

1. INTRODUCCIÓN

El presente estudio, de Vulnerabilidad y Definición de un Plan de Manejo de Cauces para la Cuenca del Río Elqui, Región de Coquimbo, genera una base de trabajo y de información actualizada, cuyo objetivo es que sea utilizada por todos los organismos, ya sean públicos y/o privados, para la definición de medidas y para la ejecución de los estudios que se requieran realizar a futuro, además de socializar la información con la comunidad, de modo que permita generar conciencia de los efectos de las intervenciones en los cauces, indicando además, los espacios mínimos fluviales necesarios para el correcto funcionamiento de todas las actividades y usos que se realizan en el cauce y/o en sus riberas.

2. ÁREA DE ESTUDIO Y OBJETIVOS

El área de estudio está comprendida en todo el desarrollo del Río Elqui, a partir de la confluencia de los ríos Claro y Turbio (nacimiento), hasta su desembocadura al mar; además, las quebradas más importantes de la cuenca del Río Elqui, las cuales se indican a continuación en la Figura 2-1.

FIGURA 2-1
ÁREA DE ESTUDIO



Fuente: Elaboración propia.

El desarrollo de la Consultoría se basa en dos objetivos principales:

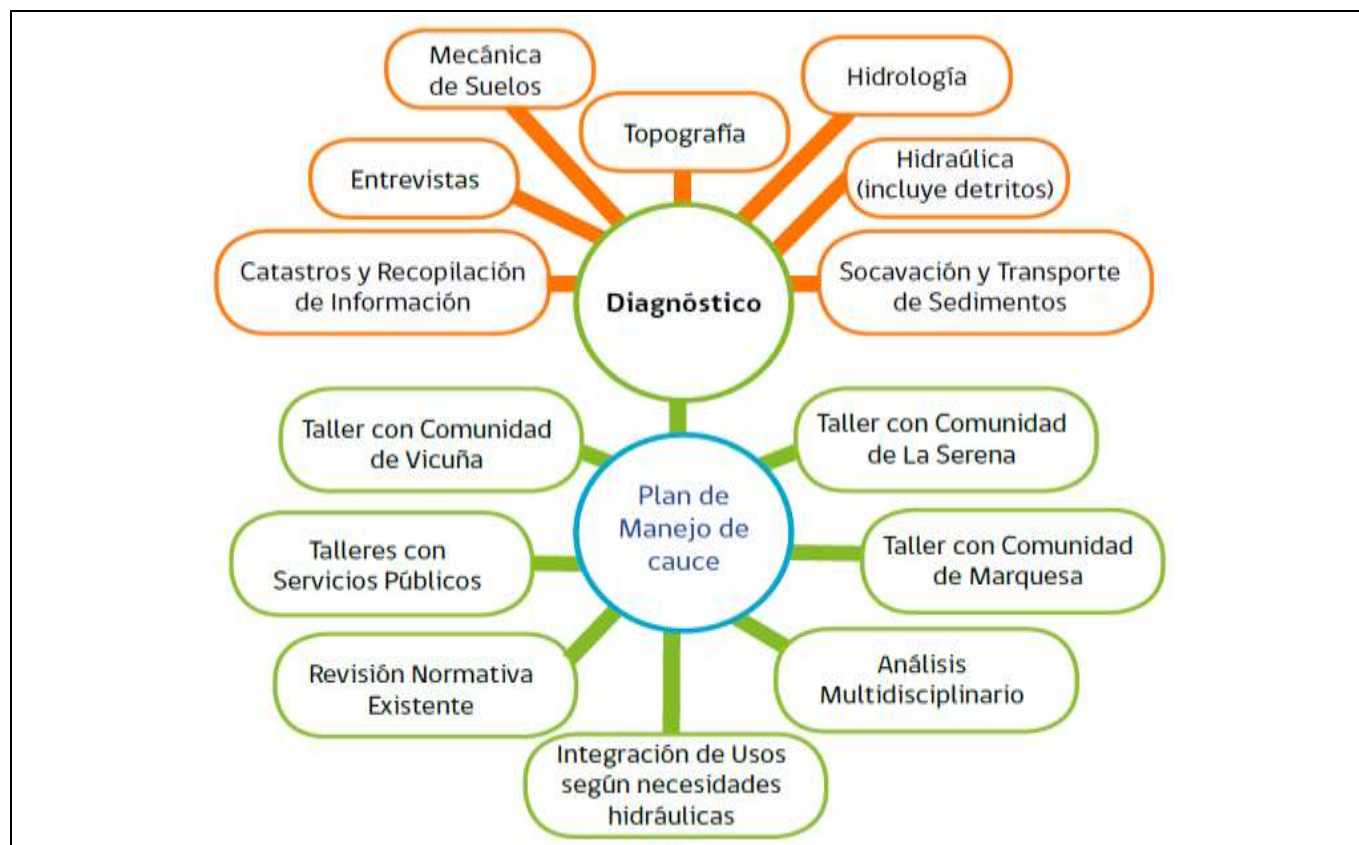
Formular un diagnóstico actualizado del río Elqui en su totalidad y de 10 de las quebradas afluentes al cauce, dentro de las que se incluyen las siguientes: Santa Gracia, Marquesa, Talca, Arrayán, San Carlos, Leiva, Arenal, Cebollín, Pullayes y Uchumi.

Elaborar un Plan de Manejo del cauce de la cuenca del Río Elqui que proponga mejoras a su condición actual, integrando de la mejor forma posible las actividades y/o usos que se realizan en él y sus riberas adyacentes, dentro del marco de las necesidades hidráulicas del cauce.

3. DESARROLLO DEL ESTUDIO Y ACTIVIDADES REALIZADAS

El estudio contempló actividades tanto en terreno como en gabinete (Figura 3-1) para cumplir cada uno de los objetivos del Estudio. Los resultados obtenidos de las principales actividades realizadas se presentan en los numerales a continuación.

FIGURA 3-1
PRINCIPALES ACTIVIDADES REALIZADAS EN FUNCIÓN DE LOS OBJETIVOS



Fuente: Elaboración propia.

4. LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO

4.1. GENERALIDADES

A grandes rasgos, los trabajos realizados corresponden a los siguientes:

- Construcción de PRs Poligonal Río Elqui
- Medición GPS Poligonal Río Elqui.
- Nivelación Geométrica Poligonal Río Elqui
- Levantamiento Topográfico de Puentes
- Levantamiento topográfico LIDAR.

4.2. POLIGONAL GEODÉSICA DE APOYO

La red geodésica se generó tomando como punto de enlace el Vértice MQSS, realizando las medidas con equipos GPS doble frecuencia, obteniéndose coordenadas UTM utilizando el datum SIRGAS (WGS 84).

La altimetría fue vinculada al vértice PR Vicuña, el que está referida al pilar de nivelación IGM PN DS 47, creada por la Unidad de Geomensura de la CNR, en el marco del proyecto “Mejoramiento sistema de riego Embalse Estero Derecho, Paihuano 2014”, ubicada en las afueras de la ciudad de Vicuña, desarrollado por la consultora ARCADIS Chile S.A.

Se materializaron, para la poligonal, un total de 166 PRs con la descripción “RE” río Elqui, “PU” quebrada de Pullayes, “UCH” quebrada de Uchumi, “CE” quebrada Cebollín, “ARE” quebrada de Arenal, “LE” quebrada de Leiva, “SC” quebrada San Carlos, “MA” quebrada de Marquesa, “AR” Arrayan, “TA” quebrada de Talca y “SG” Santa Gracia.

Se consideró el punto MQSS como origen para la Red, en el Cuadro 4.2-1 se presentan las coordenadas utilizadas.

**CUADRO 4.2-1
COORDENADAS GEODÉSICAS MQSS**

PUNTO	LATITUD	LONGITUD	ALTURA ELIPSOIDAL
MQ SS	S30°09'46.28930"	O70°40'45.64870"	1958.979

Fuente: Elaboración propia.

Como resultado de las mediciones GPS y nivelaciones geométricas de la poligonal Río Elqui, se obtuvieron coordenadas planimétricas UTM WGS 84 Zona 19 Sur y cotas geométricas.

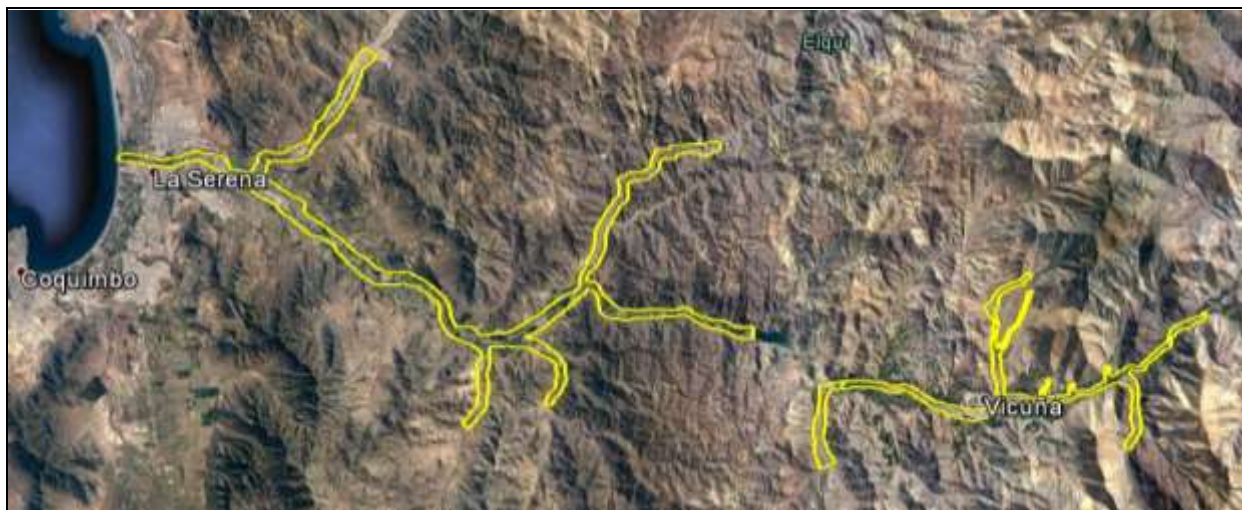
4.3. LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO DE PUENTES

Se realizaron 35 levantamientos de puentes, los cuales se encuentran distribuidos dentro del curso del río Elqui y dentro de las 10 quebradas involucradas en la zona de estudio. Estos levantamientos se hicieron a escala 1:500.

