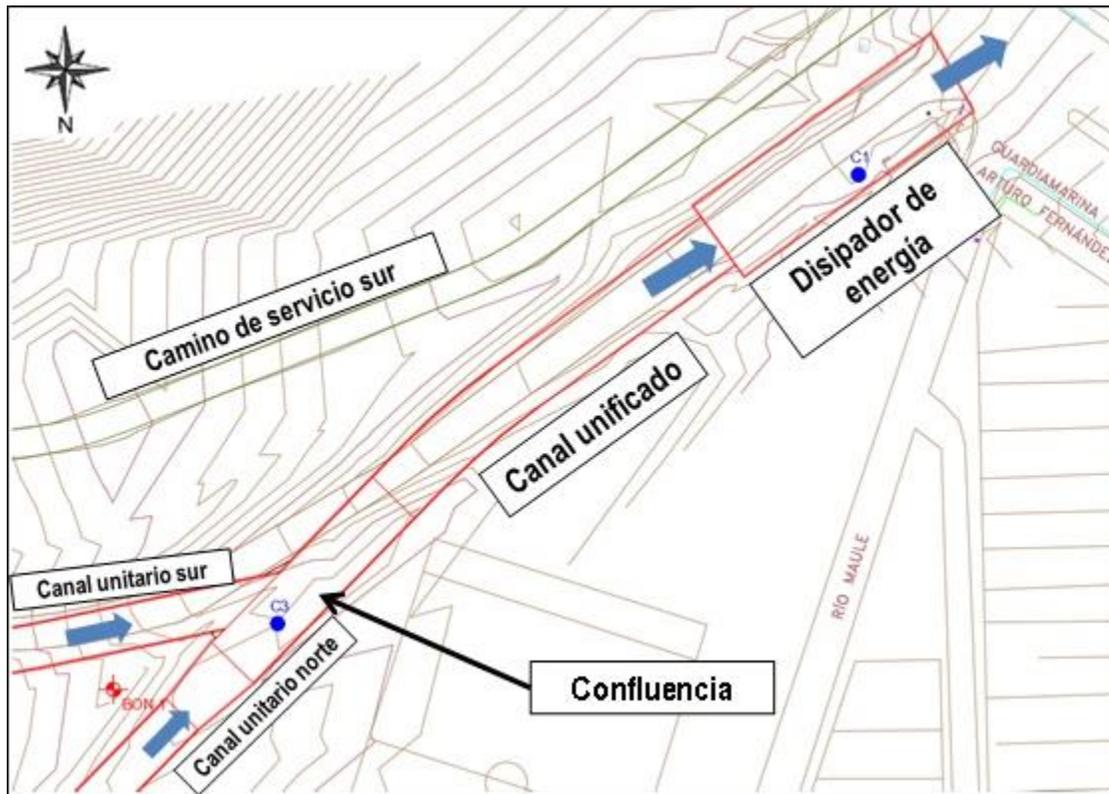


Figura 11.11 Disposición general de las obras del tramo común de la quebrada



11.3.1. Obra de confluencia

Esta obra consiste en una cubeta de sección rectangular construida en hormigón armado que recibe los flujos de los canales colectores unitarios norte y sur, disipando energía hidráulica del flujo aluvional diluido. La descarga de las aguas combinadas se realiza por medio del canal unificado de hormigón.

La obra de confluencia se compone por un ensanche gradual del canal unitario norte de 6 m a 8 m, con una grada de bajada de 2,34 m, al final de esta transición.

Aguas abajo la obra continúa con una cubeta de disipación rectangular de 8 m de ancho y alturas de muro que varían de 2,57 m a 3,46 m, sección que se extiende a lo largo de 32,3 m con un radier horizontal. Al inicio de la cubeta confluye oblicuamente el canal unitario sur.

El canal unitario sur descarga sobre esta cubeta de lecho horizontal, considerando una altura de caída de 2,57 m.

Hacia el final de la obra se consulta una grada de subida de altura 1 m, dando inicio al canal unificado que termina en la obra de disipación de energía antes de descargar las aguas del canal a la calle Guardiamarina Fernández.

En la Figura 11.12 se muestra la vista en planta y perfil longitudinal de la confluencia, mientras que la Figura 11.13 detalla un corte transversal de la obra.

Figura 11.12 Vista en planta y perfil longitudinal de la Confluencia

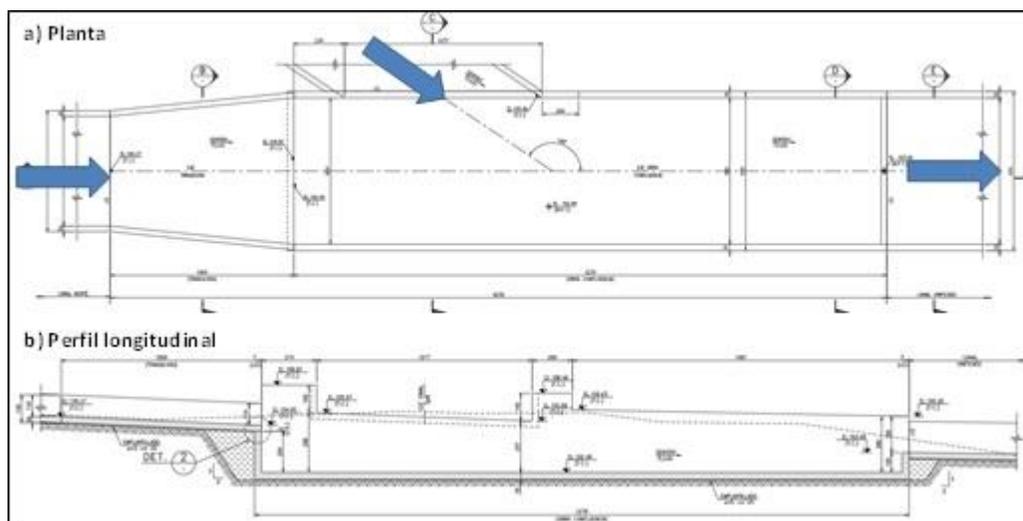
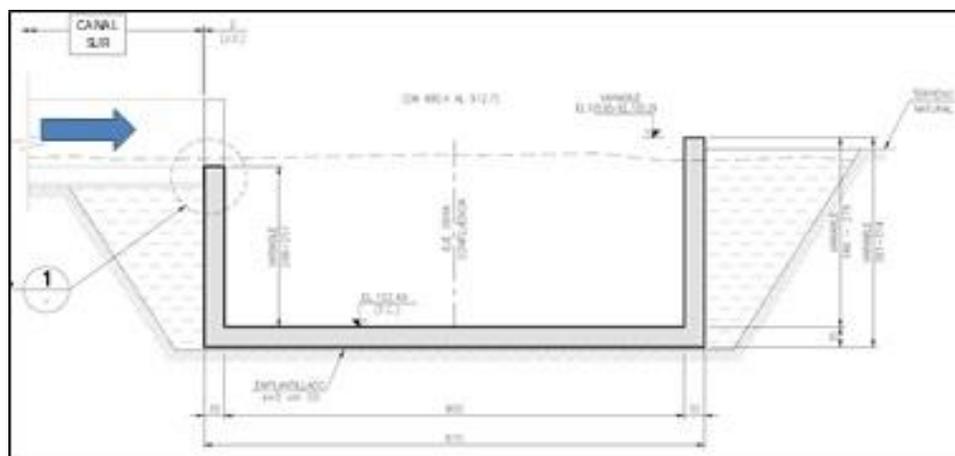


Figura 11.13 Sección transversal de la confluencia



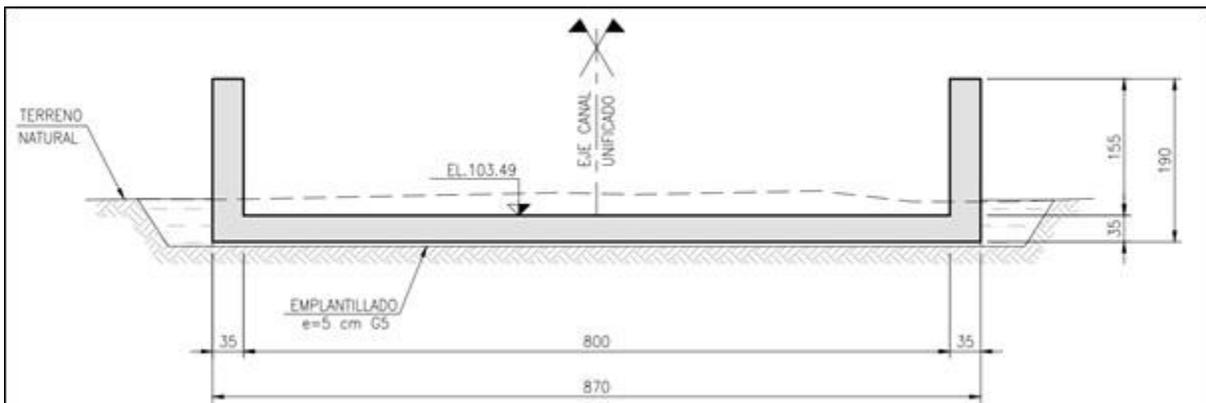
11.3.2. Canal unificado

Esta obra corresponde a un canal proyectado en hormigón armado de sección rectangular, similar a los canales unitarios norte y sur, cuya función es recibir el flujo proveniente de los canales antes mencionados para descargarlo en el dissipador de energía, donde termina el canal.

El canal mencionado tiene una longitud de 47,56 m medido entre el término de la obra de confluencia de los canales unitarios y el dissipador de energía como se muestra en la Figura 11.11 y se proyectó con una pendiente longitudinal de 1,6%.

Este canal también es de hormigón armado y sección rectangular, con ancho de 8 m y 1,55 m de alto, tal como se indica en la Figura 11.14.

Figura 11.14 Sección transversal del canal unificado



11.3.3. Dissipador de energía

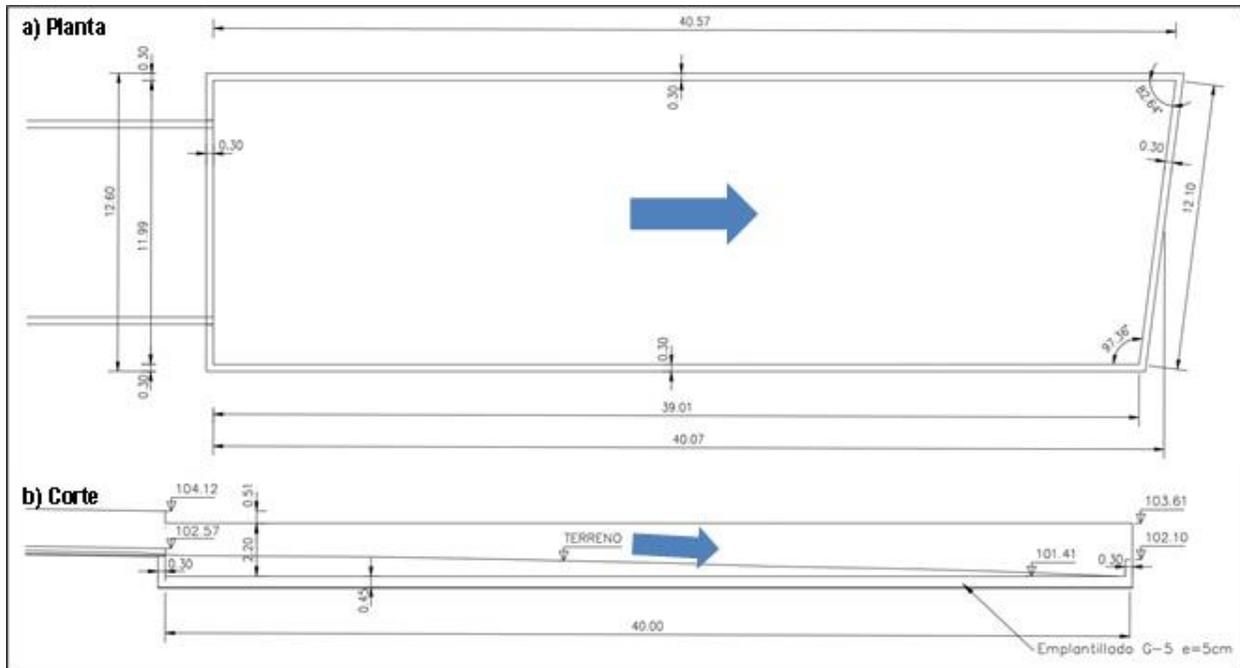
Esta obra se ubica al término del canal unificado y descarga el flujo controladamente hacia la calle Guardiamarina Fernández, la que a su vez se conecta con la vía aluvional Nicolás Tirado.

Consiste en una cubeta de cubeta de hormigón armado, de sección rectangular construida en hormigón armado que tiene por finalidad disipar el exceso de energía del flujo aluvional diluido proveniente del canal unificado y descargar el flujo de manera controlada hacia la la calle Guardiamarina Fernández.

En planta se observa una forma trapezoidal, de 20 m de ancho, y una longitud de 40,57 m para el lado largo y 39,00 m para el lado corto. Su altura es de 2,2 m.

En la Figura 11.15 se muestra una vista en elevación y un corte longitudinal de la obra.

Figura 11.15 Planta y perfil longitudinal del dissipador de energía



11.4. CAMINOS DE SERVICIO

Este camino tiene como objetivo permitir el tránsito de camiones y maquinaria para la operación y/o mantenimiento de las obras.

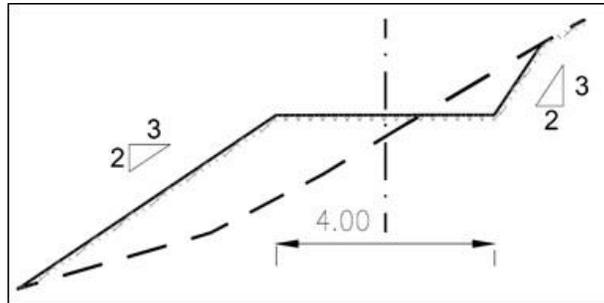
Su trazado completo se observa en la Figura 11.2 y Figura 11.6 de disposición general de las obras de los brazos norte y sur.

Fue proyectado en terreno natural, compensando cortes y rellenos para minimizar los movimientos de tierra., proyectado con el perfil tipo que grafica la Figura 11.16.

Cabe tener presente que según la experiencia en otras quebradas que ya cuentan con obras de control aluvional, la presencia de los caminos de servicio, sin un debido control en su acceso, ha facilitado el paso de terceros lo que ha derivado en el uso de los cauces y de las obras, como botaderos de basura y/o asentamientos humanos ilegales.

Este camino se consulta con un ancho de 4 m para la carpeta de rodado, con terraplenes de relleno 3:2 (H:V) y cortes con talud de 2:3.(H:V).

Figura 11.16 Sección tipo del camino de servicio norte



12. MODELACIÓN NUMÉRICA Y DISEÑO HIDRÁULICO

Con el fin de analizar el comportamiento hidráulico de la quebrada Bonilla y a partir de ello determinar las áreas de inundación asociadas a crecidas detriticas de $T=100$ años de periodo de retorno, considerando la situación actual, sin proyecto, y futura, con proyecto de control aluvional, que resultan de la intervención de la quebrada con la infraestructura de proyectada, se realizó la modelación hidráulica de ambos brazos de la quebrada mediante modelos HEC-RAS 1D y 2D.

En base a las simulaciones realizadas, se llevó a cabo el diseño de las obras de control aluvional, como también de las obras hidráulicas especiales proyectadas que forman parte integral del conjunto de obras de control aluvional como rápidos de descarga, protecciones contra la socavación, canales unitarios y canal unificado, y obras de confluencia y de disipación de energía.

En el Anexo X “Descripción del proyecto y diseño hidráulico” del presente informe se incluyen detalladamente todos los antecedentes de la modelación de la quebrada Bonilla con proyecto y el diseño hidráulico de las obras.

12.1. MODELACIÓN HEC-RAS

Para la situación sin proyecto se elaboró en HEC-RAS un modelo 2D.

Para la situación con proyecto se elaboraron en HEC-RAS tres modelos 2D y dos modelos 1D.

Los modelos 2D permitieron simular hidráulicamente escurrimientos bidimensionales en los brazos norte y sur y en el tramo común aguas debajo de la confluencia, considerando la siguiente información de entrada:

- El Modelo Digital de Terreno (MDT), el cual define la geometría básica para el escurrimiento bidimensional.
- Las dimensiones de la grilla que representa las unidades que caracterizan el dominio espacial del modelo y el intervalo temporal de las simulaciones.
- Las condiciones de borde de la malla de modelación o dominio computacional.
- El hidrograma de la crecida a la entrada del dominio lo cual define las condiciones iniciales del flujo en régimen impermanente.

- El coeficiente de Manning para incorporar la rugosidad de los distintos tipos de superficie definidos en el dominio computacional.

Por su parte, los modelos 1D permitieron caracterizar el flujo gradualmente variado en régimen permanente en los canales, considerando la siguiente información de entrada:

- El trazado en planta.
- La geometría de las secciones transversales y las pendientes a lo largo del trazado.
- La rugosidad de Manning para las superficies.
- El caudal peak con período de retorno 100 años.

Dentro de las variables de salida que caracterizan el escurrimiento de ambos modelos, se tienen los siguientes:

- Eje hidráulico.
- Variables hidráulicas del flujo como velocidades, profundidades, trayectorias de las partículas (2D), etc.
- Hidrogramas de salida (modelos 2D).
- Volúmenes de acumulación asociados a dichos hidrogramas (modelos 2D).

Los modelos HEC-RAS elaborados incorporaron las obras emplazadas en el cauce de los brazos norte y sur de la quebrada Bonilla descritas precedentemente.

12.2. HIDROGRAMAS DE CRECIDA

Los hidrogramas detríticos utilizados en el modelo consideran los caudales peak con valores peak líquidos de 8,5 m³/s y 13 m³/s para los brazos norte y sur, respectivamente, los que se calcularon en el “Anexo VI Análisis hidrológico con componente de cambio climático”.

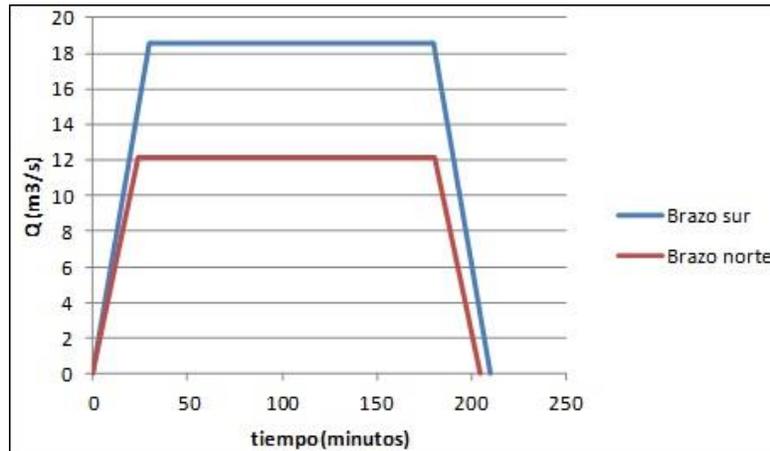
En cuanto a la concentración volumétrica de sólidos, se adoptó un valor de 30%, resultando así caudales peak detríticos de 12,1 m³/s y 18,6 m³/s para los brazos norte y sur de la quebrada Bonilla.

Para los modelos de los brazos norte y sur se utilizaron hidrogramas detríticos de crecida trapeciales, con los valores de caudal peak mencionados antes y tiempo al peak igual a los tiempos de concentración de ambos afluentes (24 minutos para el brazo norte y 30 minutos para el brazo sur).

Los caudales peak al inicio de los canales colectores se extrajeron de los resultados de las simulaciones del brazo norte y sur, realizando la respectiva corrección del valor peak por la reducción en la concentración volumétrica de sólidos al 15%, dada la retención de sólidos aguas arriba de los muros de tierra.

En la Figura 12.1 se muestran los hidrogramas detriticos de crecida, donde se indica en color azul el correspondiente al brazo sur y en color rojo al brazo norte de la quebrada Bonilla.

Figura 12.1 Hidrogramas de crecida detritico, quebrada Bonilla



12.3. SITUACIÓN SIN PROYECTO SIMULACIONES APLICANDO LOS MODELOS 2D Y 1D

12.3.1. Resultados de las simulaciones

A continuación se resumen los resultados de las simulaciones considerando los modelos descritos en el capítulo anterior, para los brazos norte, sur y el tramo en común con los canales y obra disipadora.

Se analizaron principalmente los resultados asociados al caudal peak de la crecida detritica de periodo de retorno 100 años, entre los que se incluyen los que se señalan a continuación:

- Áreas de inundación.
- Líneas de corriente de partículas.
- Profundidades del escurrimiento.
- Velocidad del escurrimiento.
- Hidrogramas en diferentes secciones de interés.

A partir de dichos resultados se analizó el comportamiento hidráulico de las quebrada Bonilla ante una crecida aluvional de periodo de retorno $T= 100$ años.

12.3.2. Áreas de inundación y líneas de corriente

12.3.2.1. Brazo norte

La Figura 12.2 grafica el área de inundación para el escenario sin proyecto en el brazo norte, a partir de la cual se visualiza la formación de un pequeño brazo el cual conduce el flujo hacia el cruce entre calles Cabo Juan Bolívar y Circunvalación Norte.

12.3.2.2. *Brazo sur*

Para el brazo sur el área de inundación se muestra en la Figura 12.3. A diferencia de la inundación del brazo norte, en este caso el flujo es contenido enteramente por el cauce y las áreas contiguas sin desviarse.

12.3.2.3. *Tramo de aguas abajo de la confluencia y descarga a calle Guardiamarina Fernández*

El área de inundación aguas abajo de la confluencia de ambos brazos se muestra en la Figura 12.4, donde se observa que la crecida aluvional inunda longitudinalmente sobre la calle Río Maule, antes de descargar definitivamente sobre el plano urbano en la calle Guardiamarina Arturo Fernández.

12.3.3. **Profundidades de los flujos**

12.3.3.1. *Brazo norte*

Para el brazo norte, las profundidades experimentadas en el flujo se muestran en la Figura 12.5.

Como se observa de la figura anterior, en el sector de las hondonadas se presentan pozones donde el flujo se acumula, alcanzado profundidades de hasta 6 m.

Esto se debe a la extracción y remoción de suelo debido a la explotación de áridos, según se consigna en el Anexo V “Trabajos topográficos”.

12.3.3.2. *Brazo sur*

De manera similar, para el brazo sur se muestran las profundidades de los flujos en la Figura 12.6.

Como se observa de la imagen anterior, en el sector de las hondonadas se verifican profundidades de hasta 8 m.

12.3.3.3. *Confluencia*

En la Figura 12.7 se muestran las profundidades de los flujos, para el tramo de aguas abajo de la confluencia de ambos brazos, donde las profundidades máximas alcanzan los 2 m, mientras que aguas abajo de la descarga las profundidades sobre las vías de escurrimiento son del orden de 20 cm.