4.4. LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO LIDAR

Los trabajos topográficos corresponden al Levantamiento Laser Aerotransportado de la zona involucrada en el estudio, que tiene una superficie equivalente a 8.000 ha aproximadamente, para las que se consideró una cantidad de 4 puntos por m³. El área comprometida en el estudio se observa en el polígono marcado en color amarillo en la Figura 4.4-1.

FIGURA 4.4-1
UBICACIÓN GENERAL DEL LEVANTAMIENTO LIDAR



Fuente: Elaboración Propia en base a imagen Google Earth.

Para realizar el DTM, se efectuó un vuelo LIDAR los días 22, 23, 24 y 25 de enero del 2018. El levantamiento Láser fue efectuado con el sistema LIDAR OPTECH ALTM 3100, que incluye una cámara métrica Rollei Metric y Sistema Inercial de Navegación (INS).

En base a los datos obtenidos y el proceso de ellos, se obtienen los siguientes productos: Imágenes reveladas (imágenes transformadas formato TIF), Ortoimágenes digitales (resolución 0,1 m, formatos GEOTIF) y Cartografía digital (escala 1:1000, intervalo curva nivel 1m).

5. ESTUDIOS BÁSICOS

5.1. GENERALIDADES

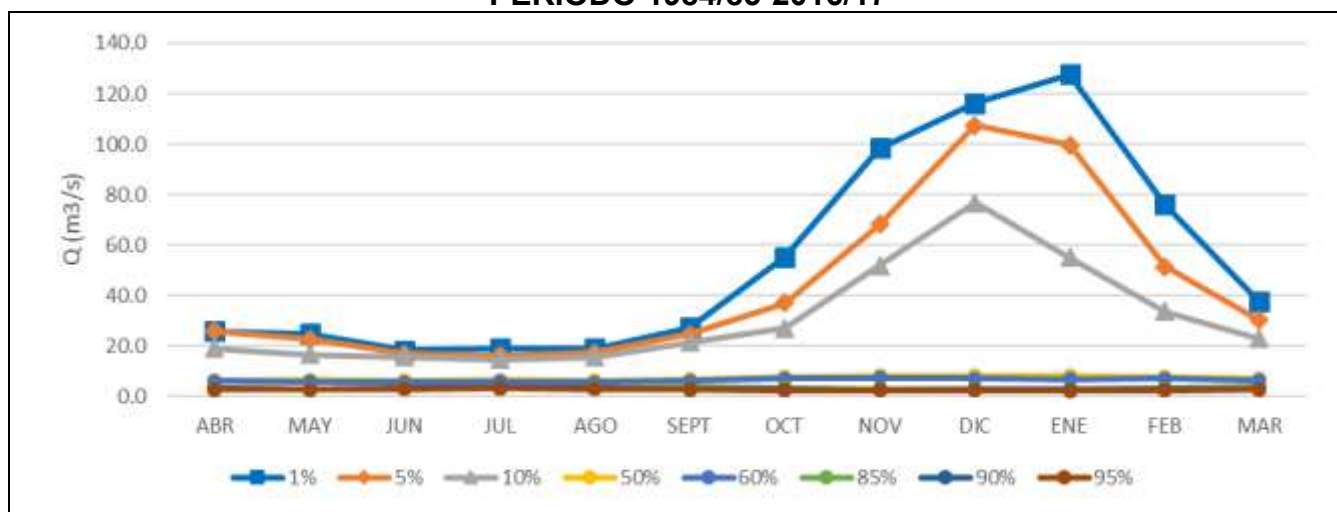
En el presente acápite, se detalla el proceso de obtención de los caudales medios mensuales y de crecidas en distintos puntos de interés para el presente estudio y para distintos períodos de retorno.

5.2. CAUDALES MEDIOS MENSUALES

El estudio de los caudales medios mensuales se llevó a cabo utilizando información fluviométrica registrada en la red de la Dirección General de Aguas (DGA). Para la realización de la caracterización del régimen hidrológico en la zona de estudio se obtuvieron Curvas de Variación Estacional de caudales a partir de información obtenida de la DGA. Los datos fueron rellenados según el método estocástico en los períodos que no contaban con registro, para luego realizar un análisis de frecuencia mensual y así, generar las curvas para probabilidades de excedencia de 1%, 5%, 10%, 50%, 60%, 85%, 90% y 95%.

Se estudiaron tres estaciones (Río Elqui en La Serena, Río Elqui en Almendral, Río Elqui en Algarrobal), de las cuales dos se encuentran aguas abajo del embalse Puclaro, el cual altera el régimen de caudales. A partir de lo anterior, se generaron las Curvas de Variación Estacional de las 3 estaciones mencionadas. En Figura 5.2-1, se muestran los resultados para Elqui en Algarrobal, la única no influenciada por el embalse Puclaro.

FIGURA 5.2-1
CURVA VARIACIÓN ESTACIONAL RÍO ELQUI EN ALGARROBAL
PERÍODO 1984/85-2016/17



Fuente: Elaboración propia.

A partir del análisis realizado, se puede concluir que la estación Río Elqui en Algarrobal presenta un régimen nivo-pluvial, es decir, el deshielo es fenómeno que aporta mayor volumen a la escorrentía de esta estación. No obstante, en términos de caudales de crecida (caudales máximos instantáneos), los mayores peak se alcanzan para eventos de origen pluvial, y durante los meses de invierno.

5.3. ESTUDIO DE CRECIDAS

Una vez implementados diversos métodos, directos e indirectos, se seleccionó el más adecuado, cuyos resultados pasaron a servir de input al modelo de rastreo de crecidas que se desarrolló en el software HEC-HMS.

El principal objetivo del modelo de rastreo fue el poder considerar la presencia del Embalse Puclaro, y el rol que juega en la amortiguación de las crecidas que provienen de la parte alta de la cuenca. De este modo, el modelo de rastreo permite conocer el tránsito de los hidrogramas desde el inicio del tramo estudiado, en la confluencia de los Ríos Turbio y Claro, hasta la desembocadura en el mar, pasando por el Embalse Puclaro, con los correspondientes aportes intermedios que ocurren en el transcurso.

El estudio analizó los efectos del cambio climático, obteniendo que la elevación de la línea de nieves va en aumento ya que se eleva desde la cota 2400 msnm (estudios anteriores) a la cota 2600 msnm (adoptada en el presente estudio).

Para la estimación de los caudales de crecida que se adoptaron en el presente estudio, se emplearon 5 métodos: análisis de frecuencia, método racional modificado, Verni King modificado, DGA-AC y HUS D72h. Para los métodos indirectos fue necesario hacer previamente un estudio de precipitaciones máximas. Para lo anterior, se analizaron las 46 subcuencas que conforman la cuenca del río Elqui. Una vez calculados los caudales por distintos métodos, se procedió a seleccionar el más adecuado en base al conocimiento del área de estudio en terreno, el cual resultó ser el HUS D72h.

Teniendo los hidrogramas de crecida de todas las subcuencas, se procedió a construir el modelo de rastreo de crecidas en HEC-HMS. Este modelo se separó en 2 partes, aguas arriba y aguas abajo del Embalse Puclaro. De esta forma se pudo calcular una crecida esperada a la salida del Embalse Puclaro, considerando distintos volúmenes iniciales asociados a una probabilidad de ocurrencia. Aguas abajo del Embalse Puclaro, el rastreo se realizó normalmente hasta la desembocadura. Los períodos de retorno utilizados fueron 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años.

5.4. CAUDALES LÍQUIDOS

En el Cuadro 5.4-1 a Cuadro 5.4-4, se presentan los caudales líquidos asociados a cada uno de los cauces en estudio, para periodos de retorno entre 2 y 100 años, además se presentan los caudales para períodos de retorno mayores (150, 200 y 300 años) con el fin de proporcionar una referencia en un eventual proyecto de puente, no obstante que se obtuvieron mediante extrapolación de la curva de frecuencia de los máximos caudales de crecida (valores en rojo).

CUADRO 5.4-1
CAUDALES MÁXIMOS INSTANTÁNEOS (M³/S) EN QUEBRADAS

Quebrada	Periodo de Retorno (años)								
	T2	T5	T10	T25	T50	T100	T150	T200	T300
Santa Gracia	1,5	5,4	9,9	45,4	131,3	253,2	329,0	379,5	442,8
Marquesa	0,9	3,1	5,8	55,7	137,9	244,2	307,1	347,8	397,9
Talca	0,4	1,2	2,0	5,5	12,3	19,7	23,7	26,2	29,3
Arrayan	1,5	5,1	8,7	56,2	114,9	190,1	229,8	255,3	286,0
Leiva	0,3	1,2	2,2	10,2	18,5	29,0	34,0	37,1	40,9
Arenal	0,3	1,0	1,7	3,5	5,3	7,4	8,4	9,1	9,9
Cebollín	0,1	0,4	0,7	2,0	3,1	4,6	5,7	6,5	7,8
Pullayes	0,1	0,7	2,1	7,6	13,6	21,9	28,5	33,8	42,4
San Carlos	0,9	3,1	8,5	48,5	88,7	140,5	165,9	182,1	201,3
Uchumí	0,2	1,0	2,0	13,5	25,5	40,3	47,9	52,6	58,3

Fuente: Elaboración propia.

CUADRO 5.4-2
CAUDALES MÁXIMOS RÍO ELQUI AGUAS ARRIBA DEL EMBALSE PUCLARO

Tramo Inicio (Km)	Caudal (m ³ /s) según periodo de retorno (años)						
	T2	T5	T10	T25	T50	T100	T200
27,042	3	11	28	135	293	509	697

CUADRO 5.4-2
CAUDALES MÁXIMOS RÍO ELQUI AGUAS ARRIBA DEL EMBALSE PUCLARO

Tramo Inicio (Km)	Caudal (m ³ /s) según periodo de retorno (años)						
	T2	T5	T10	T25	T50	T100	T200
18,778	3	11	28	135	316	564	790
11,241	3	11	28	141	326	580	810
1,356	3	11	28	146	339	603	844

Fuente: Elaboración propia.

CUADRO 5.4-3
CAUDALES MÁXIMOS RÍO ELQUI AGUAS ABAJO DEL EMBALSE PUCLARO

Tramo Inicio (Km)	Caudal (m ³ /s) según periodo de retorno (años)						
	T2	T5	T10	T25	T50	T100	T200
48,701	1	2	18	138	360	681	997
36,915	2	4	19	159	441	859	1323
31,136	3	9	20	186	525	991	1569
8,916	3	13	23	211	612	1147	1707

Fuente: Elaboración propia.

CUADRO 5.4-4
CAUDALES PEAK EN DESEMBOCADURA
EXTRAPOLACIÓN DE CURVA DE FRECUENCIAS

T (años)	Puclaro Valor Esperado (m ³ /s)	Puclaro Embalse Lleno (m ³ /s)
2	2,7	2,7
5	12,2	12,2
10	22,3	22,5
25	162,2	208,9
50	450,3	607,9
100	833,8	1.147,2
150	1.068,3	1.484,4
200	1.222,2	1.706,9
300	1.413,7	1.985,3

Fuente: Elaboración propia.

5.5. CAUDALES DETRÍTICOS

Una vez determinado los caudales de crecidas, se realiza otro análisis en las quebradas que presentan escurrimientos del tipo detríticos, ya que este tipo de fenómenos, además de poseer características hidráulicas particulares, tienen como consecuencia incrementos significativos del caudal.

De acuerdo a las visitas de terreno realizadas, se destaca que en las quebradas de Santa Gracia y Marquesa, el escurrimiento presenta una alta carga de sedimentos en eventos de crecidas, particularmente, en la quebrada Marquesa se evidenció que amplios sectores urbanizados quedaron inmersos en zonas con barro las que se fueron consolidando

progresivamente con el paso del tiempo, material que tuvo que ser removido con maquinaria pesada.

Para realizar el cálculo del caudal detrítico Q_d se procede a utilizar el caudal de crecida (líquido) Q_o determinado en el acápite anterior, y a éste se le aplica el factor del aumento de volumen, o concentración volumétrica.

$$Q_d = \frac{Q_o}{(1 - C_v)}$$

Se consideró una concentración volumétrica C_v de 30% para Santa Gracia y 35% para Marquesa. Al resto de las quebradas se les consideró un aporte sólido inferior al 10% y por lo tanto no fueron consideradas como detríticas.

Los valores de caudales detríticos obtenidos para cada una de las quebradas se presentan en el Cuadro 5.5-1.

CUADRO 5.5-1
CAUDALES MÁXIMOS INSTANTÁNEOS DETRÍTICOS (m³/s)

Quebrada	Periodo de Retorno (años)					
	T2	T5	T10	T25	T50	T100
Santa Gracia	2,1	7,7	14,1	64,9	187,6	361,7
Marquesa	1,4	4,8	8,9	85,7	212,2	375,7

Fuente: Elaboración propia.

5.6. MUESTREO DE CALICATAS Y ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO

Para fines de caracterizar geotécnicamente las quebradas afluentes al río Elqui y al propio río, se excavaron calicatas de 2 m de profundidad en diferentes sectores. Se realizó un total de 42 calicatas a lo largo de los cauces en estudio. Se obtuvieron resultados por zonas, pero en promedio se trata de suelos granulares de tamaño entre 178 mm y 350 mm, con bajo contenido de fino y de buena graduación.

6. ANÁLISIS HIDRAULICO FLUVIAL

6.1. GENERALIDADES

El análisis hidráulico contempla un estudio unidimensional, utilizando el software HEC-RAS, y un estudio bidimensional, utilizando el software FLO-2D. Se utiliza HEC-RAS en 8 de las 10 quebradas en análisis, vale decir, en Uchumí, Pullayes, Cebollín, Arenal, Leiva, San Carlos, Arrayán y Talca, además del río Elqui aguas arriba del embalse Puclaro; mientras que el FLO-2D se utiliza aguas abajo del embalse Puclaro y en 2 de las quebradas con comportamiento detrítico, a saber, Marquesa y Santa Gracia. Para considerar el efecto del cambio volumétrico que generan las quebradas indicadas sobre el río, se incluye dentro

de las mallas de modelación del FLO-2D el río Elqui aguas abajo del embalse Puclaro, considerando viscosidad de aguas claras.

Se incluye en este numeral la estimación de rugosidad de los cauces comparando los métodos de Strickler y Cowan, el análisis hidráulico, análisis de transporte de sedimentos y socavaciones tanto en río como en quebradas. La información se presenta sectorizada, por lo que **el área de estudio se divide en 19 sectores, donde cada quebrada es un sector y el río se divide en tres sectores aguas arriba del embalse Puclaro y 6 sectores aguas abajo de éste**, numerados desde aguas abajo hacia aguas arriba por importancia de homogeneidad territorial, considerando básicamente los problemas y riesgos a los cuales se ven expuestos y su ubicación geográfica.

En la Figura 6.2-1 se muestra la ubicación general de los sectores en el área de estudio.

Con la información obtenida de los análisis que se realizan en el presente capítulo, se obtiene el diagnóstico y las medidas, las cuales se trabajan y presentan por sector.

6.2. RUGOSIDAD EN CAUCES

Los coeficientes de rugosidad de Manning fueron determinados para cada tramo del cauce del río Elqui y quebradas afluentes, mediante dos métodos: Strickler y Cowan. Se adopta la metodología de Cowan básicamente por entregar valores más altos, lo que significa mayores niveles de escurrimiento y por tanto, diseños más conservadores. En los Cuadros 6.2-1 y 6.2-2 se resumen los valores obtenidos para cada tramo del río y las quebradas en estudio.

CUADRO 6.2-1
RUGOSIDADES RÍO ELQUI

Tramo	Kilometraje Fin	Kilometraje Inicio	n_{cowan} riberas	n_{cowan} centro
Confluencia ríos Turbio y Claro hasta Km 76	27+042	24+480	0,040	0,033
Km 76 ruta 41 hasta Quebrada Leiva	24+480	11+600	0,049	0,031
Quebrada hasta Leiva Vicuña	11+600	8+800	0,039	0,034
Vicuña hasta Embalse Puclaro	8+800	0+000	0,041	0,029
Embalse			-	-
Embalse Puclaro hasta El Molle	48+700	39+500	0,049	0,026
El Molle hasta Zona de Pelicana	39+500	33+300	0,034	0,034
Zona de Pelicana hasta Altovalsol	33+300	17+100	0,044	0,033
Altovalsol hasta Límite PRC	17+100	6+500	0,034	0,033
Límite PRC hasta Puente Libertador	6+500	2+900	0,039	0,033
Puente Libertador hasta Humedal	2+900	0+800	0,039	0,025
Zona del Humedal	0+800	0+000	0,050	0,050

Fuente: Elaboración propia.

FIGURA 6.2-1
UBICACIÓN DE SECTORES EN ÁREA DE ESTUDIO



Fuente: Elaboración propia.

CUADRO 6.2-2
RUGOSIDADES QUEBRADAS

Quebrada	n _{Cowan}	
	Zona Alta	Zona Baja
Uchumí	0,03	0,03
Pullayes	0,047	0,025
Cebollín	0,047	0,025
Arenal	0,047	0,025
Leiva	0,048	0,034
San Carlos	0,036	0,03
El Arrayan	0,034	0,034
Talca	0,039	0,034
Marquesa	0,036	0,03
Santa Gracia	0,034	0,034

Fuente: Elaboración propia.

6.3. MODELACIÓN HIDRÁULICA

6.3.1 Aguas Arriba de Embalse Puclaro

Para la configuración del modelo hidráulico del río, se consideran los siguientes antecedentes:

462 perfiles topobatimétricos extraídos del DEM (modelo digital de elevación)

Modelo unidimensional HEC-RAS

Condición de borde aguas arriba=altura normal, asociada a una $i = 0,8 \%$

Condición de borde aguas abajo= altura conocida embalse= 508,8 m que corresponde a la cota de umbral del vertedero evacuador de crecidas.

Caudales líquidos de Cuadro 5.4-2

Los resultados principales obtenidos son las líneas de inundación para cada periodo de retorno estudiado. Un esquema de lo indicado se presenta en la Figura 6.3.2-1.

En el Cuadro 6.3.1-1 se presenta un resumen del estado de cada puente, donde se incluye la cota asociada al periodo de retorno de 100 años y se contrasta con la cota inferior de la viga de cada puente. De los puentes analizados, se tiene que solo 2 de ellos no se vería sobrepasado por la crecida $T=100$, no obstante, ninguno de ellos cumpliría con la revancha mínima para un diseño de puentes de acuerdo a los criterios establecidos por la Dirección de Vialidad.

CUADRO 6.3.1-1
COTAS DE AGUA EN RELACIÓN A COTA DE VIGA DE PUENTES

Puente	Perfil Hec Ras	Kilometraje	Cota T100	Cota Inferior Viga	Revancha
Privado (madera)	26280	26+280	794,56	793,8	-0,76
Algarrobal	24502	24+500	775,45	773,2	-2,25
Colgante	23724	23+720	764,44	764,0	-0,44
Conecta ruta D283 a D377 (madera)	23669	23+670	762,14	760,6	-1,54

CUADRO 6.3.1-1
COTAS DE AGUA EN RELACIÓN A COTA DE VIGA DE PUENTES

Puente	Perfil Hec Ras	Kilometraje	Cota T100	Cota Inferior Viga	Revancha
Diaguitas	18693	18+690	706,46	706,3	-0,16
Peralillo	14966	14+960	666,88	665,6	-1,28
Ingeniero Alfonso Diaz	10809	10+800	620,45	621,6	1,15
Presbítero Tomas Alvarez	8836	8+830	598,76	599,4	0,64
Huancara	7310	7+310	582,73	582,2	-0,53
RE 46 (madera)	2793	2+780	535,51	534,0	-1,51
Gualiguaica	529	0+520	513,64	513,4	-0,24

Fuente: Elaboración propia.