Figura 12.2 Área de inundación en brazo norte para escenario sin proyecto

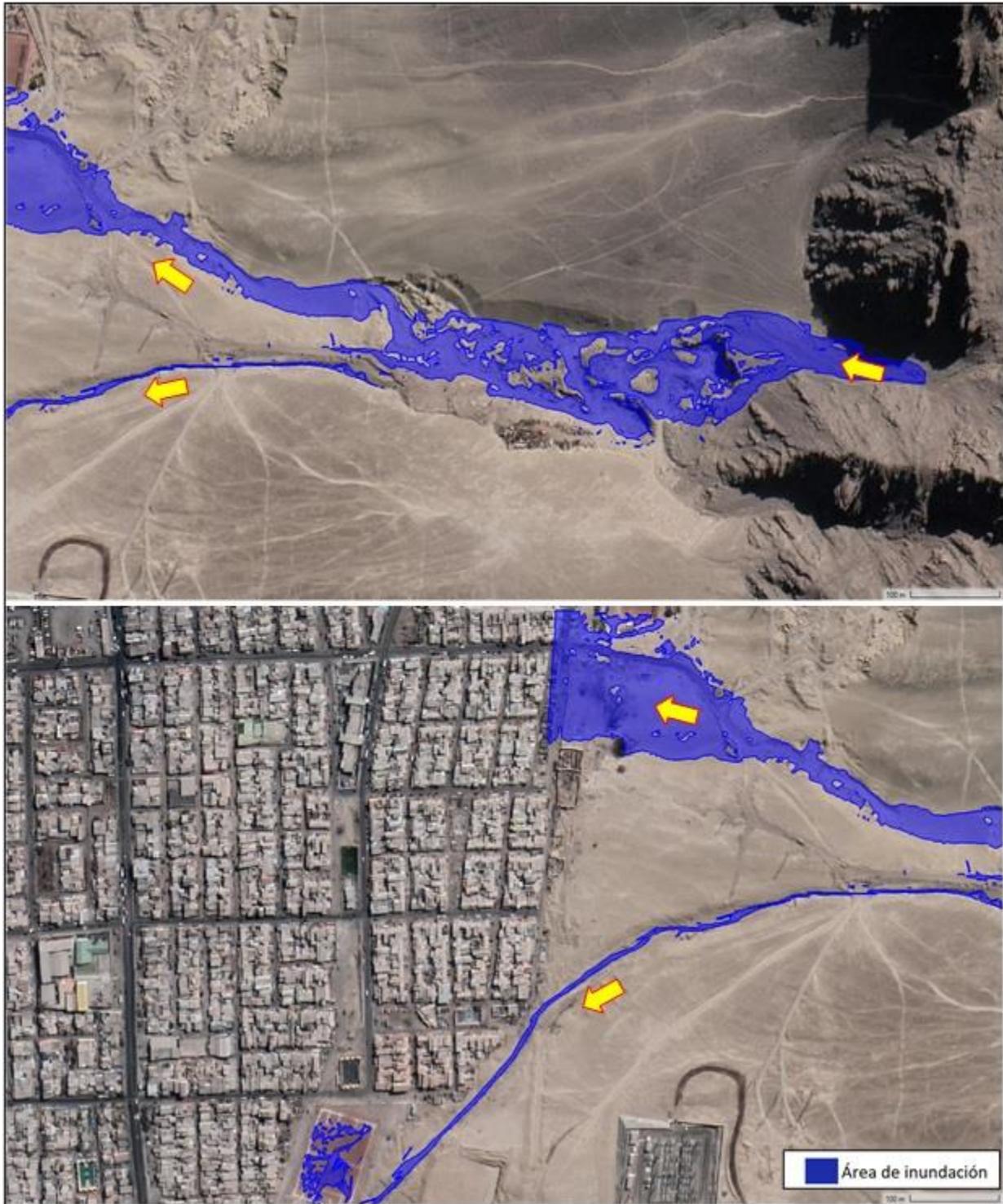


Figura 12.3 Área inundación en brazo sur para escenario sin proyecto

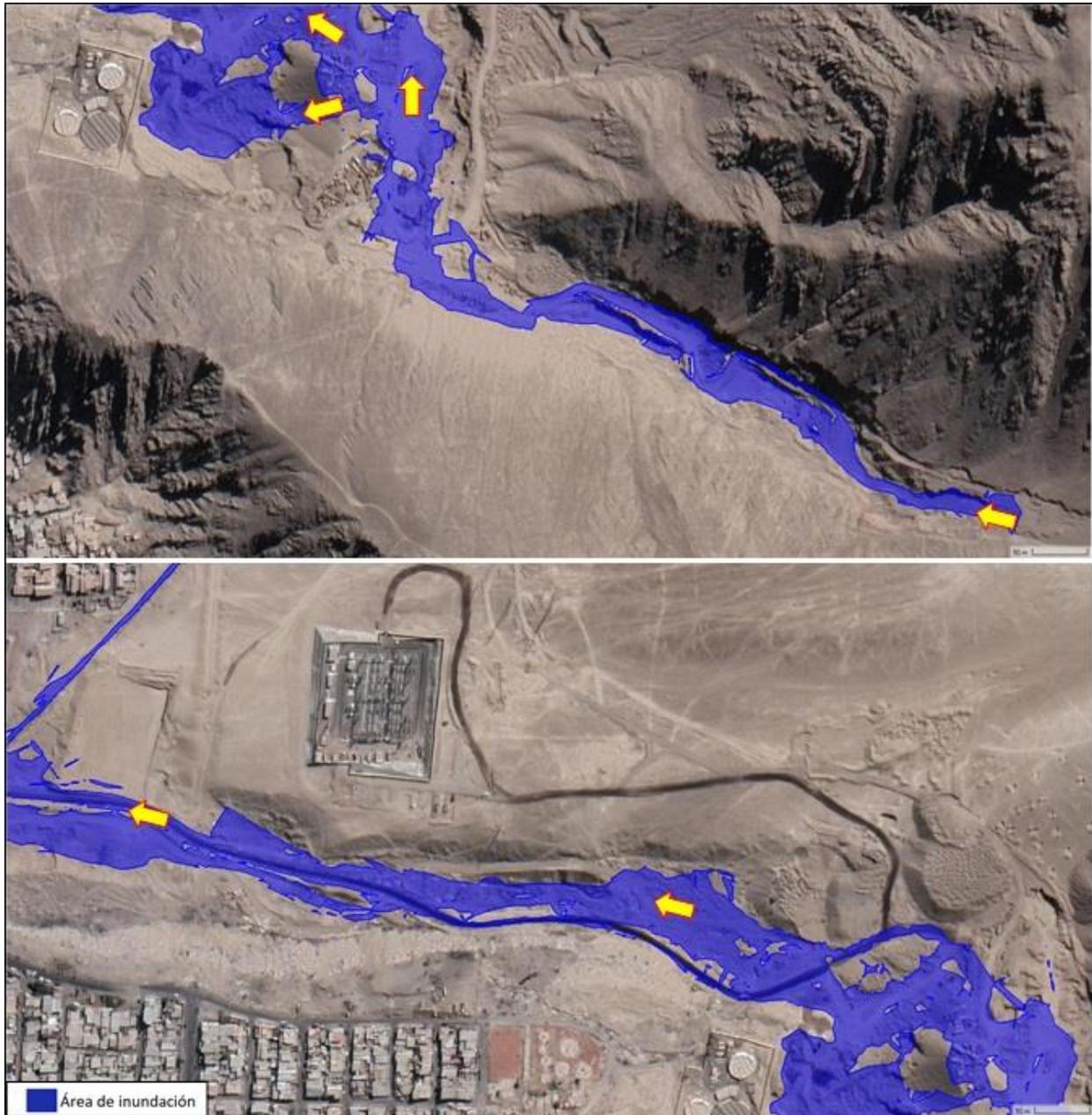


Figura 12.4 Área inundación en confluencia para escenario sin proyecto

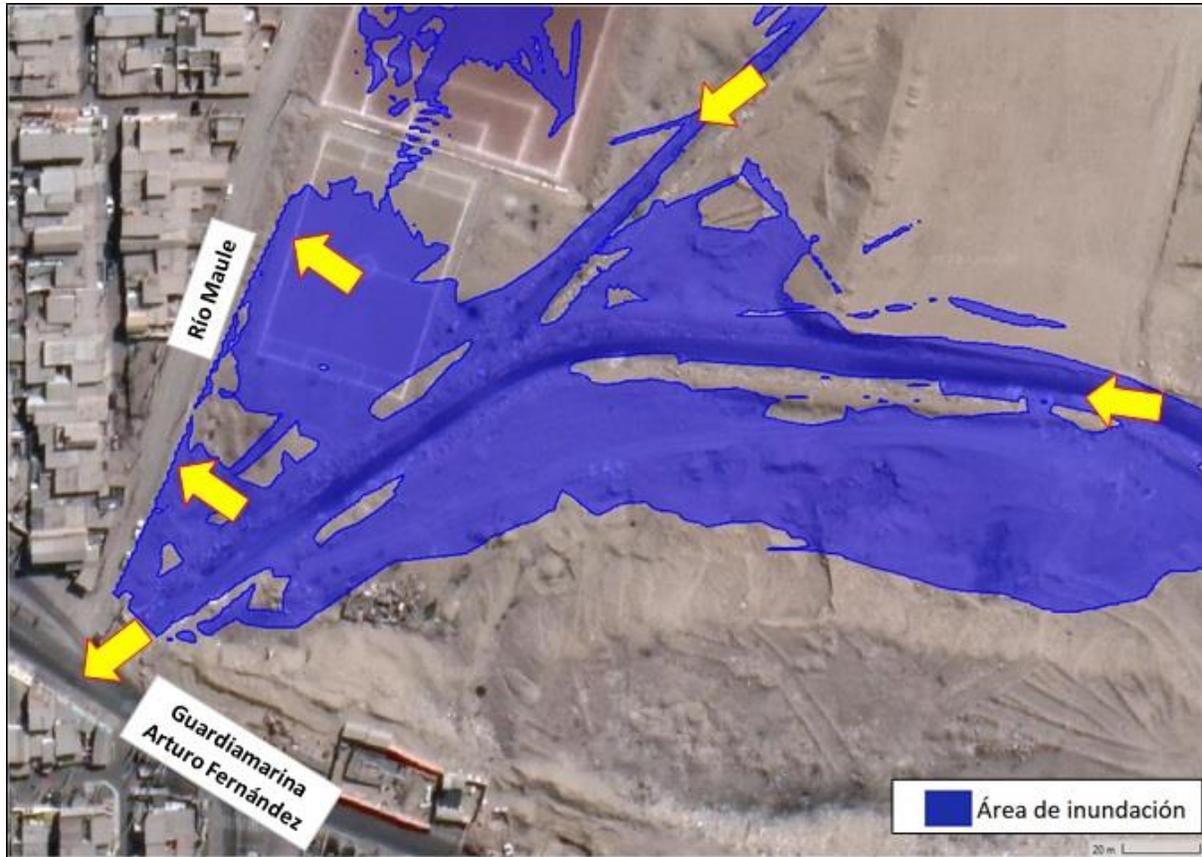


Figura 12.5 Profundidades en brazo norte para escenario sin proyecto

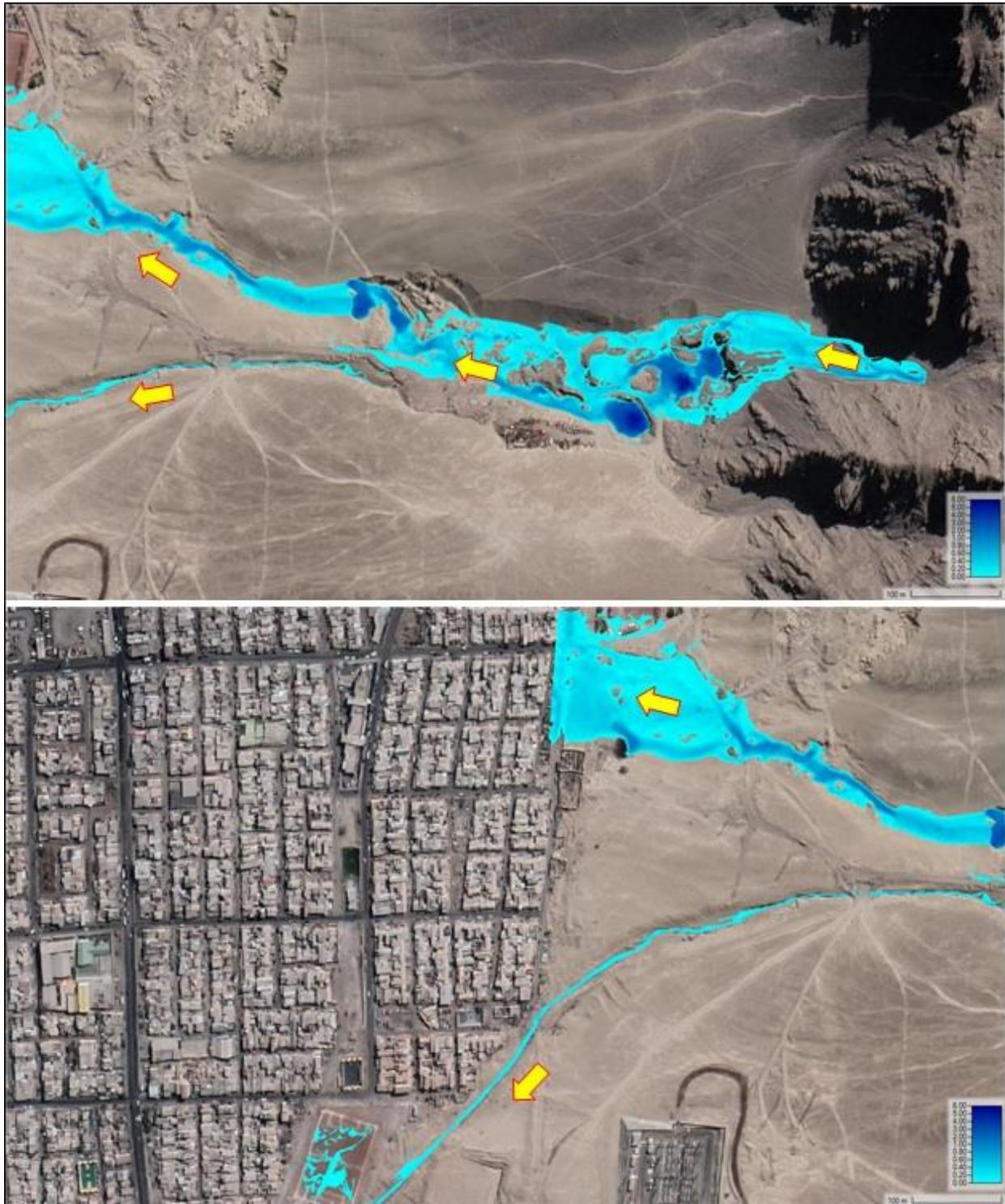


Figura 12.6 Profundidades en brazo sur para escenario sin proyecto

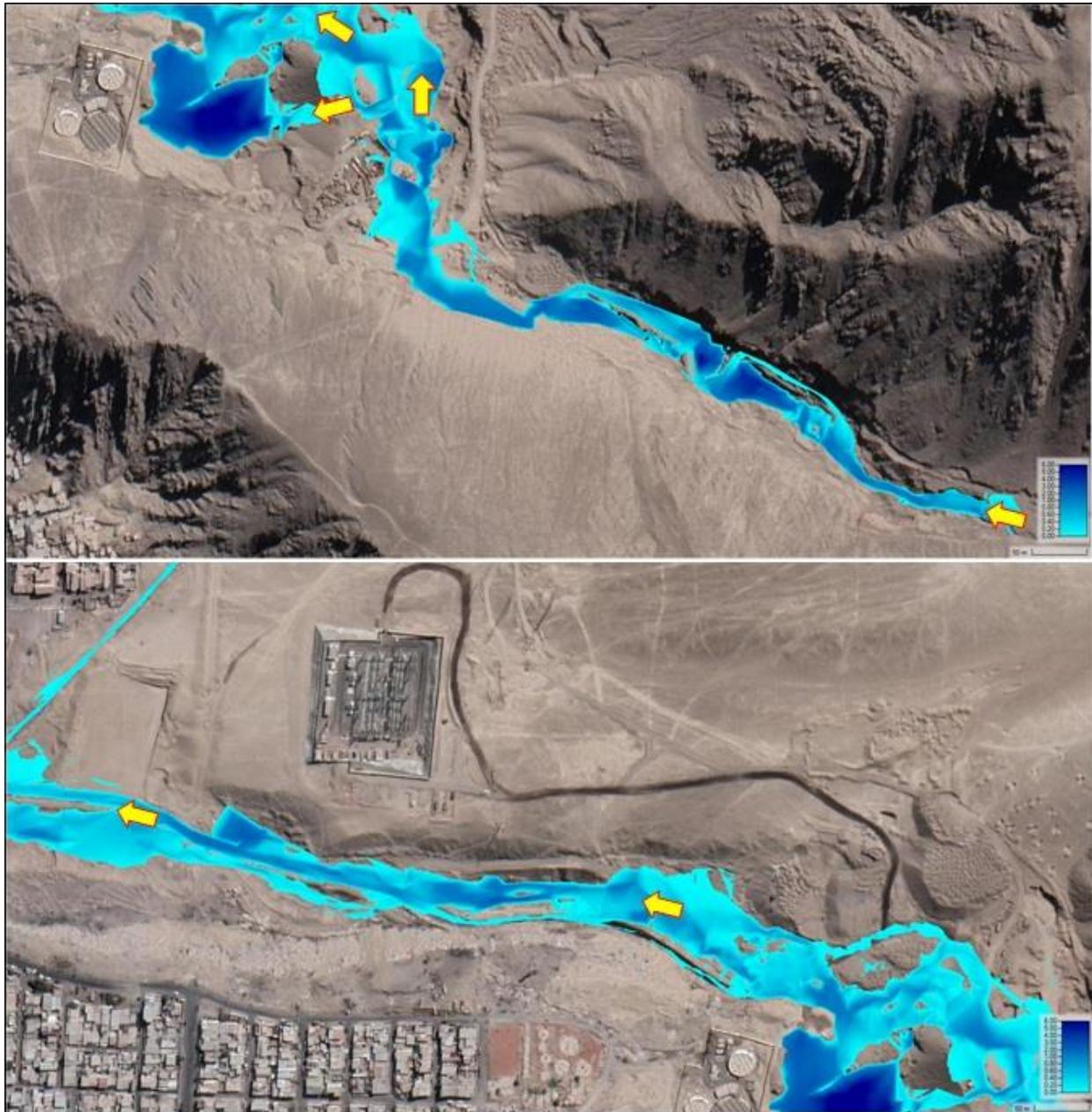
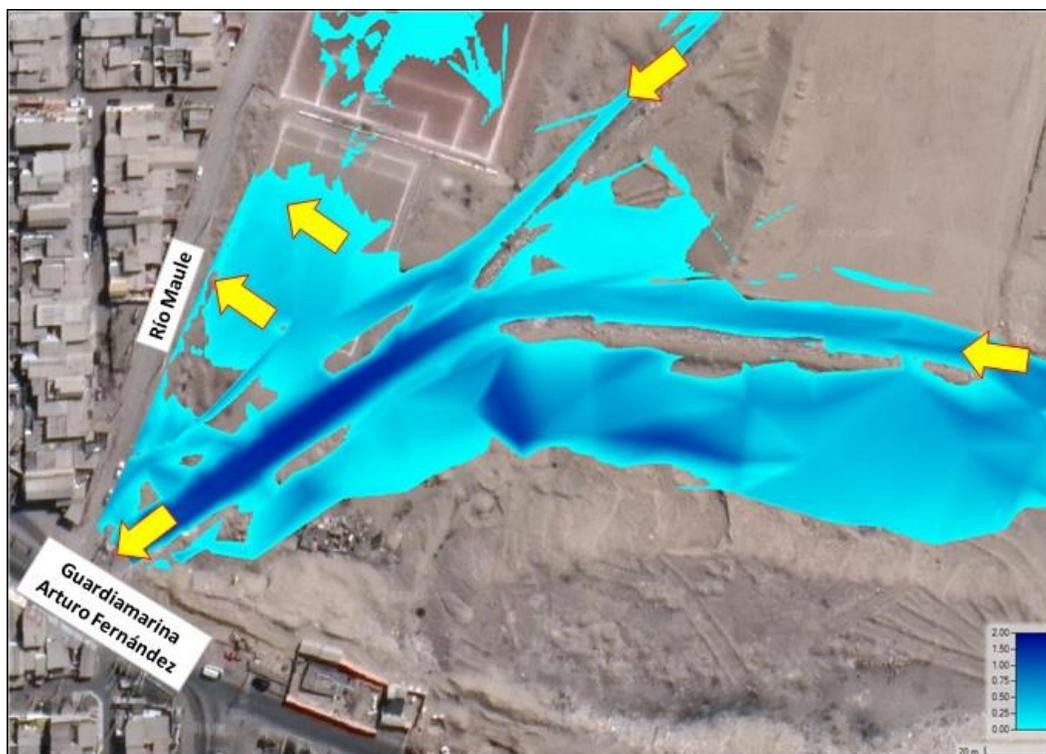


Figura 12.7 Profundidades en confluencia para escenario sin proyecto



12.4. SITUACIÓN CON PROYECTO SIMULACIONES APLICANDO LOS MODELOS 2D Y 1D

12.4.1. Hidrogramas de crecida

Los hidrogramas detríticos utilizados en el modelo consideran los caudales peak con valores peak mencionados antes.

En cuanto a la concentración volumétrica de sólidos, se adoptó un valor de 30%, resultando así caudales peak detríticos de 12,1 m³/s y 18,6 m³/s para los brazos norte y sur de la quebrada Bonilla.

Sin embargo, los caudales peak al inicio de los canales colectores se extrajeron de los resultados de las simulaciones del brazo norte y sur, realizando la respectiva corrección del valor peak por la reducción en la concentración volumétrica de sólidos al 15%, dada la retención de sólidos aguas arriba de los muros de tierra.

12.4.2. Resultados de las simulaciones

A continuación se resumen los resultados de las simulaciones considerando los modelos descritos en el capítulo anterior, para los brazos norte, sur y el tramo en común con los canales y obra disipadora.

Se analizaron principalmente los resultados asociados al caudal peak de la crecida detrítica de periodo de retorno 100 años, entre los que se incluyen.

- Áreas de inundación.
- Líneas de corriente de partículas.
- Profundidades del escurrimiento.
- Velocidad del escurrimiento.
- Hidrogramas en diferentes secciones de interés.

A partir de dichos resultados se verificó el funcionamiento hidráulico de las obras proyectadas, cuantificando además la capacidad de almacenamiento de las quebradas considerando las hondonadas y las pozas de decantación proyectadas sobre el cauce.