6.3.2 Aguas Abajo de Embalse Puclaro

Para la configuración del modelo hidráulico del río, se consideran los siguientes antecedentes:

Modelo Bidimensional FLO-2D, que dada la extensión del área modelada, se construye en 8 mallas reticuladas de celdas cuadradas de 10x10m, a excepción en Marquesa y Santa Gracia que se modeló con celdas de 5x5m.

Modelo digital de elevación (DEM)

Caudales de Cuadro 5.4-3

Para determinar en el modelo bidimensional la superficie de inundación, altura y velocidades en el río, se utilizaron los datos de entrada correspondiente a los caudales estimados para el río Elqui a la altura del embalse Puclaro, las quebradas de Santa Gracia y Marquesa, además de las distintas subcuencas aportantes al río. En el Cuadro 6.3.2-1 se presenta la tabla con los caudales máximos instantáneos de cada lugar.

Además, es importante considerar en el modelo un incremento volumétrico producto del aporte de sedimentos de las quebradas de Santa Gracia y La Marquesa, el cual se representa a través concentraciones de sólidos por volumen "Cv", cuyo valor corresponde a 0,30 para Santa Gracia y de 0,35 para La Marquesa.

CUADRO 6.3.2-1
CAUDALES MÁXIMOS POR PERÍODO DE RETORNO (DATOS DE ENTRADA MODELO)

T (años)	Caudal Máximo (m ³ /s)			
	Puclaro	Quebrada Marquesa	Quebrada Santa Gracia	Subcuencas a lo largo del tramo analizado
5	1,5	5,0	5,4	5,1
10	18,0	10,0	10,0	8,7
25	137,6	55,7	45,4	56,2
50	359,4	137,9	131,3	114,9
100	681	244,2	253,2	190,1

Fuente: Elaboración propia.

FIGURA 6.3.2-1
ÁREA DE INUNDACIÓN AGUAS ARRIBA EMBALSE PUCLARO PARA T=100 AÑOS



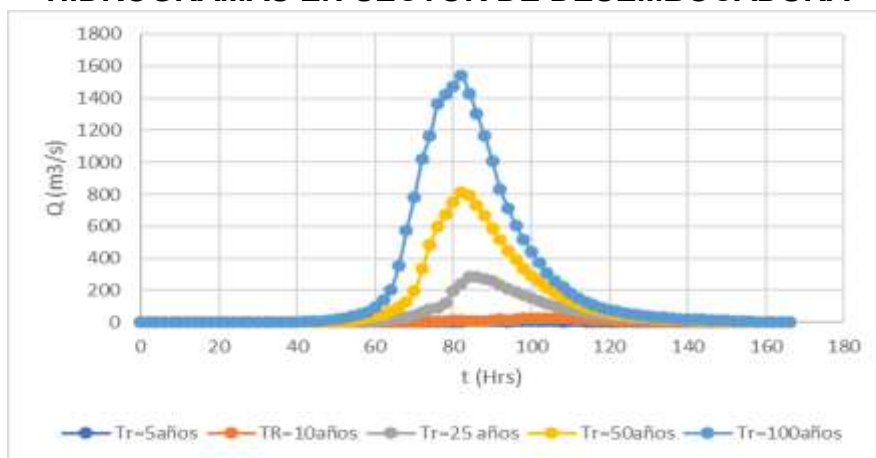
Fuente: Elaboración propia.

Los resultados principales obtenidos son las líneas de inundación para cada periodo de retorno estudiado. Un esquema de lo indicado se presenta en la Figura 6.3.2-1.

Cabe señalar que el presente Estudio no consideró la influencia de la marea, por lo que se recomienda incluir en proyectos futuros que se encuentren desde el puente Zorrilla hasta la desembocadura, el análisis del río considerando como condición de borde aguas abajo, el escenario de pleamar máxima en la sicigia.

Como resultado del modelo, se obtiene el valor de caudal en desembocadura incluyendo el efecto del cambio volumétrico en el río, a raíz de la modelación de las quebradas Marquesa y Santa Gracia como detríticas. En la Figura 6.3.2-1 se incluye el hidrograma en desembocadura y en Cuadro 6.3.1-1 los valores para cada periodo de retorno analizado.

**FIGURA 6.3.2-1-
HIDROGRAMAS EN SECTOR DE DESEMBOCADURA**



Fuente: Elaboración propia.

**CUADRO 6.3.1-1
CAUDALES MÁXIMOS INSTANTÁNEOS EN SECTOR DE DESEMBOCADURA**

T años	Qmi m³/s
5	7.23
10	28.88
25	287.9
50	811.2
100	1542.1

Fuente: Elaboración propia.

Para estimar el transporte de sedimentos y socavación en las distintas secciones, se usó un modelo unidimensional, cuyos caudales a lo largo del río se presentan en el Cuadro 6.3.1-2. Estos incluyen el efecto de las quebradas detríticas.

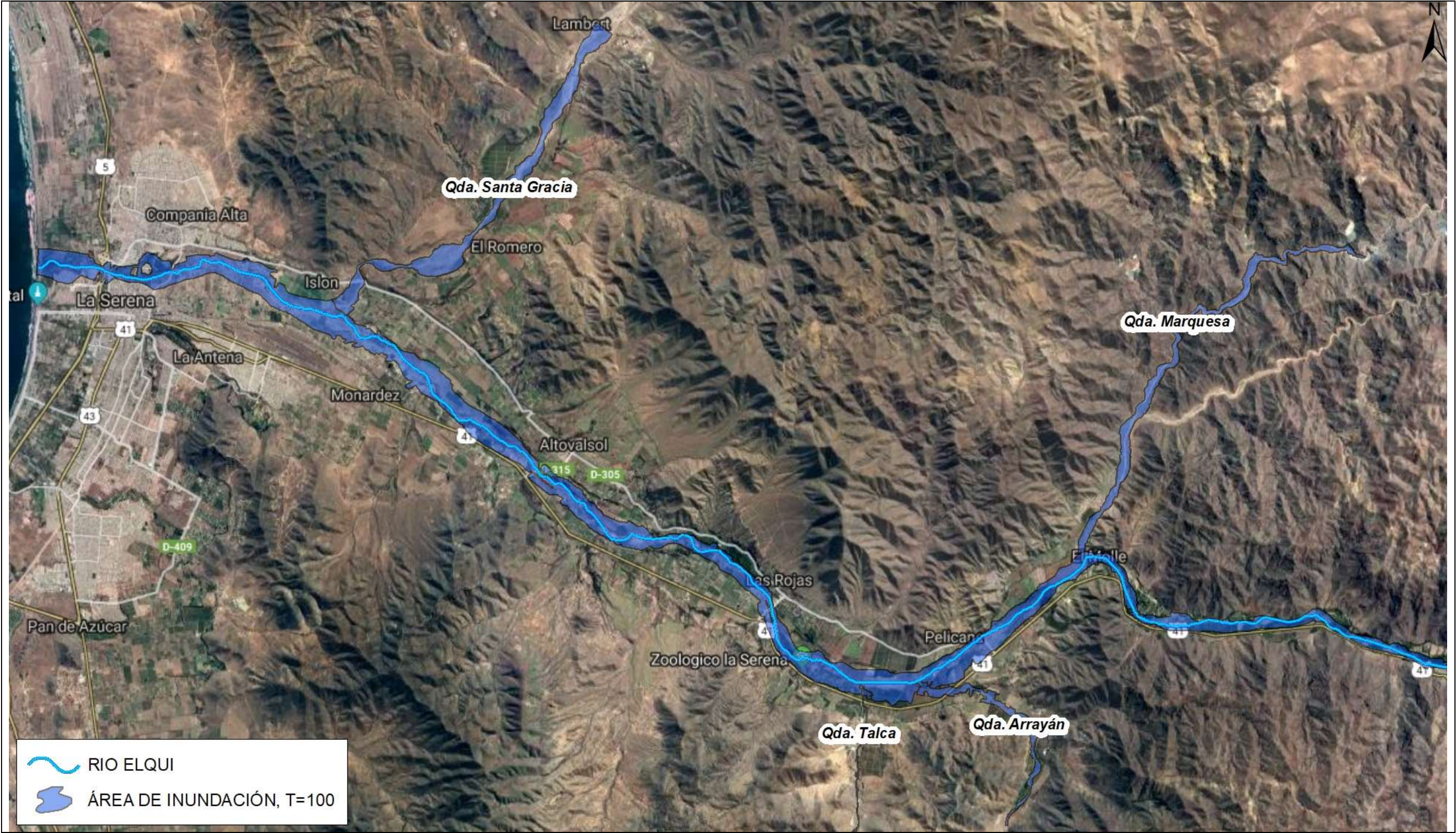
CUADRO 6.3.1-2
Caudales de Diseño Aguas Abajo del Embalse Puclaro

Tramo	Caudal (m³/s) según periodo de retorno (años)					
Inicio (Km)	T2	T5	T10	T25	T50	T100
48,701	1	2	18	138	360	681
36,915	1	4	19	159	515	1020
31,136	3	9	20	186	609	1204
18,588	3	9	20	186	609	1212
8,916	3	13	23	211	811	1542

Fuente: Elaboración propia.

La situación en que se encontrarían los puentes en relación a la posibilidad de verse afectados por inundaciones, se presenta en forma esquemática, mediante la utilización de HEC-RAS, donde se analizó la relación de altura entre la viga de cada puente y las crecidas asociadas a cada uno de los periodos de retorno en estudio. En el Cuadro 6.3.1-3 se presenta un resumen del estado de cada puente, donde se incluye la cota asociada al periodo de retorno de 100 años y se contrasta con la cota inferior de la viga de cada puente. De los puentes analizados, se tiene que para el periodo de retorno T=100 años ya existen 5 puentes que se verían afectos a inundación (correspondientes a los que presentan revancha negativa en el Cuadro 6.3.1-3), 4 puentes tienen revancha menor a 1 m y por tanto no cumplirían la revancha mínima de acuerdo a criterios de la Dirección de Vialidad para un diseño de Puente.

FIGURA 6.3.1-2
ÁREA DE INUNDACIÓN AGUAS ABAJO EMBALSE PUCLARO PARA T=100 AÑOS



Fuente: Elaboración propia.

CUADRO 6.3.1-3

COTAS DE AGUA EN RELACIÓN A COTA DE VIGA DE PUENTES

Puente	Perfil Hec Ras	Kilometraje	Cota T100	Cota Inferior Viga	Revancha
El Almendral	45605.58	45+600	402.33	400.4	-1.9
El Molle	39468.95	39+469	341.90	341.9	0.0
La Marquesa	37017.5	37+018	320.23	318.8	-1.5
Pelicana	33233	33+233	280.54	281.4	0.9
Las Rojas	25727	25+728	202.00	201.1	-0.9
Altovalsol	17083	17+084	119.15	121.8	2.7
Zorrilla	3992.8	3+993	18.94	19.8	0.9
Libertador	2926	2+926	16.27	23.1	6.9
Ferrocarril	2227	2+225	14.41	12.5	-1.9
Ruta 5 Antiguo	2127	2+127	14.27	13.9	-0.4
Ruta 5 Nuevo	1930	1+930	11.81	12.7	0.9

Fuente: Elaboración propia.

6.3.3 Quebradas

En el Cuadro 6.3.3-1 se presenta la cantidad de perfiles topobatimétricos utilizados para representar cada quebrada. Estos son extraídos del DEM con espaciamiento de 50 m.

Para realizar el diagnóstico de la situación actual de cada quebrada, además de evaluar el efecto del caudal, es necesario considerar las consecuencias que tiene la disponibilidad de sedimentos en el aumento volumétrico del flujo. Para las quebradas detríticas, se considera el coeficiente volumétrico C_v y para las restantes quebradas un factor de seguridad FS de 1,3 para considerar los efectos de la acumulación de sedimentos en el fondo de las quebradas. Los caudales de diseño se presentan en el Cuadro 6.3.3-2.

CUADRO 6.3.3-1

PERFILES TOPOGRÁFICOS POR QUEBRADA

Quebrada	Cantidad de perfiles
Uchumí	52
Pullayes	43
Cebollín	39
Arenal	41
Leiva	200
San Carlos	77
El Arrayán	100
Talca	112

Fuente: Elaboración propia.

CUADRO 6.3.3-2

CAUDAL DE DISEÑO CONSIDERANDO SOLIDOS EN ARRASTRE (M^3/S) EN QUEBRADAS

Quebrada	FS o C_v	Período de Retorno (años)					
		T2	T5	T10	T25	T50	T100
Santa Gracia	0,30	2,1	7,7	14,1	64,9	187,6	361,7
Marquesa	0,35	1,4	4,8	8,9	85,7	212,2	375,7
Talca	1,30	0,5	1,6	2,6	7,2	16,0	25,6

CUADRO 6.3.3-2
CAUDAL DE DISEÑO CONSIDERANDO SOLIDOS EN ARRASTRE (M³/S) EN
QUEBRADAS

Quebrada	FS o Cv	Período de Retorno (años)					
		T2	T5	T10	T25	T50	T100
El Arrayan	1,30	2,0	6,6	11,3	73,1	149,4	247,1
Leiva	1,30	0,4	1,6	2,9	13,3	24,1	37,7
Arenal	1,30	0,4	1,3	2,2	4,6	6,9	9,6
Cebollín	1,30	0,1	0,5	0,9	2,6	4,0	6,0
Pullayes	1,30	0,1	0,9	2,7	9,9	17,7	28,5
San Carlos	1,30	1,2	4,0	11,1	63,1	115,3	182,7
Uchumí	1,30	0,3	1,3	2,6	17,6	33,2	52,4

Fuente: elaboración propia.

La condición de borde utilizada aguas arriba y aguas abajo de cada quebrada es la de altura crítica. Se asumió esta condición de borde aguas abajo, ya que para un evento de crecida de la quebrada no se tiene la certeza a que período de retorno en el río está asociado, por lo tanto, esta es una de las condiciones más conservadoras para todo tipo de escenarios. El régimen de análisis para el flujo se considera mixto, porque a pesar de tener zonas de alta pendiente que podrían indicar un escurrimiento del tipo torrente, se podrían dar variaciones locales del régimen que no sean consideradas usando otro criterio.

Los resultados, desde el punto de vista de inundación, se pueden visualizar en la Figura 6.3.2-1 y Figura 6.3.1-2.

6.4. TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

La variación temporal de la forma, geometría del cauce y de la morfología de la cuenca aportante, dan como resultado los procesos naturales de erosión, depositación y transporte de sedimentos en el cauce.

Debido a estos procesos, se evalúa el comportamiento del cauce de forma cualitativa de modo de obtener el comportamiento de éste e identificar zonas con tendencia a embanque o erosión del lecho. Por lo anterior, se estiman los gastos sólidos de material de arrastre de fondo y se analizan los resultados realizando un equilibrio de sedimento a lo largo del cauce.

Dados los datos de terreno con que se cuenta, las características de la granulometría, la hidrología de la cuenca, entre otras variables, se ha estimado que las relaciones más apropiadas para determinar el arrastre de fondo de sedimentos corresponden a: Engelund y Fredsoe (1976), Meyer, Peter y Müller (1948) y Ackers y White (1973).

Dada la ausencia de mediciones de relaciones de gasto sólido en suspensión (Q_{ss}) v/s gasto líquido (Q), no se puede obtener de forma directa esta fracción del transporte de sedimentos. Además, se tiene una condición del embalse donde todas las partículas de sedimento en suspensión provenientes de la cuenca aportante, quedan atrapadas en el embalse mismo.

Por lo anterior, se consideran formulas empíricas y tasas regionales para obtener un valor estimado del volumen de sedimento anual producido por una determinada cuenca y se indica el porcentaje de sólido en arrastre y suspensión. Las relaciones utilizadas en este caso son: USBR, Dendy Bolton, Tasa Regional US y Tasa Regional Cogotí.

Considerando que el tamaño de la cuenca aguas arriba del embalse Puclaro es de 6.575 Km² y aguas abajo de éste es de 2.830 Km² (en desembocadura), se obtienen los resultados que se indican en el Cuadro 6.4-1.

CUADRO 6.4-1
APORTE SEDIMENTOLÓGICO TOTAL ESTIMADO ANUAL

Método	Aporte Cuenca (m ³ /año)
Aguas Arriba Embalse Puclaro	
USBR	1.248.666
Dendy Bolton	125.481
Tasa Regional US	1.972.560
Tasa Regional Cogotí	1.578.048
Aguas Abajo Embalse Puclaro	
USBR	651.771
Dendy Bolton	95.951
Tasa Regional US	679.056
Tasa Regional Cogotí	848.820

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con las experiencias obtenidas en embalses, particularmente en el embalse Cogotí, se estima que el arrastre de fondo corresponde entre un 10% a 20% del sedimento total estimado de la cuenca. Para este estudio se considera que el arrastre de fondo (sedimento grueso) es un 15% del sedimento total de la cuenca.

Cabe señalar que una de las relaciones que se puede considerar más acertadas y confiable para este Estudio, es la Tasa Regional Cogotí, ya que el valor obtenido es a partir de mediciones in situ de sedimentos realizadas en el embalse Cogotí y que se asoció al área aportante real y los años de operación del embalse. Por otra parte, corresponde a un cauce ubicado en la misma región y que comparte características morfológicas similares, por lo que corresponde a la situación más probable.

En términos prácticos y considerando que las extracciones de áridos deben ser consecuente con lo que arrastra el río, se tiene que en el río Elqui aguas abajo del embalse, la disponibilidad anual de áridos sería del orden de los 127.000 m³. Para el caso de sedimentos en suspensión, aproximadamente poco más del 40% llega al humedal ubicado en la desembocadura del río.

6.5. ANÁLISIS DE SOCAVACIÓN

Para el cálculo de la socavación general, se han utilizado los métodos propuestos por: Neill, Lischtván-Lebediev y Lischtván-Lebediev-Maza; para la socavación al pie de las pilas de los puentes y estribos, se ha utilizando la metodología del Manual de Carreteras Volumen 3, donde considera las fórmulas de Breusers, Nicollet y Shen (BNSh), Envolvente

de datos experimentales (EDE), la relación de Richardson (R) y Melville en caso de estribos. Los resultados obtenidos se incluyen en los cuadros siguientes.

CUADRO 6.5-1
SOCACCIÓN GENERAL POR SECTOR AGUAS ARRIBA EMBALSE PUCLARO

Sector	Kilometraje	Localidad	Socacción Promedio (m)	Socacción Admisible (m)
19	11+600 al 27+000	Vicuña a inicio río Elqui	3,02	3,0
18	-	Quebrada Uchumi	0,93	1,0
17	-	Quebrada Pullayes	4,18	4,2
16	-	Quebrada Cebollin	1,68	1,7
15	-	Quebrada El Arenal	2,01	2,0
14	8+800 al 11+600	Vicuña	2,55	2,6
13	-	Quebrada Leiva	0,74	1,0
12	-	Quebrada San Carlos	1,54	1,5
11	0+000 al 8+800	Embalse a Vicuña	2,33	2,3

Fuente: Elaboración propia.

CUADRO 6.5-2
SOCACCIÓN GENERAL POR SECTOR AGUAS ABAJO EMBALSE PUCLARO

Sector	Km	Localidad	Socacción Promedio (m)	Socacción Admisible (m)
10	33+300 al 48+700	El Molle	1,85	1,9
9	-	Quebrada Marquesa	1,67	1,7
8	-	Quebrada Arrayan	1,05	1,1
7	-	Quebrada Talca	0,65	1,0
6	19+500 al 33+300	Loc.Punta de Piedra a Puente Pelicana	2,49	2,5
5	-	Quebrada Santa Gracia	0,4	1,00
4	6+500 al 19+500	Límite Urbano PRC a Loc.Punta de Piedra	2,91	2,9
3	2+900 al 6+500	Puente Libertador a Límite Urbano PRC	2,12	2,1
2	0+800 al 2+900	Humedal a Puente Libertador	1,37	1,4
1	0+000 al 0+800	Humedal	0,01	1,0

Fuente: Elaboración propia.