12.4.3. Áreas de inundación y líneas de corriente (Con proyecto)

12.4.3.1. Brazo norte

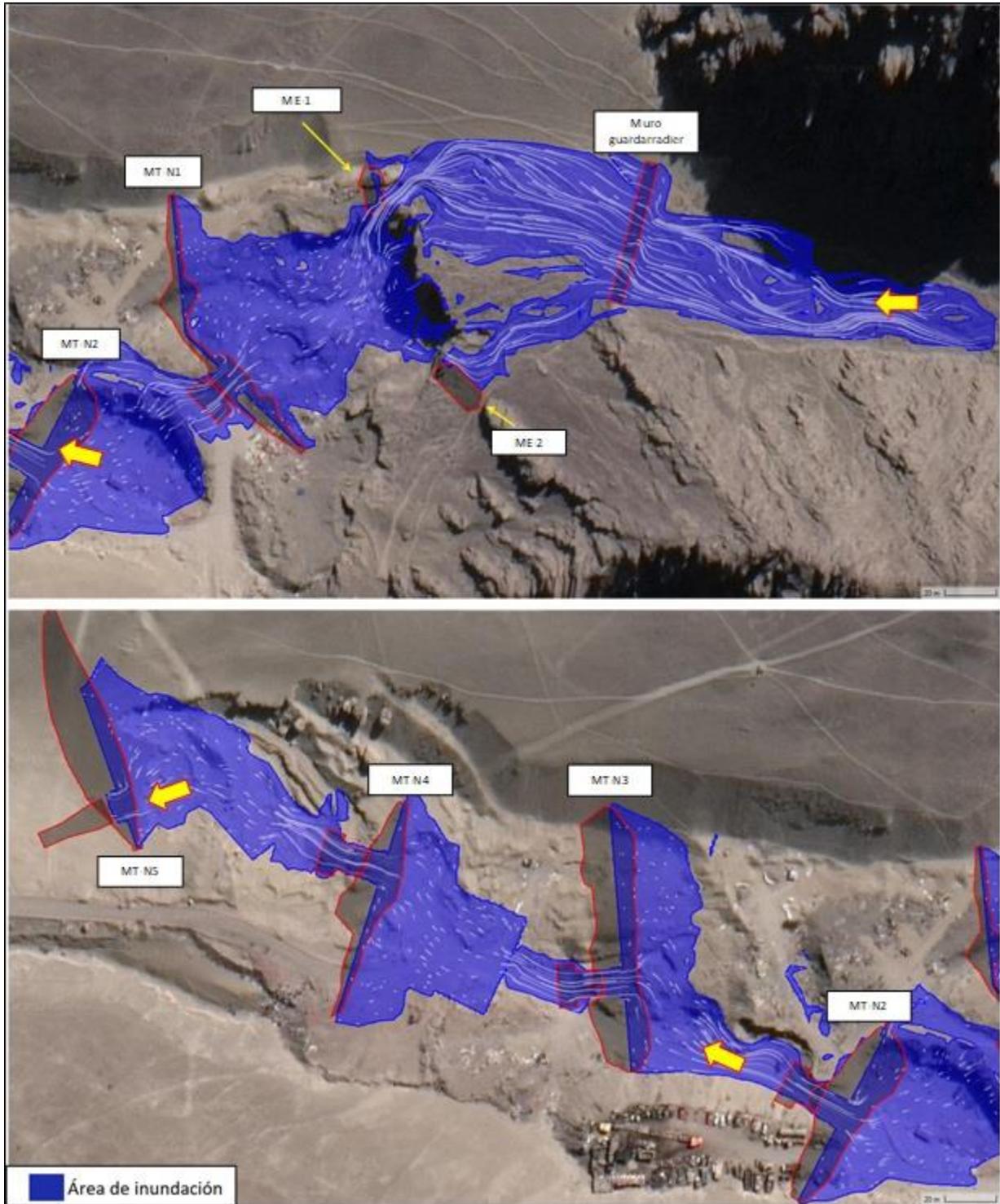
En la Figura 12.8 se muestra el área de inundación y las líneas de corriente del brazo norte de la quebrada Bonilla, la cual en la primera imagen incluye el tramo alto del cauce desde el segundo muro de tierra hacia aguas arriba, es decir, incorpora los muros de tierra MT-N1 y MT-N2, los pretilos de desvío PDE-1 y PDE-2 y un sector del tramo aguas arriba del muro guardarradier, incluyendo este muro. La imagen de abajo de esta figura muestra además los muros de tierra MT-N3, MT-N4 Y MT-N5, este último con descarga al canal unitario norte.

Se observa que la inundación abarca una superficie de 3,1 ha, apreciándose que la presencia de las obras canaliza el escurrimiento entre los distintos muros de tierra lo cual permite aprovechar, a su vez, los volúmenes disponibles debido a las hondonadas existentes.

Respecto de las líneas de corriente, en el sector norte de la parte alta del cauce se observa una alta densidad de las líneas de corriente, concluyéndose que el flujo se concentra en esta zona, para luego verter hacia la hondonada que es cerrada por el MT-N1.

Hacia aguas abajo se observa que el escurrimiento se concentra en la zona de descarga de los vertederos de cada muro de tierra, verificándose de esta manera la efectividad de las obras.

Figura 12.8 Área de inundación y líneas de corriente del brazo norte de la quebrada Bonilla



12.4.3.2. Brazo Sur

En la Figura 12.9 se muestra el área de inundación y líneas de corriente del brazo sur de la quebrada, la que en la primera imagen incluye el muro de tierra MT-S1, el encauzamiento y aguas arriba los 5 muros estabilizadores de pendiente (MEP), en tanto en la segunda, los muros de tierra MT-S2 y MT-S3, este último con descarga al canal unitario sur. La superficie de inundación es en este caso de 4,9 ha.

Se observa que las áreas de inundación se concentran entre los muros de tierra N°1 y N°2 y que la mayor concentración de líneas de corriente se sitúa en el encauzamiento proyectado aguas abajo de los muros estabilizadores de pendiente e inmediatamente después de éste, en su descarga sobre el área de depositación aguas arriba del MT-S1.

12.4.3.3. Descarga en el plano urbano

En la Figura 12.10 se muestra el área de inundación y líneas de corriente de la descarga del canal unificado sobre la calle Guardiamarina Arturo Fernández, observándose que el flujo detrítico anega, en el sector norte, la calle Río Maule y el pasaje Solón Salas Fuentealba, mientras que, hacia el sur, se anega la calle Julio Montt Salamanca. Las líneas de corriente revelan que el flujo se concentra sobre la calle Arturo Guardiamarina Fernández, para luego descargar sobre el cruce de la Avenida Bonilla y la calle Nicolás Tirado, la cual por la densidad y dirección de las líneas de corriente se constituye en la vía de escurrimiento principal dentro del plano urbano.

12.4.4. Profundidades de los flujos

12.4.4.1. Brazo norte

En la Figura 12.11 se muestran las profundidades del escurrimiento en el brazo norte de la quebrada Bonilla, apreciándose que para la parte alta, aguas arriba del muro guardarradier, se alcanzan valores de hasta 1,2 m.

Aguas abajo del muro guardarradier se observa que el flujo se extiende por el cono de deyección de la quebrada, concentrándose en el sector norte hasta verter hacia la hondonada que es cerrada por el MT-N1, donde se observan profundidades de hasta 6,9 m. Entre los MT-N1 y MT-N2 se observa una hondonada que alcanza una profundidad de 9 m, siendo ésta la mayor profundidad alcanzada por el flujo en el brazo norte. Aguas arriba de los MT-N4 y MT-N5 se observa el sitio que ocupan los empréstitos alcanzan profundidades de hasta 6,3 m, aumentando de esta manera la capacidad de almacenamiento de las pozas de decantación.

En cuanto a la altura de escurrimiento junto a los muros de tierra, se verifican revanchas entre 47 cm y 59 cm entre el eje hidráulico y el coronamiento de los muros, verificándose de esta manera el correcto dimensionamiento y funcionamiento de los vertederos ubicados sobre cada muro.

Figura 12.9 Área de inundación y líneas de corriente del brazo sur de la quebrada Bonilla

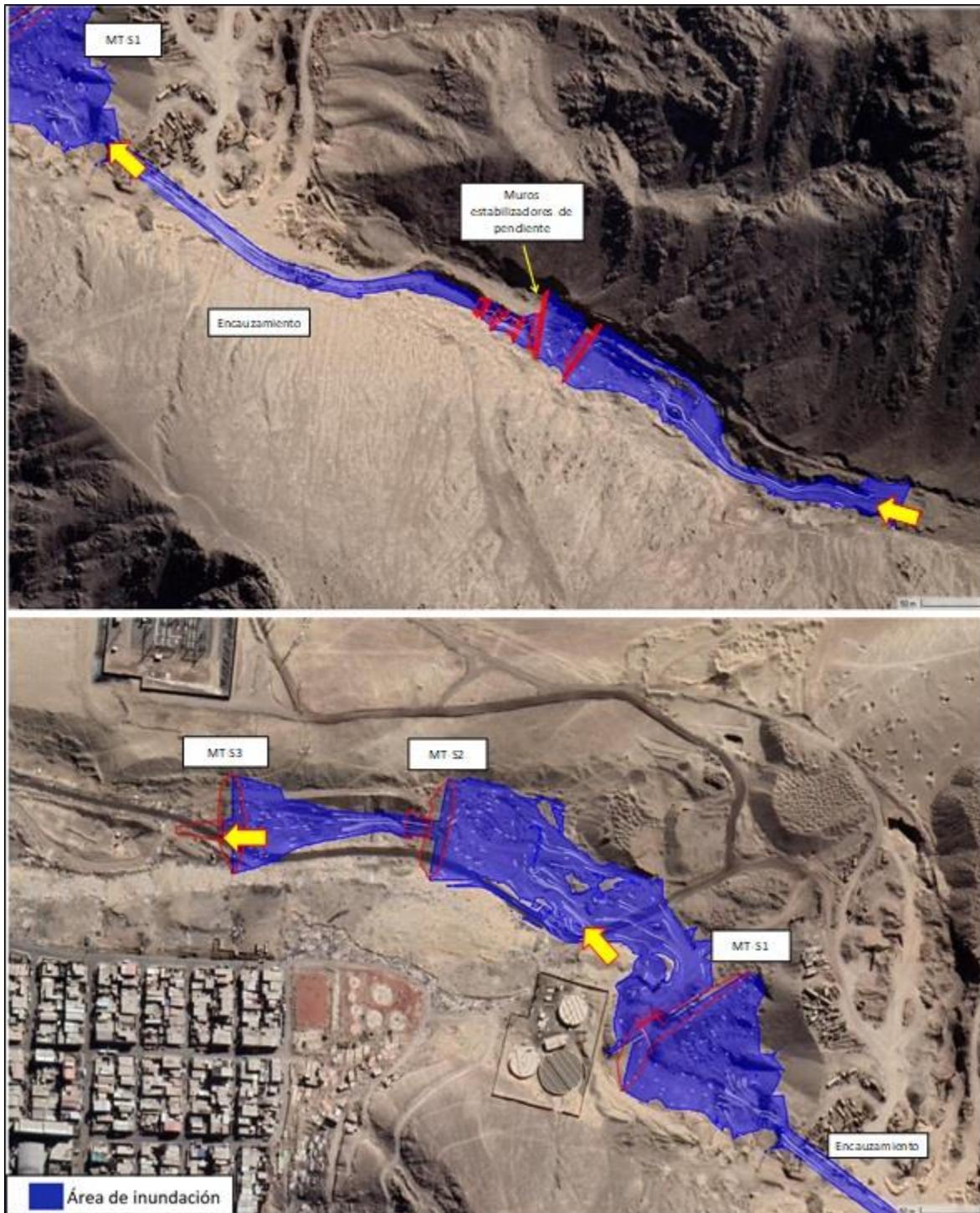


Figura 12.10 Área de inundación y líneas de corriente del canal unificado y plano urbano

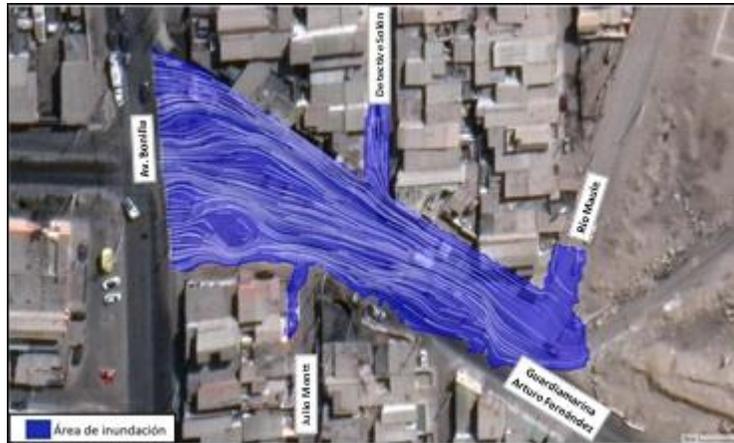
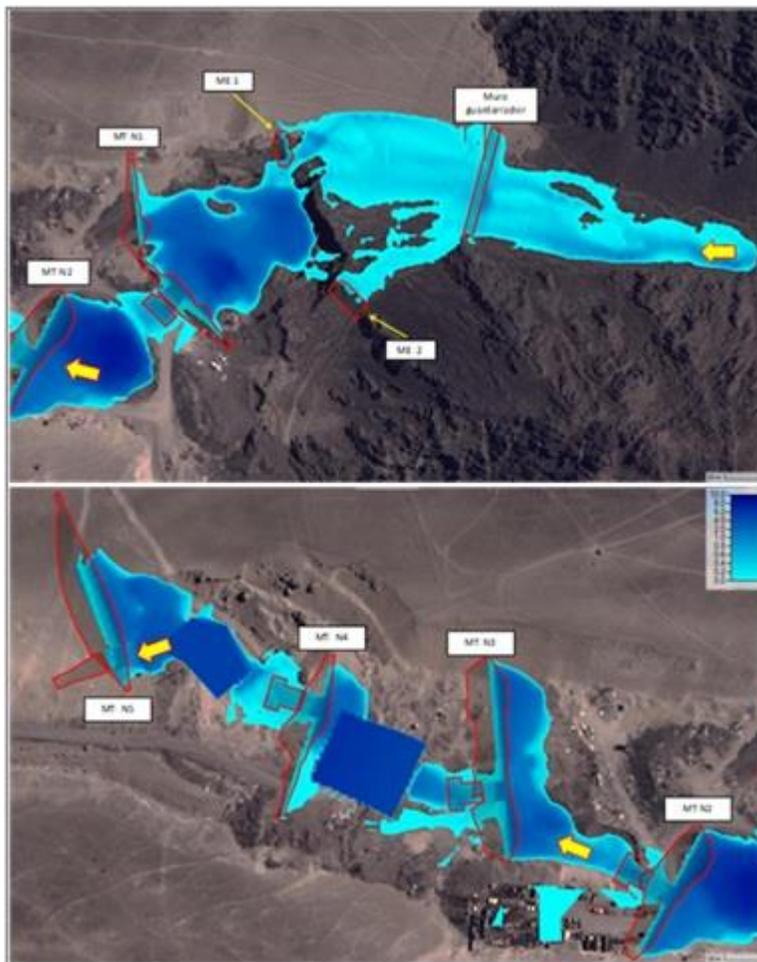


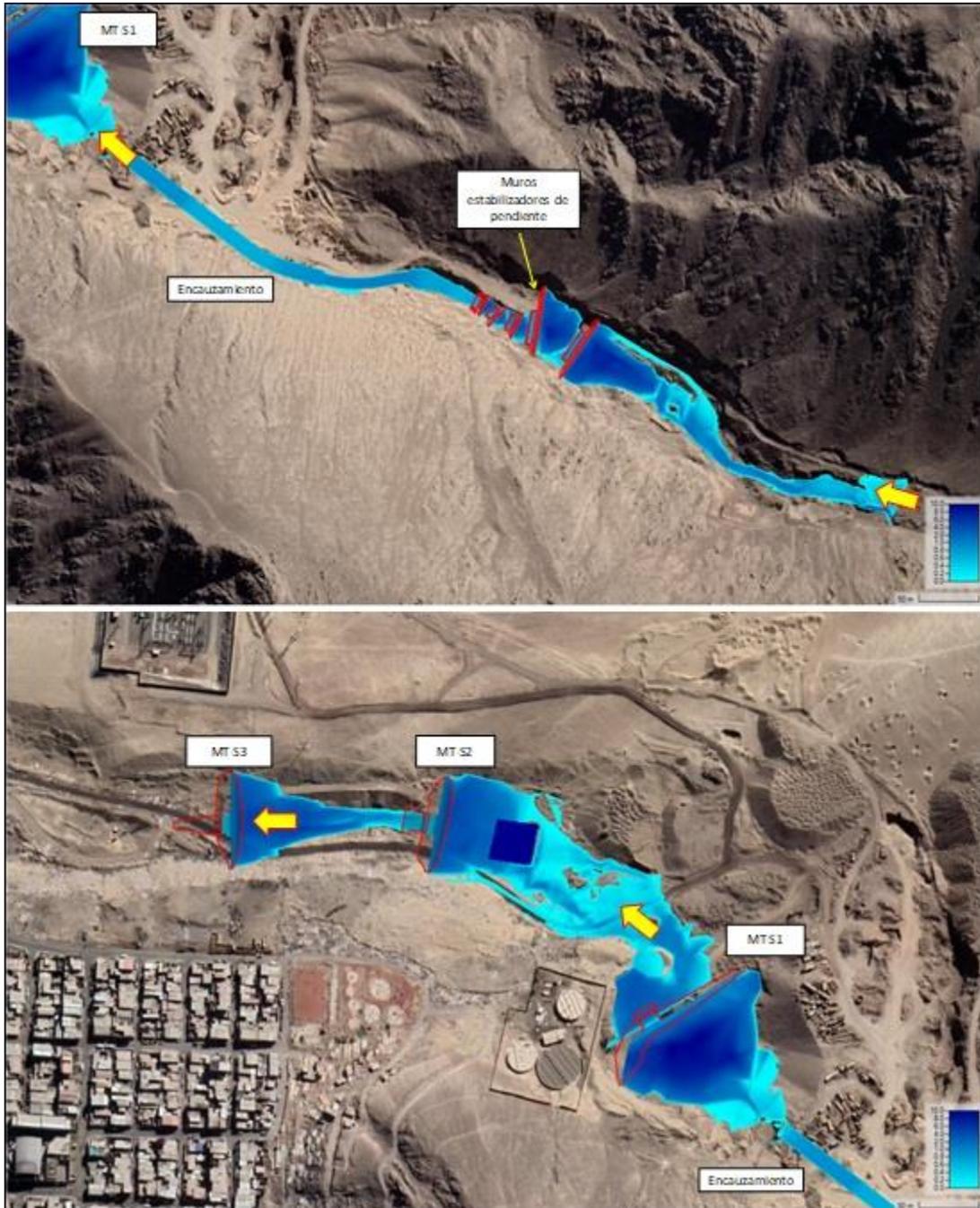
Figura 12.11 Profundidades del flujo en el brazo norte de la quebrada Bonilla



12.4.4.2. Brazo Sur

En la Figura 12.12 se muestran las profundidades alcanzadas por el flujo para el brazo sur, apreciándose la presencia de profundidades de hasta 3,7 m en los pozones formados por los muros estabilizadores de pendiente proyectados.

Figura 12.12 Profundidades del flujo en el brazo sur de la quebrada Bonilla



En la zona de las hondonadas se estiman profundidades de hasta 10,1 m aguas arriba del muro N°1, mientras que entre los muros MT-S1 y MT-S2 se observa la zona definida como empréstito para la extracción de material de relleno de los muros de tierra.

12.4.4.3. Canales unitarios y confluencia

a) Canal norte

Para el canal unitario norte el eje hidráulico relacionado al caudal peak del brazo norte se resume en la Tabla 12.1.

Tabla 12.1 Eje hidráulico máximo en canal colector norte

Distancia acumulada (m)	Cota de radier (msnm)	E.H. (msnm)	Profundidad de escurrimiento (m)
7	171,66	171,84	0,18
23	170,6	170,99	0,39
77	170,05	170,69	0,64
195	152,89	153,17	0,28
235	145,94	146,21	0,27
287	137,87	138,15	0,28
354	130,79	131,09	0,30
432	124,65	124,98	0,33
515	122	122,44	0,44
621	119,03	119,49	0,46
820	107,31	107,67	0,36
880	104,85	105,26	0,41

En la tabla anterior se observa que las profundidades de escurrimiento varían entre 0,18 m y 0,64 m, dado que las pendientes oscilan entre 1% y 15,2%.

La sección de mayor profundidad se encuentra 77 m aguas abajo del vertedero de descarga del muro MT - N5, debido a que la pendiente en este tramo es de 1%. La altura de los muros del canal unitario norte se detalla en el capítulo 6.

b) Canal sur

Para el canal unitario sur el eje hidráulico relacionado al caudal peak del brazo sur se muestra en la Tabla 12.2.

Tabla 12.2 Eje hidráulico máximo en canal colector sur

Distancia acumulada (m)	Cota de radier (msnm)	E.H. (msnm)	Profundidad de escurrimiento (m)
14	144,96	145,14	0,18
63	142,11	142,59	0,48
143	127,44	127,84	0,40
188	124,23	124,68	0,45
256	120,78	121,28	0,50

Distancia acumulada (m)	Cota de radier (msnm)	E.H. (msnm)	Profundidad de escurrimiento (m)
349	114,16	114,61	0,45
427	106,06	106,46	0,40
449	105,07	105,58	0,51

En la tabla anterior se observa que las profundidades de escurrimiento varían entre 0,18 m y 0,51 m, para pendientes comprendidas entre 4,6% y 10,5%. La sección de mayor profundidad se encuentra en la descarga sobre la obra de confluencia proyectada, dado que en este tramo se verifica la menor pendiente del canal, siendo de 4,6%.

c) Canal unificado

Para el canal unificado el eje hidráulico relacionado a la suma de los caudales peak de los brazos norte y sur se indica en la Tabla 12.3, de donde se observa que el flujo en el canal unificado aguas abajo de la confluencia alcanza una profundidad de escurrimiento de 1,01 m.

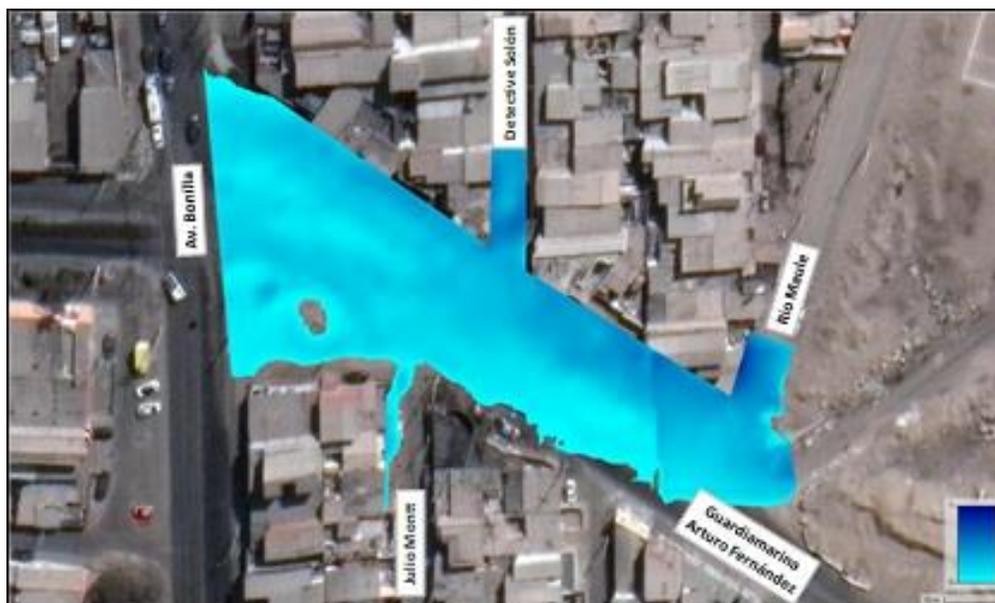
Tabla 12.3 Eje hidráulico máximo en canal unificado

Distancia acumulada (m)	Cota de radier (msnm)	E.H. (msnm)	Profundidad de escurrimiento (m)
912	103,49	104,50	1,01
970	102,57	103,38	0,81

12.4.4.4. Descarga en plano urbano

En la Figura 12.13 se muestran las profundidades alcanzadas por el flujo en la descarga sobre el plano urbano. En esta figura se observa que las profundidades máximas son 0,6 m, y se verifican sobre la calzada norte de la calle Guardiamarina Arturo Fernández y las calles Detective Solón Salas y Río Maule.

Figura 12.13 Profundidades del flujo en el plano urbano



12.4.5. Hidrogramas a la salida de las obras

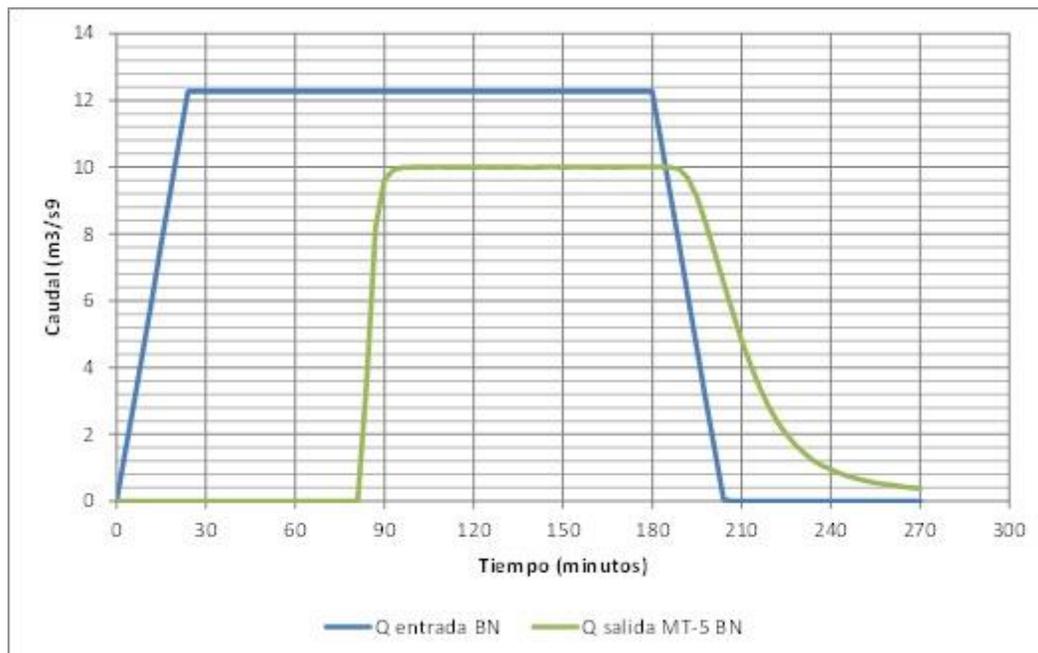
Los hidrogramas de las simulaciones fueron obtenidos en las secciones correspondientes a la entrada y salida de los últimos muros de tierra que descargan sus aguas a los canales unitarios respectivos (MT-N5 en el brazo norte y MT-S3 en el brazo sur), y en la descarga del dissipador de energía.