CUADRO 6.5-3
SOCAVACIÓN TOTAL PUENTES AGUAS ARRIBA EMBALSE PUCLARO

Puente	Km	Socavación Máxima General (m)	Socavación Local Estribos (m)	Socavación Local Pilas (m)	Socavación Total (m)	Socavación Admisible (m)
Algarrobal	24+500	0,8	0,81	-	1,61	1,7
Conecta ruta D283 a D377 (madera)	23+670	4,68	0,9	-	5,58	5,6
Diaguitas	18+690	2,4	0,63	-	3,03	3,0
Peralillo	14+960	3,22	0,8	2,46	5,68	5,7
Ingeniero Alfonso	10+800	2,33	0,73	3,75	6,08	6,1
Presbítero Tomás Álvarez	8+830	3,52	0,28	1,83	5,35	5,4
Huancara	7+300	3,05	1,45	-	4,5	4,5
Madera	2+780	2,76	0,47	-	3,23	3,2
Gualiguaica	0+520	1,45	0,67	1,66	3,11	3,1

Fuente: Elaboración propia.

CUADRO 6.5-4
SOCAVACIÓN TOTAL PUENTES AGUAS ABAJO EMBALSE PUCLARO

Puente	Km	Socavación Máxima General (m)	Socavación Local Estribos (m)	Socavación Local Pilas (m)	Socavación Total (m)	Socavación Admisible (m)
El Almendral	45+600	4,71	0,61	-	5,32	5,3
El Molle	39+469	4,38	1,78	1,33	6,16	6,2
Marquesa	37+018	1,16	0,76	1,13	2,29	2,3
Pelícano	33+233	4,13	1,67	0,85	5,8	5,8
Las Rojas	25+728	0,35	2,34	1,03	2,69	2,7
Altovalsol	17+084	3,31	2,88	2,63	6,19	6,2
Zorrilla	03+993	0,84	1	2,25	3,09	3,1
El Libertador	02+926	3,83	2,67	2,92	6,75	6,8
FFCC	02+225	0,1	1,3	2,78	2,88	2,9
Ruta 5 antiguo	02+127	5,26	2,44	4,54	9,8	9,8
Ruta 5 nuevo	01+930	3,47	2,78	2,23	6,25	6,3

Fuente: Elaboración propia.

Con respecto a los resultados obtenidos en los puentes, se observa un aumento de la socavación en los puentes cercanos a la desembocadura, esto debido al tipo de sedimento encontrado cercano a los puentes, donde el resultado de la granulometría resulta en un tamaño característico del sedimento D_{50} de 15 mm.

Con respecto a las defensas fluviales, se lograron identificar tres tipos: enrocado, gaviones y pretils de tierra. Los pretils de tierra corresponden a defensas fluviales fusibles que se han realizado principalmente como medida de emergencia en crecidas. Las socavaciones son variables a lo largo del río, variando desde los 2 m hasta más de 10 m de socavación en algunos tramos. Las velocidades máximas bordearon los 5 m/s, con un promedio del orden de los 3 m/s.

7. DIAGNÓSTICO

El desarrollo urbano y de la actividad económica minera, turística y agrícola de los últimos años, sumado a los periodos de sequía en la región, ha propiciado la intervención del río Elqui y de algunos de sus afluentes, modificando sus cauces y alterando el uso de los suelos adyacentes. En términos generales, los principales problemas detectados corresponden a inundación y afectación por erosión de población e infraestructura pública y privada, debido a los eventos de crecidas en los cauces en estudio. De acuerdo al análisis realizado y a lo obtenido de los talleres de participación ciudadana, las causas que acrecientan los problemas principales son, en su mayoría, transversales y usuales tanto en la comuna de La Serena como Vicuña y tienen relación con lo siguiente:

Ha aumentado la existencia tanto de loteos irregulares como de poblados que se han ubicado en las riberas de los cauces, a pesar de los riesgos a los que están expuestos, como por ejemplo: Nueva Pelicana, Hinojal, Ex Fundo la Calera, Lambert, Islón, Quebrada de Talca, Los Corrales, Marquesa, Nueva Talcuna, El Molle, Almendral, Villa Francia y El Arenal.

Modificaciones del cauce y alteraciones de suelos tanto por la actividad agrícola como minera, turística, comercial, vivienda y de extracción de áridos.

Perdida de la capacidad del suelo de infiltrar agua lluvia debido a la urbanización de los suelos.

Falta de planificación territorial que integre los distintos usos.

Los organismos públicos se han visto sobrepasados y muchas veces limitados en su accionar dada la falta de información y/o profesionales para fiscalización.

El informe incluye un análisis particular para 19 sectores.

Respecto de la existencia del embalse Puclaro, si bien tiene externalidades positivas como el control de crecidas y abastecimiento de agua para la agricultura, también tiene algunas consecuencias adversas en la dinámica natural del río aguas abajo de éste como: disminución de la capacidad de arrastre, profundización del cauce y mayor capacidad erosiva justo aguas abajo del mismo embalse.

El embalse retiene dos tercios del sólido en arrastre y un 60% del sólido en suspensión disponible en la cuenca del río Elqui, por lo que dado a la existencia de un humedal en la desembocadura al mar, sería recomendable realizar estudios respecto de cómo se ve o ha visto afectada la existencia del humedal a causa del embalse.

De las defensas fluviales existentes en el cauce y que fue posible catastrar, se identificaron tres tipos: enrocado, gaviones y pretils tierra. Respecto de los pretils de tierra, son absolutamente vulnerables ante los efectos de las grandes crecidas. Las obras tipo gavión y enrocado en el río, pueden tener una resistencia mayor, en la medida que hayan sido diseñados adecuadamente.

Los problemas pueden ser serios si las defensas son arrastradas, porque pueden obstruir puentes y/o generar problemas de inundación en sectores que no se ven afectados a ellos en general. Cabe señalar que, la velocidad promedio en la mayor parte de los tramos con pretilos de tierra supera los 3 m/s, por lo que la probabilidad que sean arrastrados por las crecidas es alta considerando un diámetro medio de 40 mm, basado en los resultados de las calicatas tanto aguas arriba como aguas abajo del Embalse Puclaro.

8. PLAN DE MANEJO DE CAUCE

Como definición DOH, el Plan de Manejo de Cauces consiste en la elaboración de un análisis integral del cauce, considerando aspectos hidráulicos y de mecánica fluvial. El resultado de este tipo de estudio, es identificar las zonas inundables y/o erosionables ante crecidas, y según ello, proponer soluciones no estructurales, como restricción de usos de suelos, o identificar posibles obras de defensas fluviales para aquellos sectores con infraestructura o poblaciones; proponer medidas para regular la explotación sustentable de áridos y de corresponder, propone criterios para futuros estudios de fijación de deslindes.

En concordancia con lo indicado, para proponer un Plan de Manejo integral se debe considerar un "Espacio fluvial socialmente deseable", donde se reconozcan aspectos de índole económica, social, ambiental e hidráulica; que interactúen en el tiempo. Por tanto, el cómo se maneje el cauce no responde únicamente a las necesidades de espacio para la agricultura, infraestructura turística y/o para la vivienda, lo que supone un problema complejo de abordar, dado que dichas actividades prácticamente "se apropian" del cauce. Por ello, las actividades de taller de participación ciudadana, tanto con los Servicios Públicos como con la Comunidad, fueron claves para lograr definir medidas de manejo realistas que tengan un sentido territorial.

Por otra parte, se debe tener en consideración "la paradoja de poner en seguridad", que supone que toda acción de protección, como la construcción de defensas fluviales, tiene un efecto en el comportamiento del cauce. Así, ciertas obras que vienen a solucionar un problema, terminan trasladándolo en la ribera opuesta o aguas abajo, toda vez que el enfoque clásico para intervenciones de cauces tiene relación con aspectos como: acelerar el flujo para evacuar más rápido la crecida (canalizaciones, revestimientos), contener las crecidas y reducir la erosión (defensas longitudinales), controlar y regular caudales (obras de retención y regulación). El requerimiento de contar con obras definitivas supone, además, que todas las soluciones estructurales que se propongan tengan una adecuada "Mantenimiento".

A continuación, en el Cuadro 8-1 y Cuadro 8-2, se indica el listado de medidas estructurales y no estructurales propuestas.

CUADRO 8-1 MEDIDAS ESTRUCTURALES

SECTOR	CATEGORÍA	SOLUCIÓN	ORGANISMO COMPETENTE	CÓDIGO
2	Defensas	Estudio diseño construcción defensas fluviales en Condominio Puertas del Mar	DOH-Inmobiliaria	EST-Elq-01
	Obra de protección puente	Construcción muro guarda radier en puente ruta 5 antiguo	Vialidad	EST-Elq-02
	Obra de protección puente	Construcción muro guarda radier en puente ruta 5 nuevo	Vialidad	EST-Elq-03
	Reemplazo Puente	Reemplazo puente FF.CC	EFE	EST-Elq-04
3	Obra de protección puente	Construcción muro guarda radier en puente El Libertador	Vialidad	EST-Elq-05
5	Defensas	Construcción defensas fluviales en Lambert	DOH	EST-Qda-01
	Defensas	Construcción defensas fluviales en Quebrada Santa Gracia, localidad de Islón	DOH	EST-Qda-02
	Obra de cruce (camino)	Construcción puente en camino D-305, Quebrada Santa Gracia	Vialidad	EST-Qda-03
	Obra de cruce (camino)	Construcción de badenes cruce camino D-205, Quebrada Santa Gracia	Vialidad	EST-Qda-04
	Obra de protección APR	Construcción obra de protección pozos APR El Romero, Quebrada Santa Gracia	DOH	EST-Qda-05
	Obra de cruce (canal)	Construcción de sifón en cruce canal El Romero, Quebrada Santa Gracia	Canalistas	EST-Qda-06
6	Reemplazo Puente	Reemplazo puente Pelicana	Vialidad	EST-Elq-06
7	Obras control relaves (defensas)	Construcción de defensas fluviales en Quebrada de Talca, Km 3.525 - sector relaves	DOH-Convenio	EST-Qda-07
	Defensas	Construcción defensas fluviales en Quebrada de Talca	DOH	EST-Qda-08
	Obra de cruce (camino)	Construcción badén en cruce camino D-269, Quebrada de Talca	Vialidad	EST-Qda-09
8	Obras control relaves (defensas)	Construcción defensas fluviales en Quebrada El Arrayán, Km 1700, sector relave	DOH-Convenio	EST-Qda-10
	Defensas	Construcción defensas fluviales en Quebrada El Arrayán, Km 2500	DOH	EST-Qda-11
	Obra de cruce (camino)	Construcción badén en camino D-337, Quebrada Arrayán	Vialidad	EST-Qda-12
	Obra de cruce (canal)	Construcción sifón en cruce canal Bellavista, Quebrada El Arrayán	Canalistas	EST-Qda-13
	Obra de protección puente	Construcción de obras de protección en puente cruce ruta CH-41, Quebrada El Arrayán	Vialidad	EST-Qda-14
9	Defensas	Construcción defensas fluviales en Nueva Talcuna	DOH	EST-Qda-15
	Defensas	Construcción defensas fluviales en Marquesa	DOH	EST-Qda-16
	Control aluvional	Construcción obras de control aluvional	DOH	EST-Qda-17