12.4.5.1. Brazo norte

En la Figura 12.14 se muestran graficados los hidrogramas de crecidas de T= 100 años, de entrada y salida del MT-N5 correspondientes al último muro de aguas abajo del brazo norte de la quebrada Bonilla, el primero en color azul y el segundo en color verde.

Por efecto de las obras del brazo norte, el caudal detrítico peak de 12,3 m³/s se reduce a 10,0 m³/s.

Figura 12.14 Hidrogramas de la crecida de T= 100 años del brazo norte



En la Tabla 12.4 se resumen los volúmenes acumulados en el brazo norte aguas arriba del muro MT-N5, pudiéndose constatar que la crecida de entrada tiene asociado un volumen de 132.241 m³ de mezcla detrítica y que, a la salida, ese volumen baja a 91.284 m³, lo cual implica que en este sistema quedaron depositados 41.151 m³ de mezcla detrítica.

Suponiendo que, del total del volumen de la masa aluvional retenida, un 65% de este volumen corresponde a volumen de sólidos (porosidad n = 0,65), aguas abajo de este muro se obtiene una concentración volumétrica de sólidos de 14,2%.

Tabla 12.4 Resumen de volúmenes acumulados para crecida de T=100 años en el brazo norte

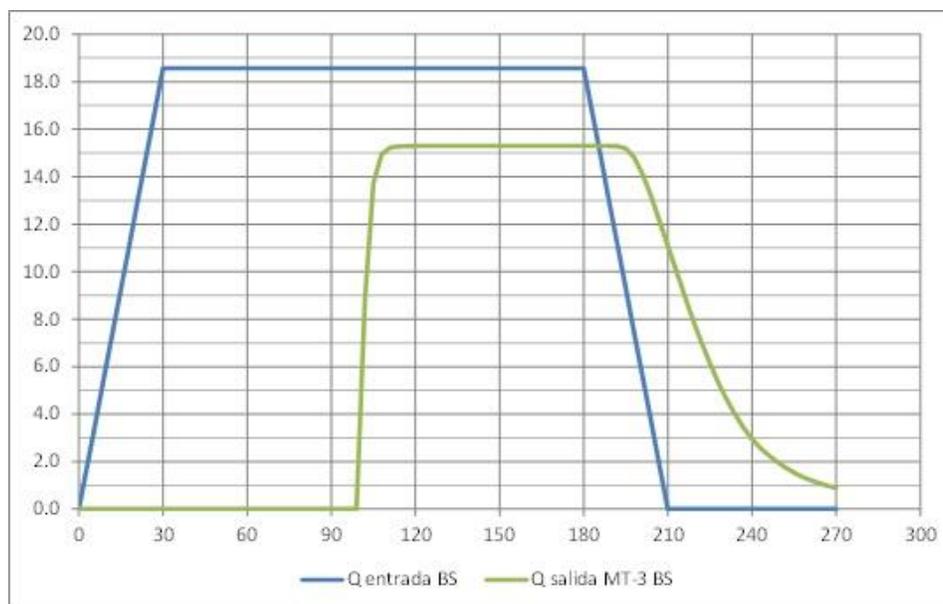
Parámetro	Valor
Volumen mezcla detrítica en entrada del brazo norte (m ³)	132.241
Volumen mezcla detrítica de salida en MT-N5 (m ³)	91.284
Volumen retenido mezcla detrítica aguas arriba del MT-N5 (m ³)	41.151
Volumen de sólidos en entrada del brazo norte (m ³)	39.672
Volumen de sólidos salida en MT-N5 (m ³)	12.924
Volumen de sólidos retenidos aguas arriba de MT-N5 (m ³)	26.748
Volumen líquido de entrada del brazo norte (m ³)	92.763
Volumen líquido de salida en MT-N5 (m ³)	78.360
Volumen líquido retenido aguas arriba de MT-N5 (m ³)	14.403
Concentración volumétrica de sólidos en salida de MT-N5 (%)	14,2

12.4.6. Brazo sur

En la Figura 12.15 se muestran graficados los hidrogramas de crecidas de T= 100 años, de entrada y salida del muro MT-S3 correspondientes al último muro de aguas abajo del brazo sur de la quebrada Bonilla, el primero en color azul y el segundo en color verde.

Por efecto de las obras del brazo norte, el caudal detrítico peak de 18,6 m³/s se reduce a 15,3 m³/s.

Figura 12.15 Hidrogramas de la crecida de T= 100 años del brazo sur



Por otra parte, en la Tabla 12.5 se resumen los volúmenes acumulados en intervalos de tiempo de 5 minutos para los hidrogramas de entrada y salida del brazo sur, pudiéndose constatar que la crecida de entrada tiene asociado un volumen de 201.155 m³ de mezcla detrítica y que, a la salida, ese volumen baja a 141.052 m³, lo cual implica que en este sistema quedaron depositados 60.103 m³.

Bajo la misma suposición anterior que del total del volumen de la masa aluvional retenida, un 65% de este volumen corresponde a volumen de sólidos (porosidad $n = 0,65$), aguas abajo de este muro se obtiene una concentración volumétrica de sólidos de 15%.

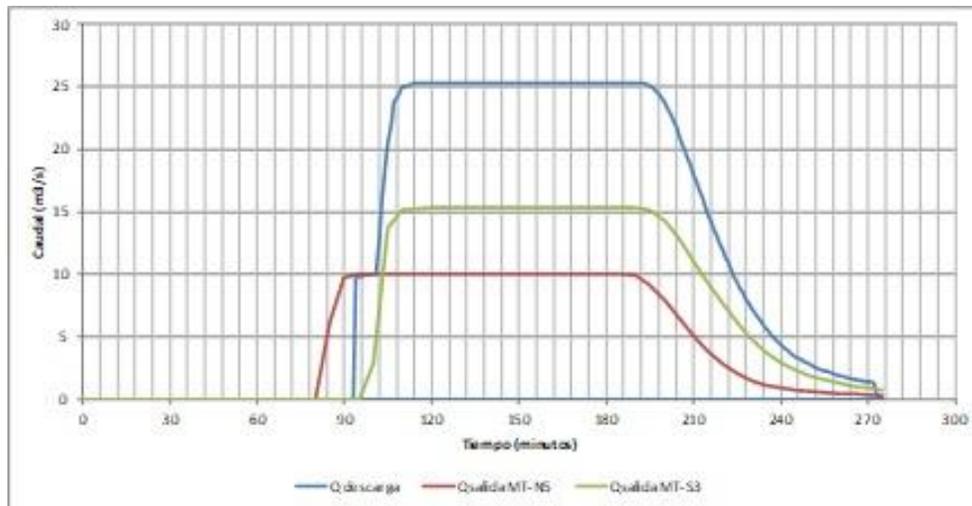
Tabla 12.5 Resumen de volúmenes acumulados para crecida de T=100 años en el brazo sur

Parámetro	Valor
Volumen mezcla detrítica en entrada del brazo sur (m ³)	201.155
Volumen mezcla detrítica de salida en MT-S3 (m ³)	141.052
Volumen retenido mezcla detrítica aguas arriba del MT-S3 (m ³)	60.103
Volumen de sólidos en entrada del brazo sur (m ³)	60.171
Volumen de sólidos salida en MT-S3 (m ³)	21.104
Volumen de sólidos retenidos aguas arriba de MT-S3 (m ³)	39.067
Volumen líquido de entrada del brazo sur (m ³)	140.400
Volumen líquido de salida en MT-S3 (m ³)	119.364
Volumen líquido retenido aguas arriba de MT-S3 (m ³)	21.036
Concentración volumétrica de sólidos en salida de MT-S3 (%)	15%

12.4.7. Canales unitarios y confluencia

En la Figura 12.16 se muestran graficados los hidrogramas de crecidas de T= 100 años, en los canales unitarios norte, sur y unificado, el primero en color rojo, el segundo en color verde y el último en color azul.

Figura 12.16 Hidrogramas de T=100 años en los canales colectores y en descarga



Por efecto de la superposición de los hidrogramas del brazo norte y del brazo sur, en la confluencia de los canales unitarios, el caudal detrítico peak es de 25,3 m³/s.

12.4.8. Resumen de resultados de simulaciones HEC-RAS-2D

Los resultados obtenidos en las simulaciones HEC-RAS-2D para los brazos norte y sur hasta el sector de las hondonadas se resume en la Tabla 12.6.

Tabla 12.6 Resumen de resultados en brazos norte y sur hasta canales colectores

Parámetro	Brazo norte	Brazo sur	Canal norte	Canal sur	Canal unificado
Área inundada (ha)	3,1	5,0			
Profundidad máxima (m)	9	10,1	0,64	0,51	1,01
Velocidad máxima (m/s)	4	3,4	6,2	6,4	4,65
Revancha mínima en muros de tierra (m)	0,47	0,52			
Volumen retenido (m ³)	41.151	60.103			
CV de salida (%)	14,2	15,0			

De la tabla anterior se observa que las áreas decantación formadas por los muros de tierra logran retener 41.151 m³ y 60.103 m³ de detritos para los brazos norte y sur respectivamente, haciendo que las concentraciones volumétricas de sólidos se reduzcan hasta un 16% en ambos brazos.

Respecto de los canales, se constata que las profundidades máximas resultan de 0,64 y 0,51 m para los canales unitarios norte y sur respectivamente; y de 1,01 m para el canal unificado, mientras que las velocidades máximas resultan algo mayores a 6 m/s para los canales unitarios.

12.5. DISEÑO DE LA OBRA DISIPADORA DE ENERGÍA

12.5.1. Características de la obra

La obra disipadora tiene como función disipar la energía que adquiere el flujo en el canal unificado, permitiendo su vertimiento controlado a la calle mencionada. Se proyectó al término del canal unificado, con su descarga hacia la calle Guardiamarina Arturo Fernández.

12.5.2. Consideraciones y criterios de diseño

Las consideraciones y criterios de diseño adoptados para la Obra Disipadora de Energía (ODE) son los siguientes:

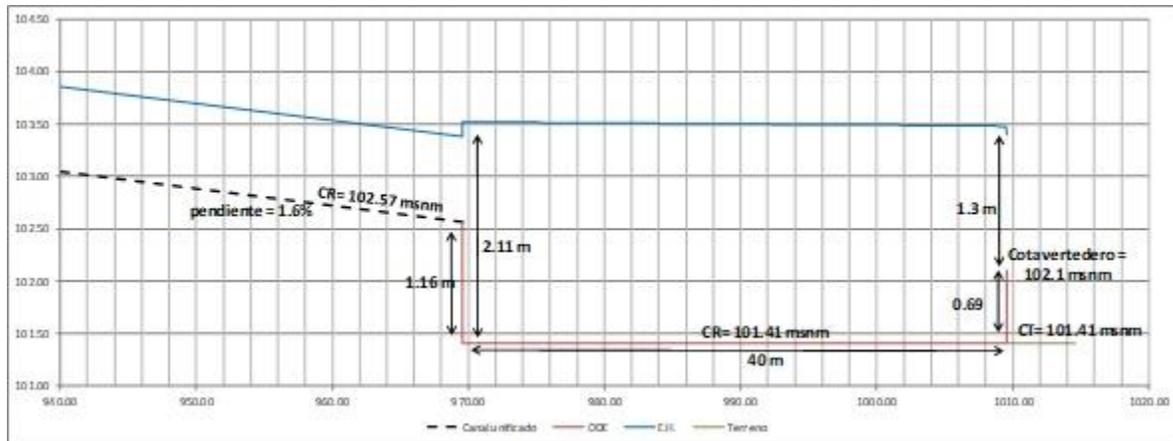
- Mantener régimen supercrítico en el canal unificado.
- Conseguir la independencia hidráulica entre el canal unificado y el flujo en la obra disipadora de energía.
- Lograr un vertimiento controlado del flujo sobre el plano urbano en la calle Guardiamarina Arturo Fernández.

A partir de estos criterios, se proyectó su vertedero con $Q_{\text{diseño}} = 25,3 \text{ m}^3/\text{s}$ y carga $h = 1,30 \text{ m}$.

12.5.3. Cálculo del eje hidráulico

Se calculó el eje hidráulico considerando el caudal en camino del canal unitario sur, con un coeficiente de rugosidad de Manning $n = 0,025$ de lo cual se obtuvieron las gradas de bajada y de subida y dimensiones de la obra que se grafican en la Figura 12.17.

Figura 12.17 Eje hidráulico en canal unificado y ODE



12.6. CONFLUENCIA DE CANALES UNITARIOS

12.6.1. Característica de la obra

La obra de confluencia tiene como función hacer converger los flujos de los canales unitarios norte y sur de manera controlada, de manera que el flujo en el canal unificado adquiere en un trecho corto una condición de régimen uniforme que se mantenga hacia aguas abajo.

12.6.2. Consideraciones y criterios de diseño

Las consideraciones y criterios de diseño adoptados para la confluencia de los canales unitarios son en resumen los siguientes:

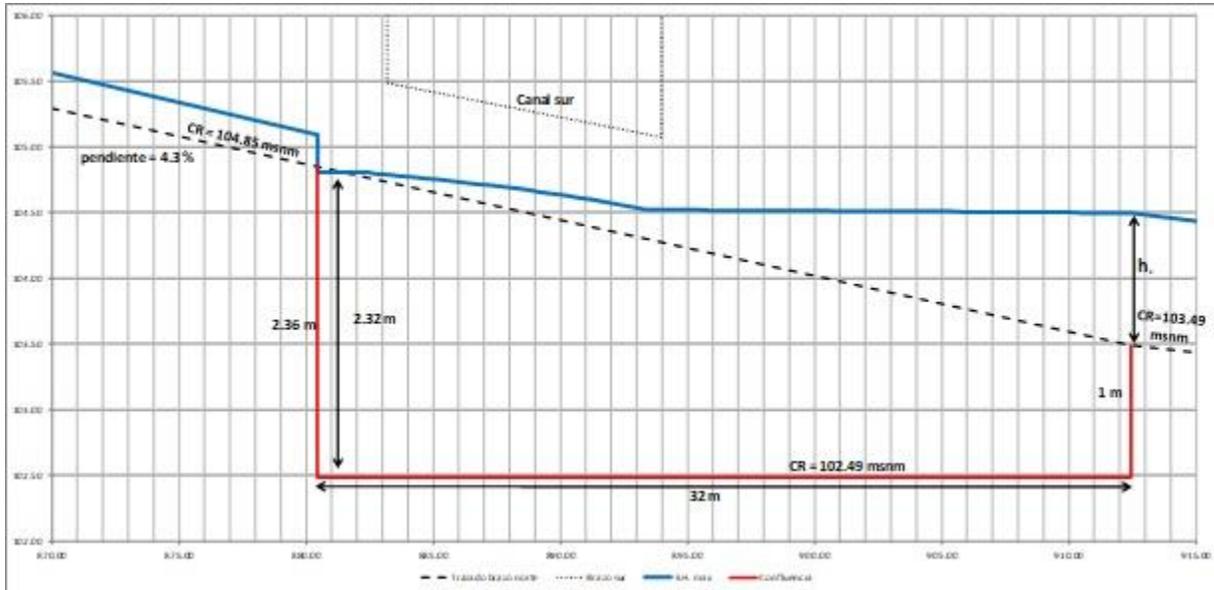
- Mantener régimen supercrítico en el canal unificado.
- Conseguir la independencia hidráulica entre los canales unitarios y el canal unificado.
- Lograr un vertimiento controlado del flujo sobre el canal unificado.

12.6.3. Diseño hidráulico

Aguas arriba de la confluencia, en el canal unitario norte se diseñó una transición de longitud 10 m, ampliando el ancho de su sección de 6 m a 8 m. El eje hidráulico en la confluencia se calculó considerando un coeficiente de rugosidad de Manning $n = 0,025$.

El eje hidráulico con las dimensiones de la confluencia se muestra graficado en la Figura 12.18.

Figura 12.18 Eje hidráulico en confluencia



12.7. CURVAS HORIZONTALES EN CANALES

12.7.1. Identificación y características de las curvas

Las curvas del trazado de los canales unitarios norte y sur, y del canal unificado se identifican en la Tabla 12.7. Las curvas se numeraron desde aguas arriba hacia aguas abajo con números correlativos independientes para cada canal, y prefijos relacionados a cada canal: N para el canal norte, S para el canal sur y U para el canal unificado.

Tabla 12.7 Identificación de las curvas

Canal	Curva	Balizado curva			Radio m	Desarrollo m
		inicio	centro	fin		
Unitario Norte	N1	119,71	139,56	159,42	100	39,71
	N2	199,77	216,97	234,17	100	34,4
	N3	294,80	301,21	325,62	100	30,82
	N4	349,17	375,38	401,59	100	52,42
	N5	510,85	533,87	556,88	100	46,03
	N6	606,57	619,09	631,62	100	25,05
Unitario Sur	S1	76,41	100,34	124,27	100	47,86
	S2	263,58	277,86	294,14	100	30,56
	S3	374,71	394,38	414,04	100	39,33
Unificado	U1	918,17	926,81	935,45	100	17,28

12.7.2. Consideraciones y criterios de diseño

Los peraltes del eje hidráulico en las curvas se calcularon la relación propuesta por H. Mery en “Hidráulica aplicada al diseño de obras”:

$$\Delta h = C * \frac{\bar{v}^2 * L}{g * R_c}$$

Donde:

Δh : Sobreelevación del nivel en el paramento exterior de la curva, medido sobre el nivel en el eje del canal.

C: Constante cuyo valor puede ser 0,5 o 1, dependiendo de la forma de la sección y del régimen del escurrimiento.

\bar{v} : Velocidad media de escurrimiento.

L: Ancho medio de la superficie libre.

R_c : Radio de la curva medido al eje del canal.

g: Aceleración de gravedad, igual a 9,81 m/s².

Para todas las curvas proyectadas se verificó flujo supercrítico, implicando C = 1, mientras que se adoptó un radio único igual a 100 m.

Por otro lado, la revancha adoptada se calculó de acuerdo a la siguiente relación, recomendada por el USBR:

$$R = 0,6 + 0,037 * V * \sqrt[3]{h}$$

Donde:

R: Revancha sobre el eje hidráulico en los muros de los canales.

V: Velocidad media de escurrimiento.

h: Profundidad media de escurrimiento.

Finalmente, la altura de los muros se determinó como la suma entre la profundidad media del escurrimiento en el canal más el peralte y la revancha determinadas mediante las expresiones anteriores.

12.7.3. Dimensionamiento de la altura de muros en las curvas

Los resultados de la aplicación de las relaciones anteriores para las curvas del canal unitario norte y el canal unificado se resumen en la Tabla 12.8 y para el canal unitario sur se detallan en la Tabla 12.9.

Tabla 12.8 Peraltes y revanchas en curvas del canal unitario norte y canal unificado

Curva	Pendiente (m/m)	L (m)	h (m)	Rc (m)	V (m/s)	Δh (m)	R (m)	h+ Δh +R (m)	Altura muro (m)
N1	0,144	6	0,27	100	6,1	0,22	0,75	1,24	1,25
N2	0,152	6	0,27	100	6,2	0,23	0,75	1,25	1,25
N3	0,108	6	0,30	100	5,5	0,18	0,74	1,22	1,25
N4	0,108	6	0,33	100	5,0	0,15	0,73	1,21	1,25

Curva	Pendiente (m/m)	L (m)	h (m)	Rc (m)	V (m/s)	Δh (m)	R (m)	h+ Δh +R (m)	Altura muro (m)
N5	0,028	6	0,46	100	3,6	0,08	0,70	1,24	1,25
N6	0,028	6	0,46	100	3,6	0,08	0,70	1,24	1,25
U1	0,016	8	0,81	100	3,9	0,12	0,73	1,67	1,7

Tabla 12.9 Peraltes y revanchas en curvas del canal unitario sur

Curva Nº	Pendiente (m/m)	L (m)	h (m)	Rc (m)	V (m/s)	Δh (m)	R (m)	h+ Δh +R (m)	Altura muro (m)
S1	0,1	6	0,40	100	6,3	0,33	0,79	1,42	1,4
S2	0,071	6	0,46	100	5,6	0,19	0,76	1,41	1,4
S3	0,105	6	0,40	100	6,4	0,25	0,77	1,42	1,4

12.8. GRADAS DE BAJADA EN CANALES UNITARIOS

12.8.1. Identificación y características de las gradas de bajada

Agua abajo de los rápidos de descarga pertenecientes a los muros MT-N5 y MT-S3 la topografía de la quebrada presenta un perfil longitudinal de fuertes pendientes en ciertos tramos. Con el fin de disminuir la velocidad del flujo se diseñaron gradas de bajada de 1 m de altura. Para el canal unitario norte se diseñaron 2 gradas de bajada, mientras que para el canal unitario sur se diseñaron 7.

12.8.2. Consideraciones y criterios de diseño

Los criterios adoptados para el diseño de las gradas de bajada son:

- Al agregar gradas verticales se busca reducir la pendiente de fondo de los canales unitarios, para que las velocidades del flujo no superen un valor máximo.
- Como criterio de diseño se adoptó una velocidad máxima de 6,5 m/s.
- El coeficiente de rugosidad de Manning fue $n = 0,025$ en todas las obras.

12.8.3. Dimensionamiento de las gradas

En el canal unitario norte, considerando escurrimiento normal con $Q = 10 \text{ m}^3/\text{s}$, la pendiente asociada $V_{\text{max}} = 6,5 \text{ m/s}$ resulta igual 18%, con $n = 0,025$.

Por otro lado, el tramo que requiere gradas de bajada se inicia en el Km 197,2 m con una cota de 152,9 msnm, y termina en el Km 236 m con cota 144,9 msnm, por lo cual la cantidad de gradas requeridas para este tramo es 1.

En el caso del canal unitario sur, con $Q = 15,3 \text{ m}^3/\text{s}$, la pendiente asociada a una $V_{\text{max}} = 6,5 \text{ m/s}$, es igual 11%. En este caso, el tramo con gradas de bajada se inicia en el Km 61,7 m, con una cota igual a 142,1 msnm, y termina en el Km 92,4 m con cota de 132,5 msnm, de lo cual se deduce que la cantidad de gradas requeridas para este tramo resultante es 7.

La Tabla 12.10 resume las características de los tramos descritos y los cálculos.

Tabla 12.10 Dimensionamiento de gradas en canales unitarios norte y sur

Parámetro	Unidad	Canal norte	Canal sur
Desnivel en tramo	m	8	9,6
Longitud en tramo	m	38,8	30,7
Pendiente de la tramo	m/m	0,20	0,31
Velocidad máxima	m/s	6,5	6,5
Pendiente máxima	m/m	0,18	0,11
Altura de grada	m	1,0	1
Cantidad de gradas	gradas	1	7

12.9. FLUJO A LA SALIDA DE LOS RÁPIDOS DE DESCARGA DE LOS MUROS DE TIERRA

12.9.1. Descripción general de las obras

Los muros de tierra proyectados en los brazos norte y sur de la quebrada Bonilla, descargan las aguas hacia el cauce mediante rápidos de descarga de hormigón.

En el caso del brazo norte, el rápido de descarga del muro MT-N5 descarga sus aguas al canal unitario norte mientras que en el caso del brazo sur, la descarga al canal unitario sur es desde el rápido del muro MT-S3.

Resulta necesario calcular la distancia recorrida por el chorro emergente de un rápido, cuando éste descarga directamente al cauce de la quebrada, para determinar la longitud de la protección al pie de la obra requerida para evitar la socavación.

12.9.2. Consideraciones y criterios de diseño generales

En los rápidos de descarga las ecuaciones del régimen gradualmente variado únicamente aplican en el tramo comprendido entre el vertedero y la sección inmediatamente aguas arriba de la curva vertical.

En el presente caso se supuso un coeficiente de Manning igual a 0,025 para las pérdidas ficticias y luego se supuso conservadoramente que el flujo pierde una energía despreciable en la curva vertical, de manera tal que al proyectarse hacia aguas abajo, a la salida del rápido, puede determinarse la distancia horizontal que alcanzaría el chorro.

La distancia recorrida es necesaria para determinar la longitud de la protección al pie del rápido de descarga.

Las características geométricas de los rápidos de descarga se indican en la Tabla 12.11.

Tabla 12.11 Características geométricas de los rápidos de descarga

Brazo	Rápido de descarga	Longitud de rápido de descarga		Desnivel a la salida (m)
		Longitud horizontal	Longitud según eje del rápido	
Norte	MT-N1	3,31	2,6	0,5
	MT-N2	14,52	15,13	0,5
	MT-N3	14,02	14,57	0,5
	MT-N4	13,26	13,73	1,0

Brazo	Rápido de descarga	Longitud de rápido de descarga		Desnivel a la salida (m)
		Longitud horizontal	Longitud según eje del rápido	
Sur	MT-S1	6,65	6,33	0,5
	MT-S2	15,37	16,08	1,0

En la tabla anterior, la longitud horizontal de cada rápido está medida entre el inicio del rápido y el centro de la curva vertical situada en el cambio de pendiente; mientras que la longitud según el eje del rápido se mide entre el inicio del rápido hasta la sección inmediatamente aguas arriba de la curva vertical proyectada.

Por otro lado, el desnivel a la salida corresponde a la diferencia de cotas entre la salida del rápido y la superficie de los enrocados.

Los ejes hidráulicos calculados entre el inicio del rápido y el comienzo de la curva vertical se usaron para generar los parámetros para el cálculo del desplazamiento o alcance horizontal del chorro emergente del rápido. La Tabla 12.12 resume los resultados obtenidos.

Tabla 12.12 Características del flujo en salida de rápidos

Brazo	Rápido de descarga	Variable	Unidad	Valor	
Norte	MT-N1	Velocidad del flujo	m/s	5,66	
		Desnivel a la salida	m	0,50	
		Alcance horizontal	m	1,46	
	MT-N2	Velocidad del flujo			7,91
		Desnivel a la salida			0,50
		Alcance horizontal	m		1,97
	MT-N3	Velocidad del flujo			7,87
		Desnivel a la salida	m		0,50
		Alcance horizontal	m		1,96
	MT-N4	Velocidad del flujo			7,86
		Desnivel a la salida	m		0,50
		Alcance horizontal	m		2,97
Sur	MT-S1	Velocidad del flujo	m/s	7,14	
		Desnivel a la salida	m	0,50	
		Alcance horizontal	m	1,80	
	MT-S2	Velocidad del flujo	m/s	8,00	
		Desnivel a la salida	m	1,00	
		Alcance horizontal	m	3,02	

Los resultados anteriores muestran que las longitudes horizontales alcanzadas por los flujos en la salida de los rápidos de descarga de los muros de tierra proyectados alcanzan un máximo de 3,02 m. En el proyecto se adoptó 5 m de longitud de los enrocados de protección al pie de los rápidos de descarga.

13. DISEÑO ESTRUCTURAL Y GEOTÉCNICO

Se presenta en el siguiente capítulo una síntesis de los diseños geotécnico y estructural de las Obras de Control Aluvional proyectadas para la quebrada Bonilla.

El detalle en extenso forma parte del Anexo IV “Mecánica de Suelos y Geotecnia” Parte B y Anexo XI “Diseño Estructural”.

13.1. DISEÑO GEOTÉCNICO

13.1.1. Objetivos

Los objetivos principales del estudio de mecánica de suelos son los siguientes:

- Determinar los parámetros geotécnicos de los suelos en los diferentes sectores del proyecto.
- Determinar la capacidad de soporte de los suelos y asentamientos asociados de las diferentes obras de control de aluviones a construir.
- Determinar los taludes tanto de corte como relleno correspondiente a cada obra con tal de verificar que se cumpla con los factores de seguridad mínimos aceptables al deslizamiento.

13.1.2. Alcance

Como parte del diseño geotécnico, se entregan las propiedades del suelo de fundación y especificaciones del mismo para cada obra contemplada dentro del proyecto que lo requiera, tanto para el brazo norte como para el brazo sur. Las obras mencionadas corresponden a: Muro Guardarradier, Muro Estabilizador de Pendiente y Muro de Tierra.

13.1.3. Antecedentes disponibles

- Informe “Diagnostico de sistemas alternativos de disipación de energía en las quebradas de Antofagasta” desarrollado por Electrowatt Ingenieros consultores S.A.
- Informe “Caracterización y levantamiento de información debido a las crecidas aluvionales en las localidades de Antofagasta y Taltal – región de Antofagasta, para el temporal del 25 y 26 de marzo de 2015” desarrollado por la empresa Arcadis.
- Documento n°98087 “Mecánica de Suelos Quebrada Bonilla Antofagasta”, elaborado por Héctor Ventura en el año 1998 y los ensayos de laboratorio respectivos a la campaña geotécnica de dicho estudio.
- Visita a terreno por el Ingeniero civil especialista en geotecnia.
- Informe de Mecánica de suelos para obra “Quebrada Bonilla” desarrollado por el laboratorio Tecnolab Ltda., acreditado por el INN Chile.
- Anexo X “Descripción del proyecto y diseño hidráulico”.
- Conjunto de Planos de las Obras de Control Aluvional que forman parte del presente estudio.

13.1.4. Metodología

Para el desarrollo del estudio de mecánica de suelos se ha seguido la siguiente metodología:

- Revisión de antecedentes en la zona de estudio y de bibliografía de proyectos cercanos.

- Visita a Terreno de Ingeniero Especialista
- Análisis de los resultados obtenidos de dichos ensayos.
- De acuerdo con la información recopilada y de la visita a terreno efectuada, las prospecciones y resultados de los ensayos de laboratorio, realizar un análisis y sectorizar el trazado en los diferentes tipos de suelo, luego asignarles parámetros geotécnicos adecuados.
- En base a los parámetros del suelo, obtener la capacidad de soporte del suelo y los asentamientos asociados a las obras de control aluvional del proyecto.
- Realizar un análisis de estabilidad de talud tanto de corte como de relleno según corresponda a cada obra, con tal de verificar que se cumpla con los valores mínimos de factor de seguridad al deslizamiento.

13.1.5. Análisis de la información disponible

Con el objetivo de efectuar la caracterización geotécnica de los suelos detectados en las calicatas, se realizaron ensayos de laboratorio sobre las muestras obtenidas durante la campaña de terreno.

Los ensayos consistieron en: granulometría, humedad, límites de Atterberg, densidad de partículas sólidas, clasificación U.S.C.S. además, se realizaron ensayos de macrogranulometría insitu y en laboratorio, Proctor modificado, permeabilidad y contenido de sales.

13.1.6. Caracterización de suelos

13.1.6.1. Sectorización del trazado

A modo de simplificación de la caracterización de los suelos, el trazado del brazo norte y del brazo sur de la quebrada Bonilla se sectorizó considerando 4 tipos de suelo predominantes del lugar.

13.1.6.2. Asociación de las obras a cada sector

En la Tabla 13.1 se muestran las obras pertenecientes al brazo Norte de la quebrada Bonilla y en la Tabla 13.2 pertenecientes al brazo Sur y Confluencia, indicándose en cada una el suelo de la sectorización efectuada que corresponde.

Tabla 13.1 Asociación sectorización con obras del brazo Norte.

Brazo Norte	
Sector Suelo	Obra
Grava	Muro Guardarradier
	MT-N1
	MT-N2
Arena Gravosa	MT-N3
	MT-N4
	MT-N5
Arena	Canal Unitario Norte

Tabla 13.2 Asociación sectorización con obras del brazo Sur y Confluencia.

Brazo Sur	
Sector	Obra
Grava Arenosa	Muro Estabilizador de Pendiente
Arena Gravosa	Muro de Tierra MT-S1
	Muro de Tierra MT-S2
	Muro de Tierra MT-S3
	Canal Unitario Sur
Confluencia	
Arena Gravosa	Canal Unificado
	Disipador de Energía

13.1.7. Obras proyectadas

En el presente estudio se incluyó el cálculo de capacidad de soporte y los asentamientos de los suelos donde se fundarán las obras, además del análisis de estabilidad de talud tanto de corte como relleno según corresponda.

El proyecto contempla algunas obras que no requerirán de ninguno de estos análisis debido a que son estructuras livianas y por lo tanto, no representan una sobrecarga significativa, o incluso su fundación implica una sobre carga por peso menor al peso del suelo extraído. Estas obras son los canales unitarios norte y sur, el canal unificado y el disipador de energía.

En cuanto a las obras de pretil de encauzamiento, no se analiza su estabilidad de talud, ya que son obras de menor tamaño que los muros de tierra el cual sí es sometido a dicho análisis.

13.1.7.1. Muro guardarradier

El muro guardarradier corresponde a una obra de hormigón ubicada en el brazo norte de la quebrada Bonilla en el sector denominado como Gravas, sin embargo, según las prospecciones realizadas en esta ubicación se encuentra arena, por lo tanto, se considerará este tipo de suelo para los cálculos de capacidad de soporte del suelo y modelo de estabilidad de talud de corte.

13.1.7.2. Muro estabilizador de pendiente

El muro estabilizador de pendiente corresponde a una obra de hormigón ubicada en el brazo sur de la quebrada Bonilla en el sector denominado como Grava Arenosa, por lo tanto, se considerará este tipo de suelo para los cálculos de capacidad de soporte del suelo y modelo de estabilidad de talud de corte que se requiere en la excavación para la fundación de este.

13.1.7.3. Muro de tierra

Los muros de tierra ubicados tanto en el brazo norte como sur de la quebrada Bonilla en el sector denominado como arena gravosa principalmente y algunos en grava.

El relleno del muro se podrá realizar con material de la misma quebrada que sea del tipo grava arenosa y que cumpla con los estándares especificados en el presente estudio que se encuentran detallados en el Anexo IV “Mecánica de Suelos y Geotecnia” Parte B.

13.2. DISEÑO ESTRUCTURAL

13.2.1. Objetivos y alcance

El presente subcapítulo tiene como objetivo presentar un resumen del cálculo y verificación estructural de los elementos de hormigón armado que conforman las soluciones proyectadas para el control aluvional de la quebrada Bonilla.

En el Anexo XI “Diseño Estructural” del presente informe se incluyen las memorias de cálculo estructural de todas las obras de hormigón del proyecto.

Se presentan los resultados del cálculo estructural detallado de cada elemento considerado o del caso más desfavorable en caso de que se pueda homogeneizar el análisis con el fin de exponer el análisis de estabilidad de las estructuras proyectadas (deslizamiento, volcamiento y tensiones inducidas en el suelo) y diseñar la enfierradura de cada elemento; de tal manera de asegurar sus resistencias frente a las cargas consideradas para la vida útil del proyecto; teniendo como base lo estipulado en la normativa nacional e internacional.

Las obras que forman parte del análisis son las siguientes:

- Canal colector unitario norte, muro guardarradier e interferencia del canal unitario con matrices de agua potable que atraviesa el trazado del canal. Todas estas obras están comprendidas en el brazo norte de la quebrada Bonilla.
- Muros estabilizadores de pendiente, canal colector unitario sur, alcantarilla e interferencia del canal unitario con matrices de agua potable que atraviesa el trazado del canal. Todas estas obras están comprendidas en el brazo sur de la quebrada Bonilla.
- Confluencia, dissipador de energía y canal unificado comprendidos en el tramo común de la quebrada Bonilla.
- Estructuras de hormigón asociadas a los muros de tierra (muro parapeto, vertedero, rápido de descarga y muro terminal), proyectados en los brazos norte y sur de la quebrada Bonilla.

13.2.2. Obras de hormigón asociadas a los muros de tierra

Estas obras corresponden a barreras o pretilas de tierra que se ubicarán en la parte media de ambos brazos donde se encuentran las depresiones generadas por la actividad de extracción de áridos.

En el coronamiento de estos muros se proyecta la construcción de muros de aproximación y vertederos de evacuación con sus respectivos rápidos de descarga contruidos en hormigón armado con protección al pie mediante enrocados para evitar la socavación local del lecho.

13.2.3. Muros estabilizadores de pendiente

Los Muros Estabilizadores de Pendiente (MEP) se proyectaron en el brazo sur de la quebrada.

Aguas arriba de estos muros de contención se dispone un relleno compactado en la zona del talón, mientras que, aguas abajo, se dispone de una capa de gravilla y un enrocado de dos capas (protección al pie contra la socavación).

Además, en la zona de contención, se disponen barbacanas para liberar la presión hidráulica del agua en el caso eventual del llenado total de los muros.

13.2.4. Muro guardarradier

Este corresponde a un muro de hormigón armado transversal al cauce, diseñado con una protección de enrocado ante la socavación local y/o retrógrada a su pie, emplazado inmediatamente aguas arriba del cono de deyección de la quebrada.

13.2.5. Canal colector unitario norte

Esta obra corresponde a un canal de sección rectangular construido en hormigón armado cuya principal función es conducir el flujo detrítico diluido desde el rápido de descarga del MT-N5 hacia el canal colector unificado de la quebrada.

Se proyectaron 5 secciones típicas para el canal unitario del brazo norte de la quebrada. Las zonas de análisis consideradas y que componen un canal son:

- Muros laterales del canal.
- Fundación del canal.

13.2.6. Canal colector unitario sur

El canal colector unitario del brazo sur conecta el rápido de descarga del último muro de tierra del brazo sur, ubicado aguas abajo en la zona de hondonadas (denominado MT-S3) con la confluencia de canales y posterior canal colector unificado.

Esta obra corresponde a un canal de sección rectangular construido en hormigón armado cuya principal función es conducir el flujo detrítico diluido hacia aguas abajo y descargarlo al canal unificado de la Quebrada.

13.2.7. Canal colector unificado

El canal colector unificado corresponde a una obra del tramo común de la quebrada que se proyecta como una sección rectangular de hormigón armado, cuya función es conducir el flujo proveniente de la confluencia de canales unitarios norte y sur y descargarlos al dissipador de energía ubicado aguas arriba de la calle Guardiamarina Fernández.

13.2.8. Interferencia canal unitario con matriz de agua potable

Esta obra corresponde a una solución particular del canal unitario frente a la interferencia de este con dos matrices de Agua Potable pertenecientes a Aguas Antofagasta; las cuales pasan soterradamente a 2 m aproximadamente, bajo estos cruces.

Aguas Antofagasta señaló que es de su interés tener acceso la totalidad del tiempo a las matrices de agua, dada la importancia del servicio para la comuna y ante una eventual rotura de estas poder acceder con rapidez.

Debido a esto, se proyecta un canal formado por dos muros de contención laterales y un radier en la base de un espesor menor, con el objetivo de demoler rápidamente en caso de que se requiera acceder a las matrices y luego reponer estas secciones de los canales.

13.2.9. Alcantarilla del canal colector sur

La alcantarilla corresponde a una obra del brazo sur de la quebrada que se proyecta como una sección rectangular de hormigón armado, cuya función es conducir el flujo del canal unitario sur a través del camino de servicio considerado en el proyecto.

Las zonas de análisis consideradas y que componen la sección son:

- Losa
- Muros Laterales.
- Fundación.

13.2.10. Disipador de energía

El disipador de energía corresponde a una obra del tramo común de la quebrada compuesta por una cubeta de sección rectangular de hormigón armado que tiene por finalidad disipar el exceso de energía del flujo aluvional diluido proveniente del canal unificado; es decir, disipar la energía cinética que adquiere el flujo en el canal unificado, permitiendo su vertimiento controlado a la calle mencionada en el párrafo siguiente.

13.2.11. Confluencia

Esta obra se puede definir como una cubeta de hormigón armado donde descargan los canales unitarios del brazo norte y sur, cuya función es unificar el flujo proveniente de la quebrada y traspasarlo al canal unificado.

Se proyectaron varias secciones típicas para la confluencia con alturas de muro variables, según se puede observar en los planos desarrollados asociados a este documento. Las zonas de análisis consideradas y que componen la sección son:

- Muros laterales.

- Fundación.

Dado que las secciones típicas de la confluencia son similares, se considera el caso más desfavorable para realizar las verificaciones y diseño de este.

13.2.12. Resumen del diseño de las obras

En la Tabla 13.3 se presentan los resultados de los factores de utilización obtenidos del diseño al corte, flexión y ancho de fisura para las tensiones de hormigón armado inducido por las cargas en análisis, mostrándose de esta forma resumida, el cálculo estructural de cada elemento considerado o del caso más desfavorable en caso en que se pudo homogeneizar el análisis.

A partir de los resultados se observa que los factores de utilización son menores a uno para todos los elementos de hormigón armado diseñados, lo que indica que la resistencia de los materiales es superior a las solicitaciones impuestas por las distintas configuraciones de cargas de diseño.

Tabla 13.3 Resumen de los factores de utilización diseño al corte y flexión de las obras

Variable		F.U. Corte	F.U. Flexión	Ancho Grieta (mm)	
Obras de Hormigón armado asociadas a los Muros de Tierra	Muro Parapeto	Muro	0,024	0,005	0,002
		Fundación	0,469	0,526	0,182
		Diente de Anclaje	0,378	0,278	0,096
	Vertedero y Rápido de Descarga	Muro	0,099	0,148	0,051
		Fundación	0,966	0,68	0,245
		Diente de Anclaje	0,487	0,407	0,141
	Muro Terminal	Muro	0,717	0,753	0,231
		Fundación	0,916	0,317	0,097
		Diente de Anclaje	-	-	-
Muros estabilizadores de pendiente	Muro	0,11	0,27	-	
	Fundación	0,63	0,48	-	
	Diente de Anclaje	0,14	0,09	-	
Muro Guardarradier	Muro	0,719	0,74	0,24	
	Fundación	0,925	0,347	0,113	
Canal colector unitario norte	Muro	0,23	0,266	0,092	
	Fundación	0,541	0,582	0,209	
Canal colector unitario sur	Muro	0,216	0,241	0,084	
	Fundación	0,533	0,574	0,207	
Canal colector unificado	Muro	0,307	0,411	0,142	
	Fundación	0,449	0,809	0,297	
Interferencia con matriz de agua potable	Muro	0,23	0,216	0,075	
	Fundación	0,561	0,443	0,153	
Alcantarilla del canal colector unitario sur	Muro	0,788	0,647	0,202	
	Fundación	0,983	0,984	0,300	
	Losa	0,811	0,755	0,244	
Confluencia	Muro	0,577	0,723	0,242	
	Fundación	0,987	0,85	0,273	
Disipador de energía	Muro	0,524	0,697	0,251	
	Fundación	0,934	0,961	0,253	

14. EVALUACIÓN ECONÓMICA SOCIAL DEL PROYECTO

La evaluación económica realizada, con base en la metodología recomendada por el MIDESO, consistió en determinar la rentabilidad social del proyecto durante su vida útil, usando el Valor Actualizado Neto (VAN) como indicador económico, mediante la comparación entre la inversión de construcción, y los costos por operación y mantenimiento del proyecto, con el beneficio esperado de las obras proyectadas empleando la tasa de descuento recomendada para este tipo de inversiones.

Como insumo básico se consideró el monto de las inversiones del proyecto evaluado en el presente estudio, los costos de operación y mantenimiento, por un lado, y por otro, los costos por inundaciones de la quebrada Bonilla que evitan las obras proyectadas los cuales son equivalentes a los beneficios del proyecto.

Respecto de estos últimos, dado que la esperanza matemática de los costos evitados o beneficios, requiere determinar distintas inundaciones según el periodo de retorno de las crecidas, fue necesario modelar numéricamente la quebrada y las áreas de inundación tanto para la condición sin proyecto (actual) de la quebrada como para la condición con proyecto (con las obras diseñadas), para distintos periodos de retorno, y generar una curva de frecuencia de dichos costos evitados para determinar el correspondiente valor esperado.

La modelación de las inundaciones fue realizada usando el software HEC-RAS 2D, para la condición sin proyecto (actual) de la quebrada y con proyecto (con las obras diseñadas), cubriendo un rango amplio de periodos de retorno (entre T= 10 y 500 años).

Los antecedentes detallados de la evaluación económica se incluyen en el Anexo XIV “Evaluación Económica” del presente informe.

14.1. EVALUACIÓN ECONÓMICA SOCIAL DEL PROYECTO

14.1.1. Planteamiento general de evaluación

En el manual “Metodología de Preparación y Evaluación de Proyectos de Defensas Fluviales” (2018) elaborado por el MIDESO, se detalla el enfoque a seguir para la evaluación económica a precios sociales de obras de defensa fluviales de terrenos y poblaciones contra crecidas de corrientes de agua.

El enfoque seguido es el de Costo – Beneficio, el cual requiere identificar todos los costos asociados a la construcción y mantenimiento del proyecto; y también los beneficios sociales y materiales del proyecto, los que, una vez cuantificados y valorizados, permiten obtener indicadores económicos como el VAN y la TIR del proyecto.

Los principales costos del proyecto a considerar son:

- Construcción de las obras.
- Mantenimiento y operación de las obras.

Por otro lado, los principales beneficios del proyecto que la metodología indica que deben considerarse, son los siguientes:

- Beneficios por menor daño en propiedades residenciales.
- Beneficio por recuperación de terrenos baldíos anegadizos.
- Beneficio por menor daño en propiedades comerciales e industriales.
- Beneficio por menor daño en establecimientos públicos.
- Beneficio por menor daño en vehículos.
- Beneficio por menor deterioro de la infraestructura vial.
- Beneficio por disminución de los Costos Generalizados de Viaje.
- Beneficio por menores gastos de emergencia y limpieza de vías, sumideros y calles.
- Beneficio por menor ausentismo laboral.
- Beneficio por menor ausentismo escolar.
- Liberación de recursos públicos en salud.
- Liberación de recursos públicos en ONEMI.

Los beneficios anteriores se estiman como la diferencia entre los daños producidos en la condición sin proyecto y los daños producidos en la condición con proyecto. Cada uno de estos beneficios se calcula para un amplio rango de crecidas con períodos de retorno, por ejemplo con valores mínimos de $T= 2$ a 5 años hasta valores máximos de $T= 100, 200, 500$ o más años, de modo de abarcar crecidas recurrentes hasta crecidas muy improbables.

De esta manera se obtiene la curva de frecuencia de los beneficios obtenidos por las obras del proyecto, de donde se calcula el beneficio esperado según la relación siguiente:

$$B_e = \int_{x=-\infty}^{x=+\infty} P(x) * B(x) dx$$

Donde:

B_e : beneficio esperado.

$P(x)$ = Probabilidad de que la crecida de iguale o exceda un valor de caudal x

$B(x)$ = Beneficio por daño evitado asociado a la crecida con probabilidad de excedencia $P(x)$

Para el caso específico $x= X$, la crecida de $P(x \geq X)$ tiene asociado un periodo de retorno $T = 1/ P(x \leq X)$

Dado que $B(x)$ se obtiene para valores discretos de x (Δx), la expresión anterior se usa también discretizada para $i= 1$ a N intervalos de cálculo, de la siguiente forma.

$$B_e = \sum_{i=1}^{i=N} \Delta P_i * B_i$$

Siendo:

ΔP_i = Diferencia de la probabilidad de excedencia en el intervalo [i, i+1]

B_i = Beneficio asociado a la marca de clase del intervalo [i, i+1]

Por otro lado, como indicador económico se calcula el VAN del proyecto, el cual queda determinado por la siguiente expresión como:

$$VAN = -C_0 + \sum_{i=1}^n \frac{B_e - C_i}{(1 + t)^i}$$

Donde:

C_0 : costo de la inversión inicial del proyecto.