CUADRO 8-1 MEDIDAS ESTRUCTURALES

SECTOR	CATEGORÍA	SOLUCIÓN	ORGANISMO COMPETENTE	CÓDIGO
		en Quebrada Marquesa y Las Cañas		
	Obra de cruce (camino)	Construcción de puente en cruce camino interior, localidad de Marquesa	Vialidad	EST-Qda-18
	Obras control relaves (defensas)	Construcción defensas fluviales sector relaves, Quebrada Marquesa	DOH-Convenio	EST-Qda-19
10	Reemplazo Puente	Rediseño puente el Almendral	Vialidad	EST-Elq-07
	Reemplazo Puente	Reemplazo puente Marquesa en Km 37,2	Vialidad	EST-Elq-08
12	Obra de cruce (camino)	Construcción obra de cruce en ruta Ch-41	Vialidad	EST-Qda-20
	Obra de cruce (camino)	Construcción de badén en cruce camino D-237, Quebrada San Carlos	Vialidad	EST-Qda-21
13	Defensas	Construcción defensas fluviales en Quebrada de Leiva	DOH	EST-Qda-22
	Obra de cruce (camino)	Construcción de puente cruce Ruta 41, Quebrada de Leiva	Vialidad	EST-Qda-23
	Obra de cruce (canal)	Construcción sifón cruce canal Barrancas, Quebrada de Leiva	Canalistas	EST-Qda-24
	Obra de cruce (canal)	Construcción sifón cruce canal San Isidro, Quebrada de Leiva	Canalistas	EST-Qda-25
	Obra de cruce (canal)	Construcción sifón cruce canal Unificado Diez, Quebrada de Leiva	Canalistas	EST-Qda-26
	Obra de cruce (camino)	Construcción badén en cruce camino Calingasta, Quebrada de Leiva	Vialidad	EST-Qda-27
15	Retención de Sedimentos / Revestimiento Cauce	Construcción obras de control sedimentos en Quebrada El Arenal	DOH	EST-Qda-28
	Obra de cruce (canal)	Construcción sifón en cruce canal Barrancas, Quebrada El Arenal	Canalistas	EST-Qda-29
	Obra de cruce (canal)	Construcción sifón en cruce canal San Isidro, Quebrada El Arenal	Canalistas	EST-Qda-30
	Obra de cruce (camino)	Construcción alcantarilla en cruce Ch-41, Quebrada El Arenal	Vialidad	EST-Qda-31
16	Retención de Sedimentos / Revestimiento Cauce	Construcción obras de control sedimentos en Quebrada El Cebollín	DOH	EST-Qda-32
	Obra de cruce (canal)	Construcción sifón en cruce canal Puntilla, Quebrada El Cebollín	Canalistas	EST-Qda-33
	Obra de cruce (canal)	Construcción sifón en cruce canal Miraflores, Quebrada El Cebollín	Canalistas	EST-Qda-34
17	Obra de cruce (canal)	Construcción sifón en cruce canal Pullayes, Quebrada Pullayes	Canalistas	EST-Qda-35
	Retención de Sedimentos / Revestimiento Cauce	Construcción obras de control sedimentos en Quebrada Pullayes	DOH	EST-Qda-36
	Protección canal	Mejoramiento del revestimiento de protección en canal Miraflores	Canalistas	EST-Qda-37

CUADRO 8-1 MEDIDAS ESTRUCTURALES

SECTOR	CATEGORÍA	SOLUCIÓN	ORGANISMO COMPETENTE	CÓDIGO
	Obra de cruce (camino)	Construcción alcantarilla en camino interior, Quebrada Pullayes	Vialidad	EST-Qda-38
	Obra de cruce (camino)	Construcción alcantarilla en cruce camino D-391, Quebrada Pullayes	Vialidad	EST-Qda-39
18	Defensas	Construcción de defensas fluviales en Quebrada Uchumi, comuna de Vicuña	DOH	EST-Qda-40
	Obra de cruce (camino)	Construcción badén en cruce camino D-283, Quebrada Uchumi, comuna de Vicuña	Vialidad	EST-Qda-41
	Obra de cruce (camino)	Construcción alcantarilla en cruce ruta Ch-41, Quebrada Uchumi, comuna de Vicuña	Vialidad	EST-Qda-42
19	Reemplazo Puente	Reemplazo Puente Peralillo. Km 14,9	Vialidad	EST-Elq-09
	Reemplazo Puente	Reemplazo Puente Diaguitas. Km 16,7	Vialidad	EST-Elq-10
	Reemplazo Puente	Reemplazo Puente Camino D-377. Km 23,6	Vialidad	EST-Elq-11
	Reemplazo Puente	Reemplazo Puente Algarrobal. Km 24,5	Vialidad	EST-Elq-12

Fuente: Elaboración propia.

CUADRO 8-2 MEDIDAS NO ESTRUCTURALES

N°	Categoría	Código	Medidas / Contenidos	Sector	Actores Vinculados
1	Deslindes río Elqui	NE-01	Elaboración del expediente técnico y legal para fijación de deslinde	4,6,10 y 14	DOH- Bienes Nacionales
2	Revisión Normativas Comunales	NE-02	Protección Humedal	1	Municipalidades
			Explotación Sustentable de Áridos	4	Municipalidades
			Revisión Zonificación áreas de Riesgos (inundación)	10,11	Municipalidades
3	Programa de Mantenimiento de Obras Fluviales	NE-03	Elaboración Programa de mantenimiento periódica de las obras fluviales	Transversal en sectores con obras DOH: 2,5,7,8,9,13,15,16,17,18	DOH

CUADRO 8-2 MEDIDAS NO ESTRUCTURALES

N°	Categoría	Código	Medidas / Contenidos	Sector	Actores Vinculados
4	Promoción de la educación ambiental y participación ciudadana	NE-04	Promover y mejorar la gestión del riesgo (conocimiento amenazas y reducción vulnerabilidad), Educación en ámbito fluvial (Ej. FPA río Elqui), Programas de participación ciudadana asociados a cambios normativos y acuerdos institucionales (socialización), Instancias de difusión de acuerdos (Mesa Institucional Cuenca Elqui.)	Transversal	Servicios Públicos
5	Restauración, Rehabilitación y Mejora del Cauce	NE-05	Estudio de Restauración Fluvial	Transversal	DOH- Municipalidades- CONAF-MMA
			Programa de Manejo Ambiental a nivel comunal, Parques Ribereños	Transversal	Municipalidades
			Delimitación Corredor Fluvial	Transversal	DOH
6	Coordinación Institucional	NE-06	Mesa de Trabajo Cuenca del Elqui	Transversal	Servicios Públicos - Privados - Organizaciones Comunitarias
			Protección Humedal	1	Servicios Públicos
			Planificación y control del espacio ribereño	Transversal	Servicios Públicos
			Control Extracción de Áridos	4	Municipalidades, DOH
			Manejo de Relaves	5, 7, 8, 9	Sernageomin, CONAF, DOH, MMA

Fuente: Elaboración propia.

De las obras indicadas, si bien se presupuestan todas a nivel de prefactibilidad, solo aquellas que son de competencia de la DOH se las evalúa para obtener la rentabilidad Cuadro 8-33, en el cual se destaca el principal indicador de cada proyecto.

CUADRO 8-3 EVALUACIÓN ECONÓMICA

Quebrada	Costo Obras (\$)	VAN (\$)	TIR (%)	VAC (\$)	CAE (\$)	VAN / Inv.	CAE por Vivienda (\$/vivienda)
El Arenal	264.918.513	88.777.658	8,70%	283.151.306	20.570.634	0,34	642.832
El Cebollín	167.387.486	-36.752.995	4,10%	178.907.788	12.997.456	-0,22	812.341
El Arrayán	120.606.021	-93.020.752	-1,40%	128.009.154	9.299.726	-0,86	-
Leiva	749.415.269	164.230.958	7,80%	800.993.142	58.191.280	0,22	393.184
La Marquesa 1	1.412.972.753	-860.511.643	0,40%	1.508.143.999	109.565.020	-0,62	1.141.302
La Marquesa 2	954.969.687	-163.036.629	4,50%	1.016.151.202	73.822.279	-0,18	485.673

CUADRO 8-3 EVALUACIÓN ECONÓMICA

Quebrada	Costo Obras (\$)	VAN (\$)	TIR (%)	VAC (\$)	CAE (\$)	VAN / Inv.	CAE por Vivienda (\$/vivienda)
La Marquesa 3	20026942290	-19.880.475.150	-3,80%	21.405.279.686	1.555.070.269	-0,99	-
Pullayes	355.536.785	-200.234.491	0,90%	380.006.304	27.607.044	-0,56	1.200.306
Santa Gracia 1	691.796.138	-336.437.029	1,70%	739.408.423	53.717.217	-0,49	880.610
Santa Gracia 2	199.074.729	-178.850.537	-2,60%	212.775.879	15.457.936	-0,9	-
Santa Gracia 3	407.668.634	235.727.966	10,60%	435.726.083	31.655.026	0,58	313.416
Talca	133.990.998	135.435.926	13,90%	143.212.815	10.404.255	1,01	385.343
Uchumi	288.941.143	-43.249.768	4,70%	301.423.104	21.898.060	-0,24	534.099

Fuente; Elaboración propia.