B_e : Beneficio esperado (por daños evitados).

C_i : costo de mantención y operación de las obras para el año i.

t : tasa de descuento.

n : vida útil del proyecto.

14.1.2. Cuantificación de beneficios sociales

Los daños provocados por las inundaciones se cuantifican para las condiciones sin proyecto y con proyecto, y su diferencia constituye el costo evitado del fenómeno que se considera equivalente al beneficio del proyecto.

Los beneficios están asociados a diferentes conceptos y se estiman según recomendaciones o evaluaciones ad-hoc para cada uno de ellos. Los detalles de estas evaluaciones se encuentran incluidos en el Anexo XIV "Evaluación Económica" del presente informe.

14.1.3. Antecedentes para la cuantificación de los beneficios sociales

Se reunieron y/o generaron los antecedentes necesarios para llevar a cabo la evaluación económica, entre ellos los siguientes

a) Beneficio por menor daño en propiedades residenciales

Se calculó la superficie media de las viviendas en el área de influencia de la Quebrada Bonilla en base a la densidad de viviendas típica del sector, estimada en base a una cuadra representativa del área de influencia de Bonilla, donde se identificaron 43 viviendas, sobre una superficie total entre líneas oficiales de 3.481 m².

De este modo para las viviendas de Antofagasta se estimó una superficie media de la vivienda igual al cociente entre la superficie de la cuadra tipo y la cantidad de viviendas identificadas, la que resulta igual a 81 m².

b) Beneficio por recuperación de terrenos baldíos anegadizos

De manera particular, se analizó el predio perteneciente al anterior Club Hípico de Antofagasta, el cual posee una superficie de 30,3 ha.

Este sitio fue tasado en año 2013 en \$ USD 40.000.000, lo que equivale un valor del suelo igual a 2,74 UF/m², tomando como referencia 473 \$/USD y \$22.800 la UF

c) Beneficio por menor daño en propiedades comerciales e industriales

Además, para el sector en estudio se definió un valor de la propiedad igual a 18,4 UF/m², en base al valor de venta de locales comerciales y parques industriales dentro del área de influencia.

d) Beneficio por menor daño en establecimientos públicos

Por su parte, para el sector en estudio se definió un valor de la infraestructura pública igual a 29,5 UF/m², en base al valor de construcción de establecimientos públicos.

e) Beneficio por daño evitado en reparaciones de vehículos

Para la estimación de la tasa de motorización se consideró que la cantidad de viviendas en la comuna de Antofagasta según el censo de 2017 fue de 112.451 viviendas, mientras que el parque vehicular para el año 2021 contó con 93.922 vehículos, entregando una tasa de motorización igual a 0,84 vehículos/vivienda.

f) Beneficio por menores gastos de emergencia y limpieza de vías, sumideros y calles

Según la cuenta pública de Antofagasta, durante el año 2021 se destinaron 7.270 UF/mes en contratos destinados al aseo y mantención de la vía pública. Esto implicó un gasto anual de 87.245 UF, valor que se adoptó como CML.

g) Beneficio por menor ausentismo laboral

El número de trabajadores por vivienda se calculó como el cociente entre la fuerza laboral ocupada (Boletín estadístico de empleo, 2020) y la cantidad de viviendas existentes (censo 2017), ambos a nivel regional, obteniéndose como indicador 1,72 trabajadores/vivienda

Por otra parte, empleando el boletín estadístico de empleo del año 2020 se determinó que el ingreso medio de los ocupados fue de 27,44 UF/mes, implicando un costo diario de la mano de obra igual a CMO = 1,25 UF/día.

h) Beneficio por menor ausentismo escolar

Para el cálculo de la cantidad de estudiantes por vivienda se consideró que durante el año 2021 se matricularon 131.218 estudiantes en la región de Antofagasta según reportes del MINEDUC, considerando niveles desde educación parvularia hasta enseñanza media.

El promedio ponderado de la subvención mensual para los estudiantes fue igual a 2,65 UF/mes, implicando un costo medio diario por alumno igual a CMA = 0,12 UF/día.

i) Liberación de recursos públicos de salud

El costo de vacunación por persona se estimó igual a 0,72 UF, basado en la suma de los siguientes costos por vacunación:

- Vacuna contra la influenza: 0,36 UF.
- Vacuna contra la hepatitis: 0,18 UF.
- Vacuna contra el tétanos: 0,18 UF.

La tasa de habitantes por vivienda se determinó como el cociente entre la población regional y el número de viviendas en la región, según el censo del año 2017, equivalente a 3,1 hab/vivienda.

j) Liberación de recursos de la ONEMI en campañas de emergencia

El costo de un pack de emergencia se desagregó en diversos ítems (costo caja de alimentos, batería de cocina, colchones, frazadas, camas, cocinillas y gas, impermeabilización, kits de aislación). Estos valores se estimaron en base a información recabada del Plan de Reconstrucción del Terremoto y Maremoto del 27 de febrero de 2010 reportado por los ministerios del Interior, Planificación, Obras Públicas, Hacienda y Secretaría General de la Presidencia.

14.2. DETERMINACIÓN DE LAS ÁREAS DE INUNDACIÓN Y SUS CARACTERÍSTICAS

La determinación de las superficies inundadas por crecidas dentro del área de influencia física de la quebrada Bonilla, se realizó mediante la modelación hidráulica bidimensional de la quebrada y del plano urbano afectado para distintos periodos de retorno, tanto en las condiciones sin proyecto como en las condiciones con proyecto.

Los detalles de la modelación realizada con el software HEC-RAS para crecidas de periodo de retorno T= 20, 25, 50, 100, 200 y 500 años así como sus resultados y análisis se consignan en detalle el Anexo XIV del presente informe.

Como resultado de las simulaciones, se obtuvieron las áreas de inundación de las crecidas analizadas se indican en la Tabla 14.1.

Tabla 14.1 Áreas de inundación (ha)

Sin proyecto						
Uso de suelo	T = 20 años	T = 25 años	T = 50 años	T = 100 años	T = 200 años	T = 500 años
Residencial	3,8	3,9	4,6	5,3	5,7	7,9
Comercial e industrial	7,1	7,7	8,3	8,7	9,2	11,2
Establecimientos públicos	1,0	1,1	1,2	1,4	1,8	2,1
Infraestructura vial	7,8	8,5	9,9	12,7	16,3	24,4
Con proyecto						
Residencial	2,1	2,3	2,4	2,7	3,3	4,4
Comercial e industrial	6,8	7,1	7,6	8,7	9,9	12,8
Establecimientos públicos	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,8
Infraestructura vial	4,0	4,8	5,9	9,0	12,9	19,9

14.3. DETERMINACIÓN DE LOS BENEFICIOS SOCIALES

Se evaluaron los beneficios sociales como la diferencia de costos asociados a daños en la situación sin proyecto y la situación con proyecto, para crecidas aluvionales con efecto de cambio climático para periodos de retorno de T= 20, 25, 50, 100, 200 y 500 años.

Los conceptos incluidos en la determinación de los beneficios sociales son:

- Beneficios por menor daño en propiedades residenciales
- Beneficios por recuperación de terrenos baldíos anegadizos
- Beneficios por menor daño en propiedades comerciales e industriales
- Beneficios por menor daño en establecimientos públicos
- Beneficios por daño evitado en reparaciones de vehículos
- Beneficios por menor deterioro de la infraestructura vial
- Beneficios por menores gastos de emergencia y limpieza de vías, sumideros y calles
- Beneficios por menor ausentismo laboral
- Beneficios por menor ausentismo escolar
- Liberación de recursos públicos de salud
- Liberación de recursos de la ONEMI en campañas de emergencia

14.4. RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN ECONÓMICA SOCIAL

14.4.1. Beneficios totales generados por el proyecto

De acuerdo con lo explicado en el acápite precedente, los beneficios asociados a cada concepto relacionado con los daños o costos que generaría una crecida aluvional en la condición actual sin proyecto y en la condición futura con proyecto, fueron cuantificados para cada uno de los periodos de retorno que abarcó el análisis, desde T= 20 hasta T= 500 años.

La Tabla 14.2 resume los beneficios generados por las obras de control aluvional de la quebrada Bonilla.

Tabla 14.2 Beneficios (UF) del proyecto de obras aluvionales de la quebrada Bonilla

Concepto	Periodo de retorno (años)					
	T = 20	T = 25	T = 50	T = 100	T = 200	T = 500
Menor daño en propiedades residenciales	79.996	81.881	96.691	116.536	117.885	158.441
Recuperación de terrenos baldíos anegadizos	27.663	27.663	27.663	27.663	27.663	27.663
Menor daño en propiedades comerciales e industriales	264.024	286.608	305.698	313.054	316.991	347.371
Menor daño en establecimientos públicos	66.253	77.485	81.332	94.862	138.423	168.357
Daño evitado en reparaciones de vehículos	6.325	6.819	7.531	10.561	10.965	14.599
Menor deterioro de la infraestructura vial	10.088	10.990	12.535	14.726	17.727	26.067
Menores gastos de emergencia y limpieza de vías, sumideros y calles	169	180	192	218	263	350
Menor ausentismo laboral	3.941	4.068	4.692	5.707	5.828	8.091
Menor ausentismo escolar	263	270	317	383	389	526
Recursos públicos salud	468	456	601	738	668	967
Recursos públicos ONEMI	2.474	2.513	3.138	3.952	3.784	5.111
Beneficio total	459.189	496.419	537.252	584.448	636.800	752.432

14.4.2. Curva de frecuencia de los beneficios del proyecto y beneficio esperado anual

En base a la tabla anterior, se construyó la curva de frecuencia que se consigna en la Tabla 14.3 y que se muestra graficada en la Figura 14.1 y en la Figura 14.2 en función del periodo de retorno de las crecidas, donde cabe hacer notar que las crecidas de T= 10 años o inferiores no generan escorrentía en la quebrada Bonilla, razón por la cual los daños evitados por el proyecto son nulos.

De acuerdo con esta curva de frecuencia, el valor esperado del beneficio asciende a UF 37.340.

Tabla 14.3 Curva de frecuencia del beneficio generado por el proyecto

T (años)	Probabilidad excedencia (%)	Beneficios asociados a T(UF)	Fracción según clase Beneficio esperado (UF)*
10	10,00%	0	0
20	5,00%	459.189	11.480
25	4,00%	496.419	4.778
50	2,00%	537.252	10.337
100	1,00%	584.448	5.608
200	0,50%	636.800	3.053
500	0,20%	752.432	2.084
Beneficio Esperado (UF)			37.340

(*) $[(B_i + B_{i+1})/2] \cdot \Delta P_{exc}$

Figura 14.1 Curva de frecuencia de beneficios del proyecto de obras aluvionales Bonilla

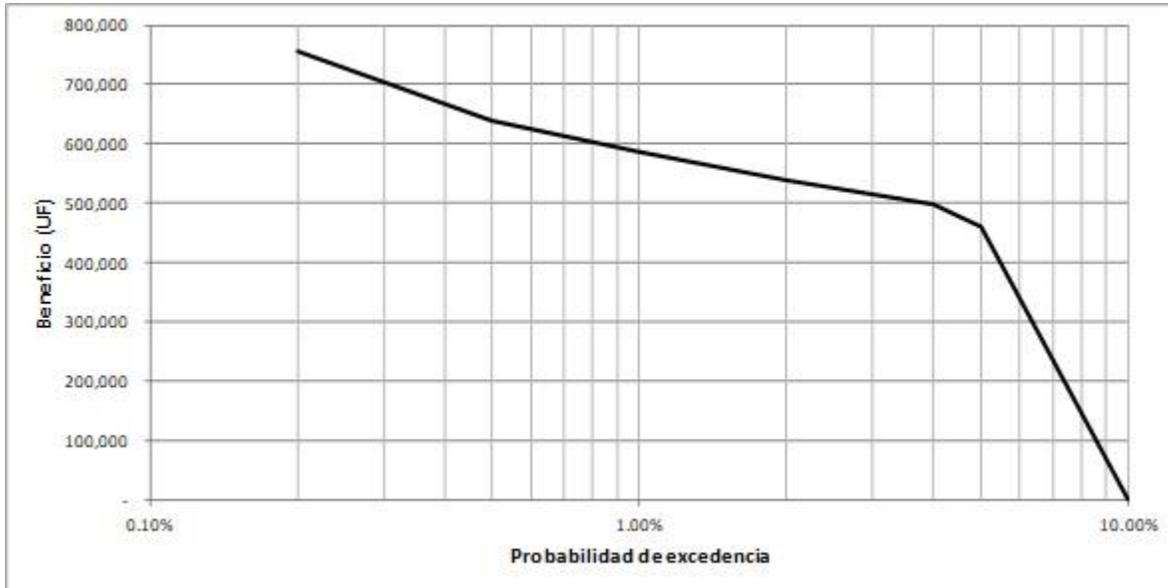
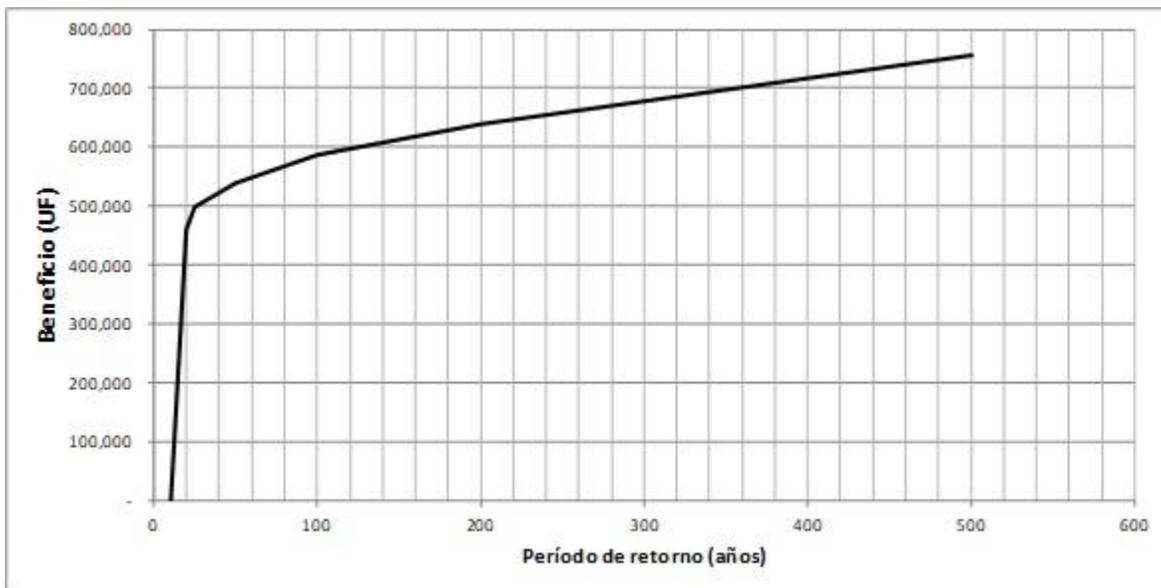


Figura 14.2 Curva de beneficios de obras aluvionales función del periodo de retorno



14.4.3. Rentabilidad social del proyecto

La rentabilidad del proyecto en términos sociales, se determinó empleando como indicador el Valor Actualizado Neto, para lo cual se consideró la siguiente información:

- Inversión inicial. La inversión asociada a la construcción del proyecto de obras de control aluvional de la quebrada Bonilla asciende a UF 402.421.

- Costo de mantención y operación anual de las obras se supuso igual a 2% de la inversión, lo que equivale a UF 8.048.
- Beneficios esperados anuales. Conforme a lo indicado en el acápite precedente, los beneficios esperados anualmente resultan de UF 37.340.
- La tasa de descuento para el proyecto igual a 6%.
- La vida útil del proyecto se consideró igual a 50 años.

El Valor actualizado neto (VAN) que se obtiene para el proyecto es de UF 59.268.

Por otro lado, la Tasa Interna de Retorno (TIR) del proyecto resulta de 6,7 %.

15. CONSTRUCCIÓN, OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE LAS OBRAS

Se revisan a continuación las Etapas y programa de construcción propuestas para las Obras de Control Aluvional de Bonilla, junto con recomendaciones de Operación y Mantenimiento.

Para mayores antecedentes referirse a los Anexos XV “Etapas y Programa de Construcción” y Anexo XVI “Recomendaciones de Operación y Mantenimiento”.

15.1. ETAPAS Y PROGRAMA DE CONSTRUCCIÓN

Se consideró que las Obras de Control Aluvional proyectadas se ejecutarán en una única Licitación para la Construcción para lo cual se estimó un plazo de 560 días corridos.

La estimación se basó en los siguientes supuestos:

- Dos o tres frentes de trabajo.
- Simultaneidad en el desarrollo de las actividades.
- Rendimientos conservadores. Cabe señalar que establecer plazos demasiado ajustados implica un aumento de los costos de construcción.
- La RCA A del proyecto original de año 2001 señala un plazo de ejecución para la construcción de las obras de 723 días, valor que se adoptó como plazo máximo.
- Secuencia constructiva en etapas:

Atendiendo a la naturaleza de las obras proyectadas se establecieron 9 etapas constructivas desde la instalación de faenas hasta el cierre del proyecto. Las etapas son las siguientes:

- a) Etapa 1. Instalación de faenas contratista e ITO y replanteo de obras.
- b) Etapa 2. Movimiento de tierras. En esta etapa se da inicio a los trabajos de escarpes y excavaciones desde aguas arriba hacia aguas abajo, en 3 frentes (parte alta de brazos norte y sur y tercer frente excavaciones destinadas a los canales colectores).

- c) Etapa 3. Preparación de sello de fundación de obras y rellenos muros de tierra. Se realizan en esta etapa las labores de preparación de sello (compactación y/o rellenos de acuerdo a informe geotécnico).
- d) Etapa 4. Obras de hormigonado. En esta etapa se inician los trabajos de hormigonado para lo cual se deberá previamente establecer una modularización de los trabajos. Esta modularización aplica básicamente a obras lineales como son los canales colectores y los parapetos de los muros de tierra. Así las cuadrillas realizarán el hormigonado de los módulos con una frecuencia de al menos una vez por semana. El resto del tiempo preparará los encofrados y enfierraduras.

Se consideran varios frentes de trabajo, uno en los muros estabilizadores de pendientes y otros en los muros de tierra de los brazos norte y sur.

- e) Etapa 5: Obras de hormigonado (canales de contorno). Se prosigue con la construcción de los canales de contorno.
- f) Etapa 6: Obras de hormigonado otras estructuras hidráulicas. Corresponde a la construcción de: alcantarilla, obra de confluencia y dissipador de energía.
- g) Etapa 7: Caminos de Servicio. En esta etapa se construyen los caminos de servicio norte y sur.
- h) Etapa 8: Desmovilización. Corresponde a la etapa de abandono del área de trabajo y limpieza y remoción de basuras.
- i) Etapa 9: Cierre del Proyecto.

La Figura 15.1 presenta la Carta Gantt de construcción para el proyecto.

15.2. RECOMENDACIONES DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO

Para el mantenimiento de las obras de Control Aluvional se recomienda:

- Mantener a un encargado que realice visitas periódicas a las obras con una frecuencia semanal, registrando mediante fotografías, ficha y actas los principales hallazgos de su visita inspectiva.
- Control anual y reparación de los elementos de hormigón armado o shotcrete que presenten daños, grietas o fisuras. El control de las eventuales fisuras se llevará a cabo en forma visual, debiendo recorrerse las obras y una vez detectada una fisura deberá procederse a la medición de sus dimensiones básicas (longitud, profundidad y espesor) con una regla graduada al milímetro. Se deberá generar monografías de cada grieta o fisura de manera que sean fácilmente identificable. Se recomienda generar archivos fotográficos. Deberá controlarse con una frecuencia mensual.

Tabla 15.1: Carta Gantt

Actividad	Duración	Fecha inicio	Fecha término	sem 4	sem 8	sem 12	sem 16	sem 20	sem 24	sem 28	sem 32	sem 36	sem 40	sem 44	sem 48	sem 52	sem 56	sem 60	sem 64	sem 68	sem 72	sem 76	sem 81
Actualización obras de control aluvional Quebrada Bonilla	560	01-01-2024	14-07-2025																				
INICIO DE CONTRATO	0	01-01-2024	01-01-2024																				
Entrega de Terreno y Planos Aprobados para su construcción	0	01-01-2024	01-01-2024																				
HITOS	250	20-06-2024	25-02-2025																				
Hito 1 (Avance 30%)	0	20-06-2024	20-06-2024																				
Hito 2 (Avance 50%)	0	05-10-2024	05-10-2024																				
Hito 3 (Avance 75%)	0	25-02-2025	25-02-2025																				
INSTALACIÓN DE FAENAS	15	07-01-2024	22-01-2024																				
Instalación de faenas Contratista	15	07-01-2024	22-01-2024																				
Instalación de faenas ITO	15	07-01-2024	22-01-2024																				
Replanteos	3	07-01-2024	10-01-2024																				
MOVIMIENTOS DE TIERRA	210	22-01-2024	19-08-2024																				
Escarpes	45	22-01-2024	07-03-2024																				
MEP	45	22-01-2024	07-03-2024																				
Muros de tierra	45	22-01-2024	07-03-2024																				
Canales de contorno	45	22-01-2024	07-03-2024																				
Excavaciones	90	21-02-2024	21-05-2024																				
MEP	90	21-02-2024	21-05-2024																				
Muros de tierra	90	21-02-2024	21-05-2024																				
Canales de contorno	90	21-02-2024	21-05-2024																				
Canalón de encauzamiento	15	21-02-2024	07-03-2024																				
Preparación sello de fundación de obras	10	21-05-2024	31-05-2024																				
Rellenos terraplén muros de tierra	80	31-05-2024	19-08-2024																				
OBRAS DE HORMIGÓN ARMADO	255	19-08-2024	01-05-2025																				
Muro guardarradial	30	19-08-2024	18-09-2024																				
MEP	60	19-08-2024	18-10-2024																				
OBRAS DE H.A. MUROS DE TIERRA	75	19-08-2024	02-11-2024																				
Muro parapeto	75	19-08-2024	02-11-2024																				
Vertedero	75	19-08-2024	02-11-2024																				
Obra terminal	75	19-08-2024	02-11-2024																				
CANALES COLECTORES	180	02-11-2024	01-05-2025																				
Canal colector unitario norte	180	02-11-2024	01-05-2025																				
Canal colector unitario sur	100	02-11-2024	10-02-2025																				
Canal colector unificado	20	10-02-2025	02-03-2025																				
Alcantarilla	10	02-03-2025	12-03-2025																				
Obra de confluencia	20	12-03-2025	01-04-2025																				
Obra disipadora de energía	20	01-04-2025	21-04-2025																				
REVESTIMIENTO MUROS DE TIERRA	60	01-05-2025	30-06-2025																				
Shotcrete 8 cm	60	01-05-2025	30-06-2025																				
CONSTRUCCIÓN ENROCADOS DE PROTECCIÓN	20	01-05-2025	21-05-2025																				
Guardarradial	20	01-05-2025	21-05-2025																				
MEP	20	01-05-2025	21-05-2025																				
Muros de tierra	20	01-05-2025	21-05-2025																				
CAMINOS DE SERVICIO	50	01-05-2025	20-06-2025																				
Camino de servicio norte	30	01-05-2025	31-05-2025																				
Camino de servicio sur	20	31-05-2025	20-06-2025																				
DESMOVILIZACIÓN	10	30-06-2025	10-07-2025																				
Desmovilización y reconstitución general del área de trabajo	10	30-06-2025	10-07-2025																				
CIERRE DEL PROYECTO	3	10-07-2025	13-07-2025																				
Entrega de planos As-Built	3	10-07-2025	13-07-2025																				
Término de proyecto	0	13-07-2025	13-07-2025																				

ACTUALIZACIÓN DE DISEÑO DE OBRAS DE CONTROL ALUVIONAL EN QUEBRADA BONILLA, ANTOFAGASTA

- Control de deformaciones y asentamientos tanto en los muros de tierra como estabilizadores de pendientes. Las deformaciones del muro pueden estar dadas por asentamientos y/o desplazamientos. Para llevar un control de estos se deberá realizar levantamientos topográficos anuales. Estos se basarán en el control de 2 puntos de referencia que se materializarán a lo largo de los muros, sobre su coronamiento, ubicados a 1/3 y 2/3 de la longitud. Cada un año se procederá a confrontar la cota y coordenadas de estos puntos con los señalados. Para ello se dispondrá un punto de referencia fuera del área de construcción del muro y de la poza del embalse, en un sector protegido de la manipulación o acción por parte de terceras personas.
- Reparación y reposición de elementos que pudieran ser dañados o hurtados producto del vandalismo.
- Tomar las acciones necesarias para que el sistema se mantenga libre de desperdicios y no se convierta en un microbasural.
- Mantener libre de escombros u otros el dissipador de energía y obra de confluencia.
- Monitoreo periódico de las obras durante eventos meteorológicos pronosticados como extremos, lo cual debe ser informado a la ONEMI.

Adicionalmente se recomienda:

- Dar término a las actividades de extracción de áridos de ambos brazos, ya las faenas cuales alteran de manera significativa la topografía del sector.
- Incorporar barreras tipo pretilas de tierra u otros obstáculos (por ejemplo barreras new jersey) para impedir que vehículos ajenos transiten por las obras y lleven escombros a depositar.
- Erradicar a gente en situación de calle que ocupe las obras como viviendas.
- Elaboración de plan de operación y mantenimiento.
- Elaboración de plan de emergencia.

En caso de producirse un evento aluvional se recomienda:

- Realización de levantamientos topográficos para determinar el volumen de detritos retenidos.
- Actualización de estudio hidrológico incorporando el evento meteorológico.
- Completo diagnóstico hidráulico – estructural del sistema y determinar que acciones deben ejecutarse para extender su vida útil. Cabe señalar el evento aluvional implicará un cambio en las condiciones topográficas dada la acumulación de detritos tanto en los Muros de Tierra como el que se espera en los Muros Estabilizadores de Pendiente.
- Realizar nuevas modelaciones hidráulicas 2D para cuantificar C_v (concentración volumétrica).
- Evaluar necesidad de incorporar nuevos Muros de Tierra o elevar los existentes al momento del evento aluvional.
- Diagnóstico geotécnico – estructural tanto de los muros de tierra como obras de hormigón armado.

- Ejecutar las obras y/o trabajos que resulten del diagnóstico post-aluvional.

16. ANÁLISIS DE INTERFERENCIAS, CAMINOS DE SERVICIOS Y EXPROPIACIONES

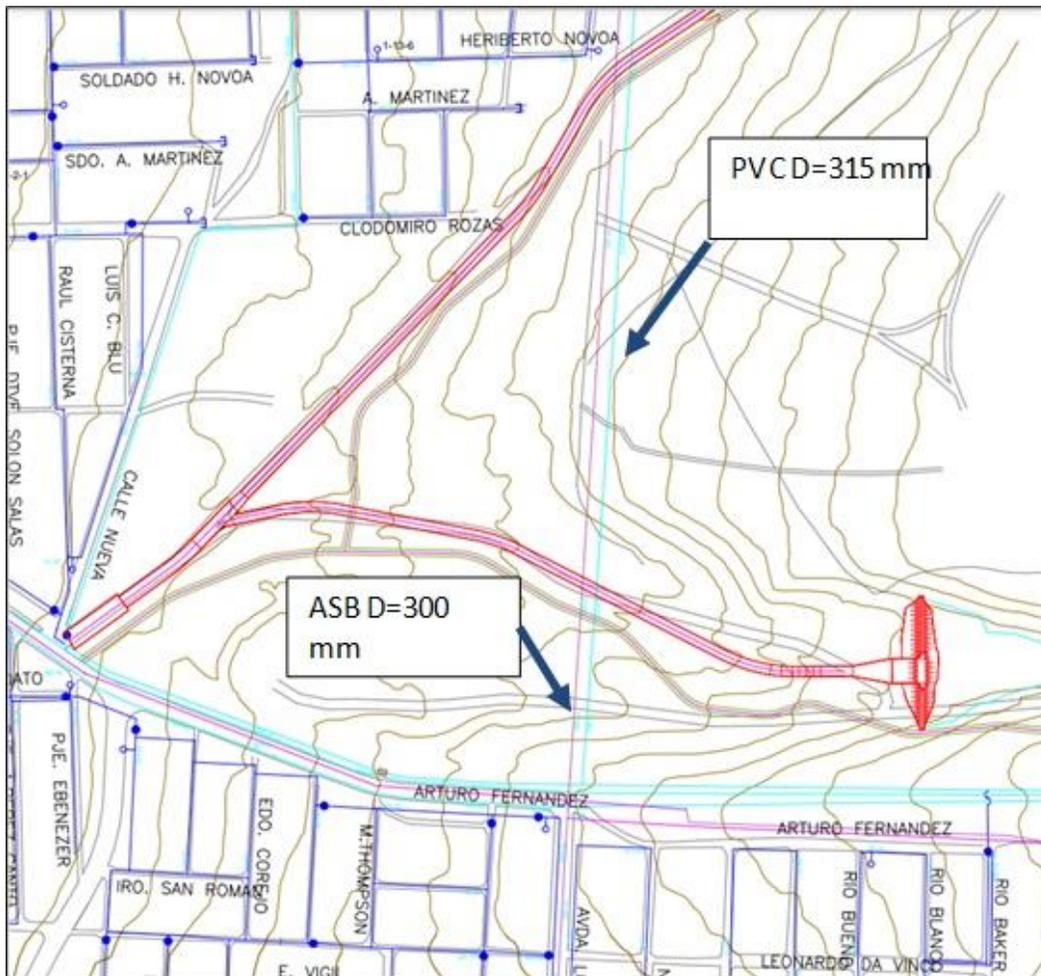
16.1. INTERFERENCIAS

Se analizaron las posibles interferencias que se generarían entre las obras de control aluvional de la quebrada Bonilla proyectadas y las redes de servicios públicos durante la fase de construcción de las obras.

Existen dos matrices que cruzan soterradamente el lecho de los brazos norte y sur de la quebrada Bonilla, a una profundidad y localización que no pudo ser precisada por la empresa sanitaria Aguas Antofagasta de D= 300 mm de cemento asbesto y D= 315 mm de PVC.

La Figura 16.1 ilustra la situación, mostrando ambos brazos de la quebrada cruzándose con las 2 matrices de agua potable.

Figura 16.1 Red de agua potable de Antofagasta en sectores próximos a la quebrada Bonilla

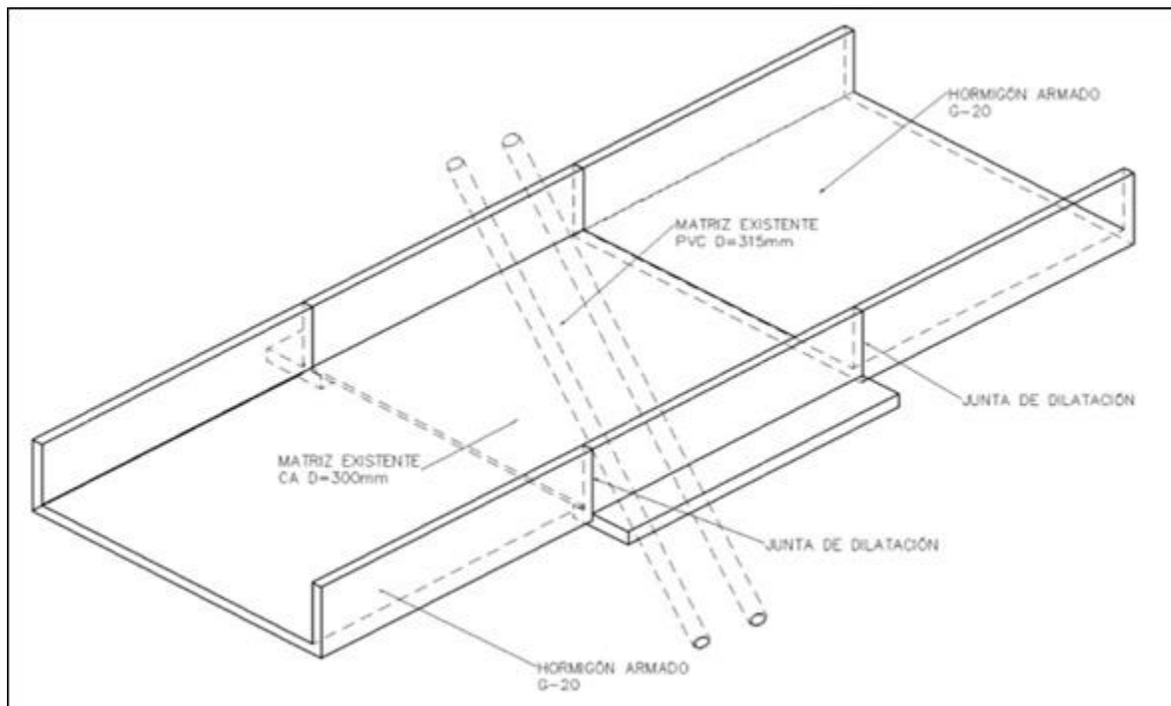


Dado que en estos brazos el proyecto de control aluvional consulta construir los canales unitarios norte y sur, y atendido el hecho que la empresa requiere tener acceso rápido y expedito a las cañerías en caso de una rotura bajo los canales, se proyectaron tramos con un hormigón de menor calidad en las zonas de cruce, como se propuso a Aguas Antofagasta.

La Figura 16.2 muestra una vista isométrica de uno de los canales en el sector de cruce de las matrices de agua potable.

En relación a los estanques de agua potable se puede mencionar que el acceso es por calle Guardiamarina Fernández, de manera que la construcción de las obras de control aluvional que se hará en el cauce principal del brazo sur de la quebrada Bonilla, no interferirá de modo alguno con el acceso al recinto.

Figura 16.2 Vista isométrica de la solución planteada para cruce con matrices de agua potable



16.2. CAMINOS DE SERVICIO

Los caminos de servicios se consideraron con un trazado paralelo al de los canales colectores, comenzando en la obra disipadora de energía hasta la obra proyectada aguas arriba a mayor elevación, tanto en el brazo norte como sur de la quebrada Bonilla.

Los caminos de servicios se proyectaron a una cota mayor que los canales colectores.

El camino de servicio norte presentaría una superposición local y parcial con la zona de concesión de uso gratuito del Ministerio de Bienes Nacionales.

En la Figura 16.3 se puede observar que existen 3 polígonos indicados como concesión de uso gratuito, permiso de ocupación y arriendo que corresponden a los sitios de propiedad fiscal administrada por BBNN en el área de estudio

La Figura 16.4 muestra esquemáticamente el layout de las obras del proyecto, pudiéndose advertir que parte de los canales unitarios norte y sur, y el canal unificado y dissipador de energía, colindan con el polígono de color celeste. En esta misma figura también se indica en color verde los trazados de los caminos de servicio proyectados.

16.3. EXPROPIACIONES

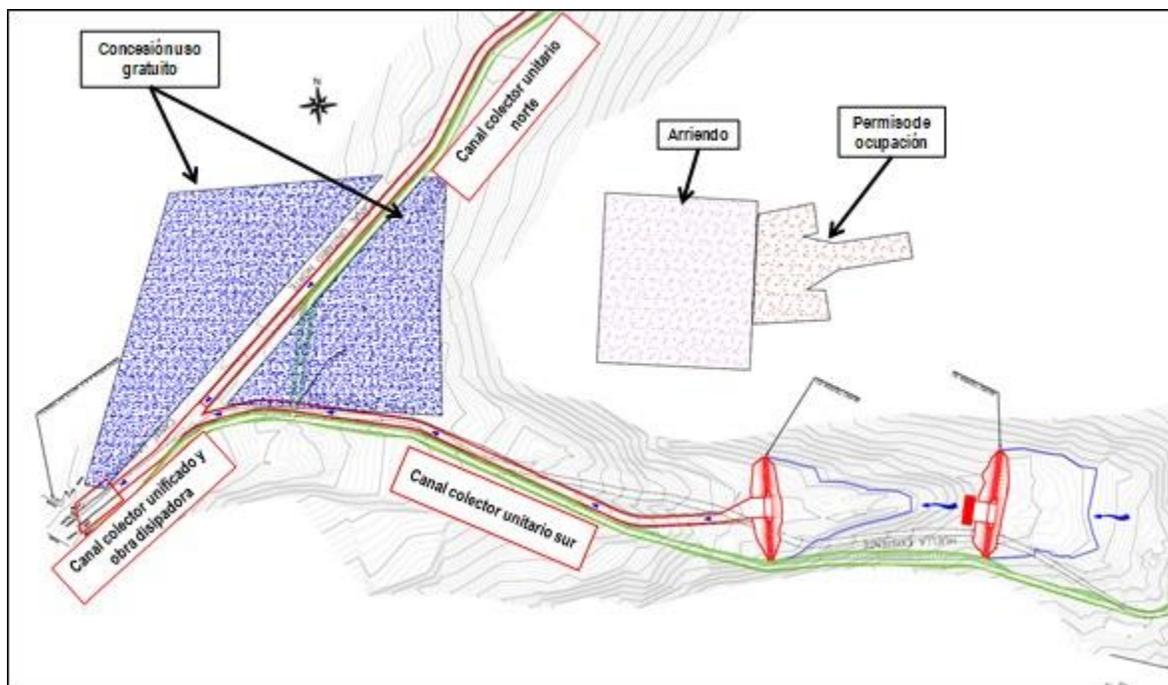
En el presente proyecto, no se contemplan expropiaciones a terceros toda vez que el terreno donde se construirán las obras de control aluvional, es propiedad fiscal administrada por Bienes Nacionales.

El cauce de la quebrada corresponde a un bien nacional de uso público cuyo uso es tuición del Ministerio de Obras Públicas a través de su Dirección General de Aguas (DGA).

Figura 16.3 Propiedad fiscal administrada por Bienes Nacionales



Figura 16.4 Layout de las obras propuestas y propiedad fiscal



17. ACTIVIDADES DE PARTICIPACIÓN CIUDADANA

Durante el desarrollo de la presente Consultoría se ejecutaron diversas actividades de Participación Ciudadana y entre ellas tres reuniones en las cuales participaron distintas organizaciones de Juntas de Vecinos y Comités de Vivienda comprendidas en el área de influencia definida para el proyecto, representantes de los distintos servicios e instituciones participantes (equipo consultor, PNUD, Programa AdaptaClima, DOH -MOP, Aguas Antofagasta).

Los talleres se realizaron en las siguientes fechas 13 de abril, 14 julio y 29 de septiembre del 2022.

Todos los detalles de estas actividades quedaron consignados en el Informe Final de Participación Ciudadana que forma parte de los documentos finales del proyecto.

17.1. TALLER DE PARTICIPACIÓN CIUDADANA N°1

Al Taller de PAC N°1 asistieron representantes de las Juntas de Vecinos: Mirador, Pedregal, Renacer 1, Carol Urzúa, Balmaceda, Esperanza Nuestra; de los Comités de Vivienda Campamento Futuro Antofagasta y Villa Esperanza; representantes del PNUD, Programa AdaptaClima, DOH-MOP y de AC Ingenieros Consultores.

Las principales actividades realizadas en este taller fueron las siguientes:

- Apertura y presentación de equipos y actividades a realizar en Taller.
- Explicación del proceso de participación ciudadana.

- Contextualización del proyecto.
- Presentación general de los alcances del proyecto
- Exposición de las obras proyectadas.
- Fase de consultas, intervenciones, dinámica de reflexión y trabajo grupal.

17.2. TALLER DE PARTICIPACIÓN CIUDADANA N°2

Al Taller de PAC N°2 asistieron representantes de las Juntas de Vecinos: Mirador, Pedregal, Renacer 1, Carol Urzúa, Balmaceda, Esperanza Nuestra; de los Comités de Vivienda Campamento Villa Esperanza; representantes del PNUD, DOH-MOP, Aguas Antofagasta y de AC Ingenieros Consultores.

Las principales actividades realizadas en este taller fueron las siguientes:

- Ronda de preguntas, intervenciones y opiniones, las que fueron recogidas, discutidas y respondidas por parte del equipo consultor y representantes de los servicios e instituciones presentes.
- Aplicación de encuesta de satisfacción para conocer la percepción y valoración de los asistentes sobre la instancia llevada a cabo y sus alcances.

17.3. TALLER DE PARTICIPACIÓN CIUDADANA N°3

Al Taller de PAC N° 3 asistieron representantes de las Juntas de Vecinos: Balmaceda, Carol Urzúa, Mirador, Pedregal y Campamento Villa Esperanza. Además, se sumaron representantes de Villa México, Villa Panorama, Bonilla Bajo, Villa Escondida, Unión Altos Club Hípico y Villa Ferrocarril.

Las principales actividades realizadas en este taller fueron las siguientes:

- Apertura y presentación de equipos y actividades a realizar en Taller
- Presentación equipo PNUD – Contextualización del proyecto
- Descripción del proceso participativo
- Descripción del diseño final del proyecto
- Instancia participativa: dinámica de reflexión y trabajo grupal
- Exposición de resultados del trabajo grupal
- Plenario final, donde se recogieron las últimas dudas, sugerencias y comentarios de los participantes.
- Aplicación de encuesta de satisfacción sobre el proyecto, la jornada participativa y el grado de importancia del proyecto para la ciudad de Antofagasta.

18. ESTUDIO DE ANÁLISIS DE PERTINENCIA AMBIENTAL

En conformidad con los Términos de Referencia se efectuó un estudio de análisis de pertinencia ambiental con el objetivo de determinar si el actual proyecto y las modificaciones que se introdujeron al proyecto original elaborado por EWI & AC (2000), debían ser sometidas a una aprobación del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental.

En el Informe Final de Análisis de Pertinencia Ambiental se incluyen todos los detalles del análisis realizado el que forma parte del Dossier de información para presentar al Servicio de Evaluación Ambiental (SEA), de una pertinencia ambiental de todos los cambios introducidos al proyecto

Debe señalarse que en términos generales, el presente proyecto de “Actualización de Obras de Control Aluvional en Quebrada Bonilla, Antofagasta”, reduce la cantidad de obras a construir en relación al proyecto original de EWI & AC (2000), lo cual se debe principalmente a la incorporación de hondonadas generadas por actividades de extracción de áridos en las últimas dos décadas, lo que ha significado cambios topográficos de los cauces que son posibles de aprovechar para la retención y almacenamiento de sólidos acarreados por flujos aluvionales de la quebrada.

Así a modo de ejemplo, el proyecto de EWI & AC (2000) contemplaba originalmente para la quebrada Bonilla un total de 14 muros de tierra y 36 muros estabilizadores de pendiente, en tanto que el actual proyecto consulta solo 8 muros de tierra y 5 muros estabilizadores de pendiente.

El hecho anteriormente se ve también reflejado en el global de las cubicaciones de las principales partidas como excavaciones que bajan de 184.100 m³ consultados en el proyecto del año 2000 a 40.811 m³ en el proyecto actual, o de enrocados que se reducen de 18.900 m³ a 1.405 m³. No obstante lo anterior, existen algunas partidas que incrementaron sus cantidades lo cual tiene relación con las condiciones propias del diseño o cambio normativo (acero).

La principal conclusión del análisis de pertinencia ambiental desarrollado, es que las obras y acciones que componen específicamente el proyecto “Actualización de Diseño de Obras de Control Aluvional en Quebrada Bonilla, Antofagasta” no constituyen por sí misma un proyecto que deba ser presentado al SEIA, ya que sus obras y actividades no presentan cambios de consideración respecto de las obras y actividades del Proyecto “Sistema de Disipación de Energía Aluvional Quebradas Club Hípico Bonilla y Farellones” aprobado mediante RCA 203/2001 de la entonces COREMA de la Región de Antofagasta y como tal, no debe someterse al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental.

19. DOCUMENTOS PARA LICITACIÓN Y CONSTRUCCIÓN DE LAS OBRAS

Formó parte del estudio la elaboración de los Documentos para Licitación y Construcción de las Obras. Estos documentos fueron elaborados según los requerimientos establecidos en los Términos de Referencia de la presente Consultoría.

La totalidad de los documentos de Licitación se incluye dentro del Anexo XVII “Documentos de Licitación” el cual consta de 3 partes:

- Anexo XVII-A: Especificaciones Técnicas Generales
- Anexo XVII-B: Especificaciones Técnicas Especiales
- Anexo XVII-C: Bases Administrativas

19.1. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

Las Especificaciones Técnicas Generales y Especiales del proyecto, incluyen las siguientes partidas:

- Instalación de Faenas.
- Movimientos de Tierras
- Moldajes
- Armaduras
- Hormigones
- Suministro y Confección de Enrocados
- Revestimientos de Muros de Tierras.

19.2. CUBICACIONES

En general, las cubicaciones se determinaron por medio de los softwares Civil 3D y Autocad, en conjunto de planillas de cálculo para formar la base de cantidades requeridas de material de cada partida definida para la construcción de las obras aluvionales.

Los volúmenes de movimiento de tierra se determinaron comparando las superficies “Proyectadas” y “Actual” mediante Civil 3D.

La superficie “Actual” se obtuvo directamente del levantamiento topográfico efectuado durante el desarrollo del estudio.

Las superficies proyectadas son esencialmente de 2 tipos:

- Superficies para obras de hormigón armado, donde se consideró una zanja de trabajo con el sobreechanco necesario para la materialización de las obras por razones constructivas. Este es el caso de los canales unitarios y unificado, muros estabilizadores de pendiente y muro guardarradier.
- Las otras superficies corresponden al caso de los muros de tierra, camino de servicio y encauzamientos del brazo sur.
- Los diseños de las obras están a un nivel de Ingeniería de Detalle por lo que la precisión del cálculo es +/- 10%.

19.3. ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS

19.3.1. Metodología

El análisis de precios unitarios se basó en la revisión de proyectos de construcción de obras de control aluvional dentro de la Región de Antofagasta, antecedentes de libre acceso mediante la página de “Mercado Público”.

Dentro de los proyectos consultados se tienen los siguientes:

- “Construcción Obras de Control Aluvional en Quebrada El Toro Etapa III, Antofagasta”, 2020 (ID Mercado Público: 1501-30-O120).
- “Construcción Obras de Control Aluvional en Quebrada Farellones, Antofagasta”, 2016 (ID Mercado Público: 1501-26-LR16).
- “Construcción Obras de Control Aluvional en Quebrada El Huáscar, Antofagasta”, 2020 (ID Mercado Público: 1501-29-O120).
- “Construcción Obras de Control Aluvional en Quebradas, Sectores República y Tiro Al Blanco, Taltal, Ciudad De Taltal”, 2021 (ID Mercado Público: 1501-18-O121).

Cabe señalar que las licitaciones consultadas se clasifican según su forma de precio y pago como del tipo de serie de Precios Unitarios, estando ya incorporado en cada una de las partidas el GGyU.

Por otra parte, de acuerdo al esquema de las licitaciones consultadas se les pidió a las empresas Constructoras presentar además el detalle de los GGyU considerados.

De las ofertas económicas presentadas por las diferentes empresas Constructoras se elaboró una base de datos de Precios Unitarios para las principales partidas, propias de un proyecto de control aluvional.

Una vez formada la base de datos por partida con precios en UF, se procedió a filtrar los precios por partida eliminando valores fuera de rango.

Con los datos depurados, se determinó el valor máximo, mínimo y promedio. A partir de estos valores se determinó un valor de Precio Unitario Referencial empleando para ello el criterio de ponderación $PU = (\text{valor min} + \text{valor máx.} + 4 * \text{valor promedio}) / 6$.

El propósito de este valor es tener una referencia de los valores de mercado por las partidas que cobran las empresas Constructoras en licitaciones con modalidad de pago en base a serie de Precios Unitarios.

De manera paralela, y tomando como base los rendimientos de Mano de Obra, Materiales y Equipos presentados por las empresas Constructoras en las licitaciones estudiadas se elaboraron las series de Precios Unitarios para el presente estudio, las que fueron cotejadas con el listado de Precios Unitarios de Referencia anteriormente señalado.

La serie de Precios Unitarios elaborada fue actualizada tanto en UF como de las partidas más relevantes, en base a cotizaciones de mercado durante el mes de julio de 2022. Así se consideró el valor actual del combustible, mano de obra y hormigón, además de partidas de menor cuantía que no representan gran relevancia en los costos.

Por otra parte, en base a la comparación de los Gastos Generales y Utilidades (GGyU) declarados por las empresas Constructoras en las licitaciones en estudio y la descripción básica de los ítems que componen dichos gastos estipulada por la Dirección de Obras Hidráulicas para proyectos de obras de control aluvional en la Región de Antofagasta se determinó un valor de GGyU de 77,4% del Costo Directo de las obras.

19.3.2. Precios unitarios y estimación de gastos generales y utilidades

En el Anexo XIII “Cubicaciones, análisis de precios unitarios y presupuesto de construcción de las obras” se presenta la base de datos recopilada del listado de PU presentados por las empresas Constructoras en las Licitaciones consultadas, como también una tabla con los valores máximo, mínimo, promedio y referencial considerados para el Análisis de Precios Unitarios del presente estudio.

En dicho anexo se resumen también los precios unitarios estimados correspondientes al costo directo de cada partida para las 17 partidas más relevantes en la construcción de las obras de control aluvional.

De igual manera en este anexo se presenta la estimación de los GG y U de las diferentes licitaciones públicas analizadas, determinándose un valor de 77,4% para el presente proyecto.

Cabe mencionar que el contratista deberá contemplar todas las partidas indicadas por la DOH en la Tabla 3.20 que se encuentra en el Anexo XIII “Cubicaciones, análisis de precios unitarios y presupuesto de construcción de las obras”, donde se detallan los ítems básicos que componen los gastos generales: personal indirecto de la obra; pensiones y viáticos del personal indirecto; equipos indirectos (Camionetas, bus de traslado personal, camión 3/4, otros); equipos de apoyo (topografía, laboratorio, señalizaciones en obra); instalaciones de faenas; movilización de maquinaria; otros gastos indirectos; seguros - Boletas de garantía - Gastos Financieros; caminos de acceso a frentes de trabajo; y gastos de oficina central. El contratista debe considerar además todos los gastos asociados a la materialización de los trabajos que puedan ser indicados.

19.4. PRESUPUESTO DE CONSTRUCCIÓN DE LAS OBRAS

Para la determinación del costo de las obras se consideraron los PU detallados en el Anexo XIII, 10% de imprevistos, 75% de gastos generales y utilidades. Los presupuestos fueron generados en UF y \$ considerando una equivalencia \$33.504,3 \$/UF de fecha 09/08/22.

Los presupuestos fueron calculados para el conjunto de obras de cada brazo de la quebrada Bonilla y del tramo común, aguas abajo de la confluencia. Adicionalmente se prepararon presupuestos por tipo de obra.

En la Tabla 19.1 se resumen las principales partidas del presupuesto de construcción de las obras de control aluvional proyectados para la quebrada Bonilla.

Tabla 19.1 Presupuesto total de construcción obras de control aluvional quebrada Bonilla

Ítem	Partida	Cantidad	Unidad	Precio Unitario (UF)	Precio (UF)	Precio Unitario (\$)	Precio (\$)
1	Movimientos de tierra						
1.1	Escarpe	25.665	m ³	0,076	1.940	2.533	65.008.609
1.2	Excavación en terreno común	28.488	m ³	0,103	2.943	3.461	98.596.193
1.3	Excavación en Roca	3.489	m ³	0,759	2.649	25.436	88.755.100
1.4	Relleno Terraplén	46.418	m ³	0,329	15.290	11.036	512.285.269
1.5	Retiro de Excedentes	-	m ³	0,356	-	11.928	-
2	Hormigón Armado						
2.1	Hormigón emplantillado G5	12.988	m ²	0,407	5.286	13.636	177.106.565
2.2	Hormigón G25	7.723	m ³	9,373	72.391	314.036	2.425.402.309
2.3	Acero	681.032	kg	0,088	59.590	2.932	1.996.532.102
3	Confección de Enrocados						
3.1	Gravilla	281	m ³	0,500	140	16.739	4.696.391
3.2	Suministro y Colocación de Geotextil	1.403	m ²	0,075	105	2.503	3.511.013
3.3	Enrocado	1.405	m ³	1,467	2.062	49.164	69.071.536
4	Revestimiento Muros de Tierra						
4.1	Shotcrete 8 cm incl. Malla Acma	3.207	m ²	1,340	4.297	44.896	143.962.262
4.2	Shotcrete 20 cm incl. Malla Acma	1.341	m ²	2,233	2.994	74.815	100.317.151
5	Misceláneos						
5.1	Juntas de Dilatación	1.157	m	1,938	2.243	64.941	75.150.170
5.2	Juntas de Contracción	1.083	m	1,011	1.095	33.873	36.684.294
5.3	Barbacanas PVC D=3"	1.355	m	0,211	285	7.056	9.559.040
SUBTOTAL COSTO DIRECTO					173.310		5.806.638.003
IMPREVISTOS (10%)					17.331		580.663.800
TOTAL COSTO DIRECTO					190.641		6.387.301.803
GASTOS GENERALES Y UTILIDADES (77,4%)					147.528		4.942.812.852
TOTAL COSTO SIN IVA					338.169		11.330.114.655
IVA					64.252		2.152.721.785
COSTO TOTAL					402.421		13.482.836.440

19.5. PLANOS

El proyecto en su totalidad se compone de 174 planos, de los cuales 34 corresponde a planos de estudios básicos (levantamientos topográficos y estratigrafía calicatas) y 140 a planos de Ingeniería de Detalles.

Los planos fueron agrupados en Volúmenes:

- Volumen I Estudios Básicos
- Volumen II Ingeniería de Detalles

Los planos fueron clasificados por Áreas (Generales, Brazo Norte o Sur) y a su vez, clasificados por tipo de obra.

19.6. DOCUMENTOS DE LICITACIÓN

De acuerdo a lo establecido en los TR's del proyecto se elaboraron los Documentos para Licitación, los cuales fueron incluidos en el Anexo XVII "Bases Administrativas" –C "Documentos de Licitación".

Las Bases Administrativas se componen de una serie de apéndices, los cuales se detallan en la Tabla 19.2.

Tabla 19.2 Anexo XVII-C: Bases Administrativas

Denominación	Materia
Anexo XVII-C-1	Listado de Obras
Anexo XVII-C-2	Listado de Planos
Anexo XVII-C-3	Presupuesto Oficial
Anexo XVII-C-4	Programa de Construcción
Anexo XVII-C-5	Programa de Inversiones
Anexo XVII-C-6	Modelo de Letreros
Anexo XVII-C-7	Instructivo sobre Seguridad e Higiene Industrial
Anexo XVII-C-8	Modelo de Análisis Precios Unitarios
Anexo XVII-C-9s	Listado de Maquinarias y Equipos
Anexo XVII-C-10	Modelo de Listado Contratos en Ejecución
Anexo XVII-C-11	Modelo de Pólizas De Seguros
Anexo XVII-C-12:	Declaración de Impacto Ambiental y Resolución de Calificación Ambiental
Anexo XVII-C-13:	Especificaciones Ambientales Generales
Anexo XVII-C-14	Estándares Sociales y Ambientales PNUD
Anexo XVII-C-15	Bases Especiales de Participación Ciudadana
Anexo XVII-C-16	Bases de Medición y Pago

20. RESUMEN, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se resumen a continuación las principales conclusiones del estudio "Actualización de Diseño de Obras de Control Aluvional en Quebrada Bonilla, Antofagasta".

20.1. SITUACIÓN ACTUAL DE LA QUEBRADA BONILLA

- Los conos de deyección de ambos brazos de la quebrada Bonilla han sido intensamente explotados para la extracción de áridos.
- La actividad realizada generó profundas hondonadas y zonas de botaderos de materiales de rechazo, además de encontrarse ciertos sectores de las proximidades de los conos gran cantidad de basura, maquinarias y vehículos abandonados.
- No obstante, en ambas quebradas se puede constatar que tanto aguas arriba como aguas abajo de las faenas de extracción de áridos, las condiciones topográficas se aprecian muy similares a las del Proyecto 2000.

- Si bien, a simple vista las excavaciones y acopios de material son significativos, no se tiene certeza de la magnitud del cambio topográfico ni si la actividad extractiva cesará o de qué forma se seguirá ejecutando, en particular en el cono del brazo sur.
- Los cambios en la topografía en las zonas intervenidas deben ser incorporados al dimensionamiento de las obras de control aluvional ya que las hondonadas existentes permitirán contener una gran cantidad de material detrítico
- Se observa que el cono de deyección norte sobre el cual se expande lateralmente el flujo proveniente del tramo superior encajonado, constituye una efectiva área de deposición de los detritos
- La situación del cono sur es diferente por cuanto el tramo de cauce encajonado aguas arriba del cono, se observa con menor pendiente y por tanto, con un lecho constituido por material más fino.

20.2. ESTUDIO GEOLÓGICO

De las prospecciones realizadas en los primeros metros de las quebradas, se puede concluir lo siguiente:

- Los brazos tanto norte como sur de la quebrada, presentan gran diferencia entre la parte alta que se encuentra encajonada por los cerros y la zona de aguas abajo de esta.
- En las quebradas mismas no se evidencian situaciones de riesgos geológicos tales como deslizamientos de masas rocosas y esta posibilidad debe ser descartada.
- Los aluviones que se encuentran en el brazo norte y que se presentan como masas de rocas, corresponden al movimiento por flujos de agua de material que con el paso de los años se han depositado en una quebrada angosta, muy encajonada, de fuerte pendiente.
- Por su parte, el cauce del brazo sur es más amplio, con presencia de una caja ancha y en donde se encuentra material de grava y arenas.
- Su pendiente es menor que la del brazo norte y al igual que éste, no presenta sectores que muestren evidencias de materiales desplazados.

20.3. CONCLUSIONES GEOTÉCNICAS

De acuerdo a los resultados obtenidos se concluye, para el caso de zapatas cuadradas, lo siguiente:

- Se deberá evitar fundar las estructuras sobre suelos plásticos (CH, MH, éstos deben ser reemplazados por rellenos granulares compactados) y nunca sobre rellenos no controlados.
- En caso de utilizar relleno controlado (granular) se entregan en las memorias del proyecto sus parámetros mecánicos y se deben seguir las recomendaciones indicadas.
- En las faenas de excavación podrá emplearse maquinaria convencional o bien se realizarán en forma manual, conforme a la disponibilidad del constructor. Sin embargo, los últimos 0,30 m por sobre el

nivel del sello de fondo obligatoriamente deberán excavarse en forma manual a objeto de minimizar la alteración de la estructura natural del suelo de apoyo.

- Cualquier sobre-excavación que se produzca, ya sea en profundidad o en ancho de las excavaciones, deberá ser rellena con hormigón pobre de 170 kg de cemento por metro cúbico o el relleno granular controlado mencionado, con la correspondiente compactación, quedando expresamente prohibido cualquier otro tipo de relleno.
- El suelo a nivel de sello de fundación deberá compactarse hasta lograr un 95% de la densidad máxima compactada seca (D.M.C.S.) obtenida en laboratorio o un 80% de la D.R. según corresponda.
- El material granular se deberá colocar en capas de 30 cm de espesor como máximo (en estado suelto), las que deberán ser compactadas hasta alcanzar una densidad equivalente al 95% de la Densidad Máxima Proctor o un 80% de la Densidad Relativa (según corresponda).
- Se podrá utilizar el relleno natural del terreno disponible, siempre y cuando este sea pasado por un tamiz y cumpla con la banda granulométrica indicada en el informe.

20.4. ANÁLISIS HIDROLÓGICO CON PROYECCIONES DE CAMBIO CLIMÁTICO

La metodología empleada para incorporar la variable “cambio climático” en el diseño de las obras del proyecto incluyó las siguientes actividades:

- Utilización del producto de precipitación de CR2MET versión 2.0, espacialmente distribuido a 0,05° latitud-longitud y a resolución temporal diaria en el periodo 1979-2020, corregido según a partir de observaciones in-situ derivadas de estaciones meteorológicas de la red DGA-DMC
- Desagregación a nivel horario los valores diarios, mediante la distribución horaria derivada del reanálisis atmosférico ERA5 (C3S, 2017)
- Agregación espacial a escala de cuenca hidrográfica y cálculo de los máximos anuales de precipitación en bloques continuos de 1 hr a 72 horas de duración.
- Escalamiento y corrección por sesgo de las precipitaciones diarias en el periodo 1900-2100 derivadas de cuatro modelos de circulación general (MCG) utilizados en el estudio Actualización del Balance Hídrico Nacional (DGA, 2019a, 2019b, 2018, 2017) y ARClím (<https://arclim.mma.gob.cl/>), según el escenario RCP8.5.

En relación al análisis hidrológico de la cuenca con proyecciones de cambio climático, se concluye:

- Para la zona de estudio, la mayoría de los MCG (3 de 4) indican que el escenario RCP8.5 es el más desfavorable respecto a los máximos de precipitación diaria.
- En términos generales, los resultados obtenidos para las proyecciones de cambio climático muestran que los eventos de máxima precipitación diaria anual tendrían una mayor intensidad media diaria en el futuro respecto al periodo histórico para cada periodo de retorno.

- Al comparar los caudales líquidos máximos instantáneos asociados al periodo histórico 1903-2020 (o 1979-2020) y su extensión al 2060 (por ejemplo, 1903-2060), se aprecian aumentos en torno al 3% a 8% para los periodos de retorno mayores a 10 años, siendo el límite superior el que corresponde al periodo de retorno $T=100$ años.
- Los caudales líquidos máximos instantáneos asociados de $T=50$, 100 y 200 años a adoptar para el diseño de las obras en la quebrada Bonilla Norte son respectivamente 5,3 m³/s, 8,5 m³/s y 12,8 m³/s, y en la quebrada Bonilla Sur, respectivamente 8,5 m³/s, 13,0 m³/s y 19,6 m³/s.
- La forma del hidrograma generado de cada cauce es de tipo trapecial, con un crecimiento lineal de los caudales hasta alcanzar el valor del caudal máximo en un tiempo igual al tiempo de concentración, tiempo a partir del cual se mantiene el peak hasta que termina la lluvia, luego de lo cual sigue una recesión lineal.

20.5. ESTUDIO HIDRÁULICO ALUVIONAL

Respecto a las estimaciones de concentraciones de sólidos en los brazos norte y sur de la Quebrada Bonilla hechas a partir de las simulaciones hidráulicas y los modelos de gasto sólido adoptados en el presente estudio, se tienen las siguientes conclusiones y recomendaciones:

- El método empleado para estimar la concentración volumétrica de sólidos consistió en determinar capacidad de arrastre de sólidos en ambos brazos de la quebrada Bonilla, en sus respectivos tramos encajonados aguas arriba de los correspondientes conos de deyección, para crecidas de $T=50$, 100 y 200 años, y un amplio rango coeficientes de rugosidad o resistencia de Manning comprendidos entre 0,035 y 0,150 para emular la resistencia de flujos diluidos hasta altamente concentrados como los aluvionales.
- Los resultados mostraron que los cauces de ambos brazos tienden a maximizar su capacidad de arrastre para coeficientes de rugosidad comprendidos entre 0,035 y 0,040, lo que es independiente de los caudales estudiados (crecidas de $T=50$, 100 y 200 años), lo cual conduce a concentraciones volumétricas de sólidos comprendidas entre 33% en el brazo norte y 29% en el brazo sur.
- Se recomienda adoptar para ambos brazos de la quebrada Bonilla una concentración volumétrica de sólidos $CV=30\%$ como representativa de los flujos aluvionales de crecidas comprendidas entre 50 y 200 años para el diseño de las obras de control aluvional.

20.6. OBRAS DE CONTROL ALUVIONAL

Las obras que forman parte del sistema de control aluvional de la quebrada Bonilla son las siguientes:

- Muros de tierra (MT) que permiten formar pozas y aprovechar las hondonadas y depresiones existentes, para contar con volúmenes de depositación de sólidos en ambos brazos, suficientes para disminuir la concentración de sólidos de los flujos aluvionales.

- En el brazo norte se proyectaron 5 muros de tierra (MT-N1, MT-N2, MT-N3, MT-N4 y MT-N5), en tanto en el brazo sur se proyectaron 3 muros de tierra (MT-S1, MT-S2 y MT-S3).
- Un muro guardarradier en el brazo norte y una batería de 5 muros estabilizadoras de pendiente en el brazo sur (MEP-1, MEP-2, MEP-3, MEP-4 y MEP-5), que son obras proyectadas en hormigón ubicadas en los tramos altos encajonados, cuyo fin es reducir la capacidad de arrastre de sólidos.
- Encauzamiento del brazo sur aguas arriba del muro estabilizador de pendiente (MEP-1) y aguas arriba del muro de tierra MT-S1 para conducir de manera ordenada las aguas provenientes de la parte alta de la quebrada hacia las hondonadas existentes en el cauce aguas abajo.
- Canales unitarios en cada brazo, de sección rectangular en hormigón armado para la conducción de los flujos detríticos diluidos efluentes de los muros de tierra de cada brazo con los que terminan los tramos de retención de sólidos del brazo norte (MT-N5) y brazo sur (MT-S3).
- Canal unificado de sección rectangular en hormigón armado que transportará las aguas provenientes de ambos brazos en el tramo común hasta una obra de disipación de energía.
- Disipador de energía, obra que consiste en una cubeta de hormigón que recibe el agua del canal unificado y la descarga mediante un vertedero hacia la calle Guardiamarina, la que se conecta aguas abajo con la vía aluvional Nicolás Tirado.
- Caminos de servicio paralelos a los cauces de los brazos norte y sur de la quebrada Bonilla, cuya principal función es permitir el acceso del personal y maquinaria durante la etapa de operación y/o mantenimiento de las obras.

20.7. MODELACIÓN CON PROYECTO Y DISEÑOS HIDRÁULICOS

Se efectuaron modelaciones numéricas HEC-RAS 2D y 1D de la quebrada Bonilla con las obras del proyecto de control aluvional y el diseño hidráulico de las obras basadas en simulaciones llevadas a cabo para la crecida detrítica de T= 100 años.

- Los resultados obtenidos permitieron caracterizar las distintas variables hidráulicas de los sistemas modelados para la crecida detrítica de diseño de las obras aluvionales, entre las que se incluyen, áreas de inundación, profundidades del escurrimiento, mapa de velocidades, hidrogramas en secciones de interés y volúmenes asociados.
- Los resultados permitieron diseñar las obras de control aluvional de modo de lograr reducir la carga sólida de 30% a 16% como concentración volumétrica de sólidos del flujo aluvional, verificando las alturas de los muros de tierra, la capacidad de los vertederos, las secciones de los canales unitarios y del canal unificado y las dimensiones de la obra disipadora de energía.

20.8. CUBICACIONES Y ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS

- Se detalló la cubicación requerida para cada tipo obra, separando las obras de los brazos norte, sur y tramo común y se realizó un análisis de precios unitarios en base a lo cual se generó el presupuesto de construcción por tipo de obra.
- El presupuesto total de construcción de las obras de control aluvional de la quebrada Bonilla alcanza la suma de \$13.482.836.440. Este valor incluye 10% por gastos imprevistos y 77,4% de gastos generales y utilidades más IVA.
- El presupuesto está valorizado en CLP (\$) de fecha 09/08/2022 y equivale a una inversión total ascendente a UF 402.421.

20.9. EVALUACIÓN ECONÓMICA SOCIAL DEL PROYECTO

- El costo de mantención y operación anual de las obras se supuso igual a 2% de la inversión total del proyecto, lo que equivale a UF 8.048.
- Beneficios esperados anuales del proyecto resultan de UF 37.340.
- Con una tasa de descuento igual a 6% y una vida útil de las obras de 50 años, el Valor actualizado neto (VAN) que se obtiene para el proyecto es de UF 59.268.
- La Tasa Interna de Retorno (TIR) del proyecto es de 6,7 %.

20.10. ANÁLISIS DE INTERFERENCIAS, EXPROPIACIONES Y CAMINO DE SERVICIO

Se analizaron las posibles interferencias concluyéndose que:

- Existen dos matrices que cruzan soterradamente el lecho de los brazos norte y sur de la quebrada Bonilla, a una profundidad y localización que no pudo ser precisada por la empresa sanitaria Aguas Antofagasta de D= 300 mm (cemento asbesto) y D= 315 mm (PVC).
- Dado que en estos brazos el proyecto de control aluvional de la quebrada Bonilla consulta construir los canales unitarios norte y sur, y atendido el hecho que la empresa requiere tener acceso rápido y expedito a las cañerías en caso de una rotura bajo los canales, se propuso proyectar tramos con un hormigón de menor calidad en las zonas de cruce. Esta solución deberá ser presentada por Aguas Antofagasta a ECONSSA para su aprobación final.
- Se analizaron las posibles necesidades de expropiaciones, concluyéndose que el terreno donde se construirán las obras de control aluvional es propiedad fiscal, administrada por Bienes Nacionales y que el cauce de la quebrada corresponde a un bien nacional de uso público.
- Con respecto al trazado del camino de servicio, se concluye que su trazado presentaría una superposición local y parcial con la zona de concesión de uso gratuito de Bienes Nacionales que actualmente es empleada como área de recreación.

Referente al análisis de pertinencia ambiental se concluye, que:

- En términos generales, el presente proyecto reduce la cantidad de obras a construir en relación al proyecto original del año 2000, lo cual se debe principalmente a la incorporación de hondonadas generadas por actividades de extracción de áridos en las últimas dos décadas, lo que ha significado cambios topográficos de los cauces que son posibles de aprovechar para la retención y almacenamiento de sólidos acarreados por flujos aluvionales de la quebrada.
- De lo anterior fluye que las obras y acciones que componen específicamente el proyecto actual, no constituyen por sí misma un proyecto que deba ser presentado al SEIA, ya que sus obras y actividades no presentan cambios de consideración respecto de las obras y actividades del Proyecto “Sistema de Disipación de Energía Aluvional Quebradas Club Hípico Bonilla y Farellones” aprobado mediante RCA 203/2001 de la entonces COREMA de la Región de Antofagasta y como tal, no debe someterse al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental.

Finalmente, durante el desarrollo de la presente Consultoría se ejecutaron diversas actividades de Participación Ciudadana y entre ellas:

- Tres reuniones en las cuales participaron distintas organizaciones de Juntas de Vecinos y Comités de Vivienda comprendidas en el área de influencia definida para el proyecto, representantes de los distintos servicios e instituciones participantes (equipo consultor, PNUD, Programa AdaptaClima, DOH -MOP, Aguas Antofagasta).
- Los talleres se realizaron los días 13 de abril, 14 julio y 29 de septiembre del 2022, y en ellos se abordaron distintos aspectos de interés para los participantes, tales como explicación del proceso de participación ciudadana, contextualización del proyecto, presentación de los alcances del proyecto y descripción de las obras proyectadas, fase de consultas, intervenciones, dinámica de reflexión y trabajo grupal, encuesta de satisfacción para conocer la percepción y valoración de los asistentes sobre la instancia llevada a cabo y sus alcances
- El último taller culminó con un plenario final, donde se recogieron las últimas dudas, sugerencias y comentarios de los participantes, finalizando con la aplicación de una encuesta de satisfacción sobre el proyecto, la jornada participativa y el grado de importancia del proyecto para la ciudad de Antofagasta.