Para poder determinar el cronograma de ejecución de esas obras, se priorizan utilizando como enfoque metodológico, la Evaluación Multicriterio (EMC) que surge del resultado de matrices de análisis, las cuales permiten determinar la importancia relativa de un conjunto de criterios de evaluación por parte de distintos participantes, cuya priorización se basa en la definición de pesos para cada criterio, y posteriormente, al ser aplicados a cada iniciativa de inversión, entrega como producto final un ranking de prioridad. Una de las principales características de estas metodologías, es la diversidad de factores que se logran integrar en el proceso de evaluación, pudiendo transformar las mediciones y percepciones en una escala única, de modo de poder comparar los elementos y establecer órdenes de prioridad.

Utilizando los resultados de presupuestos, evaluación económica y priorización, se obtiene el Cuadro 8-4.

CUADRO 8-4
CRONOGRAMA SOLUCIONES DOH EN ORDEN DE PRIORIDAD

N° RANKING	CATEGORÍA	SOLUCIONES	CÓDIGO	HORIZONTE DE EJECUCIÓN (MM\$/AÑO)									
				CORTO PLAZO					LARGO PLAZO				
				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	Defensas	Construcción defensas fluviales en Quebrada de Talca	EST-Qda-08	133,99									
2	Defensas	Construcción defensas fluviales en Lambert	EST-Qda-01	407,67									
3	Defensas	Construcción defensas fluviales en Quebrada de Leiva	EST-Qda-22	749,42									
4	Defensas	Construcción defensas fluviales en Marquesa	EST-Qda-16		954,97								
5	Defensas	Construcción defensas fluviales en Quebrada Santa Gracia, localidad de Islón	EST-Qda-02		691,80								
6	Retención de Sedimentos / Revestimiento Cauce	Construcción obras de control sedimentos en Quebrada El Arenal	EST-Qda-28			264,92							
7	Defensas	Construcción de defensas fluviales en Quebrada Uchumi, comuna de Vicuña	EST-Qda-40			288,94							
8	Defensas	Construcción defensas fluviales en Nueva Talcuna	EST-Qda-15			1.412,97							

CUADRO 8-4
CRONOGRAMA SOLUCIONES DOH EN ORDEN DE PRIORIDAD

9	Obra de protección APR	Construcción obra de protección pozos APR El Romero, Quebrada Santa Gracia	EST-Qda-05				199,07						
10	Retención de Sedimentos / Revestimiento Cauce	Construcción obras de control sedimentos en Quebrada El Cebollín	EST-Qda-32				167,39						
11	Retención de Sedimentos / Revestimiento Cauce	Construcción obras de control sedimentos en Quebrada Pullayes	EST-Qda-36				355,54						
12	Defensas	Construcción defensas fluviales en Quebrada El Arrayán, Km 2500	EST-Qda-11				120,61						
13	Control aluvional	Construcción obras de control aluvional en Quebrada Marquesa y Las Cañas	EST-Qda-17					3.337,82	3.337,82	3.337,82	3.337,82	3.337,82	3.337,82
TOTAL (MM\$)				1.291,07	1.646,77	1.966,83	842,61	3.337,82	3.337,82	3.337,82	3.337,82	3.337,82	3.337,82

Nota: Los proyectos marcados en verde son aquellos que la evaluación económica arrojó rentable.

Fuente: Elaboración propia.

9. ANÁLISIS AMBIENTAL DEL PLAN

Se realizó un estudio de análisis ambiental (EAA) a fin de determinar la existencia en el área de estudio, de elementos de interés desde el punto de vista ambiental que deban ser considerados en la proposición de obras para el Plan de Manejo de Cauces para la Cuenca del río Elqui.

A partir del diagnóstico ambiental realizado en el área de influencia, se determinó que los componentes ambientales más sensibles son: los suelos agrícolas, la calidad del agua (vinculada a efectos de relaves), el humedal de la desembocadura del río Elqui, algunos asentamientos humanos y zonas turísticas ribereñas, puentes, caminos y pozos (APR) afectados por las crecidas o aluviones.

En relación con el análisis de pertinencia de ingreso al SEIA de las medidas propuestas, de acuerdo al Reglamento del SEIA (D.S. N°40/2013), artículo 3, se concluye que 14 ingresan al SEIA, todas soluciones Estructurales. De estos 14 proyectos, 10 corresponden a sifones (a ejecutar por las organizaciones de canalistas respectivas), y 4 son proyectos de competencia DOH localizados en la Quebradas Marquesa, El Arenal, El Cebollín y Pullayes.

En relación a la modalidad de ingreso al SEIA, los 10 sifones señalados ingresan, preliminarmente, mediante una DIA entanto que de los 4 proyectos DOH que ingresan al SEIA, las obras de control aluvional propuestas para el sector de quebrada Marquesa lo harían vía EIA, dado que aplica el artículo N°6 del Reglamento del SEIA, literal c) *La magnitud y duración del impacto del proyecto o actividad sobre el suelo, agua o aire en relación con la condición de línea de base*; debido a la envergadura de las obras, específicamente los volúmenes a embalsar y material a extraer de la quebrada; y la duración de su impacto (se espera que se mantenga en el largo plazo). Las obras de competencia de Vialidad no entrarían al SEIA.

De los 4 proyectos DOH que ingresan al SEIA, las obras de control aluvional propuestas para el sector de quebrada Marquesa lo harían vía EIA, dado que aplica el artículo N°6 del Reglamento del SEIA, literal c) *La magnitud y duración del impacto del proyecto o actividad sobre el suelo, agua o aire en relación con la condición de línea de base*; debido a la envergadura de las obras, específicamente los volúmenes a embalsar y material a extraer de la quebrada; y la duración de su impacto (se espera que se mantenga en el largo plazo). Para evaluar la aplicación de otros articulados como el N°5 y 6 del Reglamento del SEIA, se recomienda un estudio de ruido.; para el N°6 y 8 se requiere una línea de base del medio biótico, sobre todo para identificar aquellos recursos propios del país que sean escasos, únicos o representativos, o protegidos.

Respecto a los proyectos de competencia de Vialidad, como puentes, badenes y obras de protección de puentes (Muros guarda radier), se evaluaron los movimientos de material en el cauce para verificar la alteración del cuerpo o curso de agua continental y los volúmenes límite (en este caso 50.000 m³). Ninguna de las obras de vialidad evaluadas ingresa al SEIA, quedando 11 obras por determinar ya que el alcance de este estudio no permite conocer los m³ de material a extraer del río.

En función de las variables descritas y analizadas en el Diagnóstico Ambiental, se analizó la necesidad de establecer unidades territoriales restrictivas, donde se limiten ciertas acciones contempladas en el Plan de Manejo de Cauces, producto del alto valor ecológico de uno o más componentes ambientales presentes. Así, se definió como Zona de Restricción Ambiental a la desembocadura del río Elqui, debido a su vulnerabilidad dada por su paso por un área urbana y a su condición de área de preservación ecológica establecida por los instrumentos de Planificación Territorial.

Con el fin de evitar, atenuar, reparar y/o compensar los impactos ambientales ocasionados en el medio ambiente producto de la intervención por la construcción y operación de las obras consideradas en el Plan de Manejo de Cauces, se propone un Plan de Manejo Ambiental (PMA) genérico, basado en principales impactos ambientales que se han detectado en los proyectos propuestos. Las medidas consideradas en el Plan de Manejo Ambiental, junto con la tramitación de algunos Permisos Ambientales Sectoriales aplicables, podrían alcanzar las UF 8.809 para algunos proyectos.

Las medidas consideradas en el Plan de Manejo Ambiental, junto con la tramitación de algunos Permisos Ambientales Sectoriales aplicables, podrían alcanzar las 8.809 UF para algunos proyectos.

Dentro de los estudios que se recomiendan para etapas futuras de los proyectos, se encuentra elaborar líneas de base específicas a las áreas influencias de los proyectos, individualmente, de esta forma se podrá definir adecuadamente el ingreso al SEIA, la vía, medidas, costos y el resto de los temas asociados a cada proyecto. También se recomienda completar los estudios de análisis ambiental considerando las actividades particulares de cada obra y evaluar criterios en el diseño de las obras que consideren la ingeniería naturalística y la restauración fluvial.

Por último, se debe recalcar que el presente estudio, junto con el análisis de pertinencia de ingreso al SEIA de las Medidas del Plan, la vía de ingreso, los Permisos Ambientales Sectoriales, las Medidas y Costos Ambientales asociados; se basan en la información secundaria recopilada, por lo que tiene las limitaciones propias del alcance de la consultoría. Por ello, se debe tomar como referencia y primer acercamiento a los aspectos ambientales y tramitaciones que se deberán considerar.

10. PARTICIPACIÓN CIUDADANA

El objetivo principal del estudio de participación ciudadana fue integrar a los actores relevantes de la comunidad, involucrada con el estudio en desarrollo, ya sea a través de consultas, talleres de trabajo u otras actividades que permitieran, por una parte, informarlos de los objetivos y avances del estudio, y por otra, recoger información y sus inquietudes, intereses y opiniones, incorporándolas en el Estudio, en el marco de la determinación de la factibilidad “global” del proyecto.

Se realizaron 12 reuniones de participación ciudadana. Las primeras reuniones (PAC1), con tres encuentros, se realizaron en el mes de noviembre del año 2017, con una asistencia total de 144 personas, de las cuales 88 correspondieron a hombres y 56 a

mujeres. El segundo bloque de reuniones, que contemplaron 2 Talleres con Funcionarios y 3 talleres con la comunidad, se efectuaron en los meses de junio y agosto del año 2018, con una asistencia total 139 personas, de las cuales 83 correspondió a hombres y 56 a mujeres. Las reuniones finales de participación ciudadana (PAC3), que consideraron cuatro encuentros, se realizaron en el mes de noviembre del año 2018, con una asistencia total de 144 personas, de las cuales 77 correspondió a hombres y 67 a mujeres. En suma, 427 personas participaron activamente en las distintas reuniones de participación ciudadana.

Existe una multiplicidad de actores presentes en el área de estudio. Es un vasto territorio, que tiene asociadas actividades como la agricultura, diversos tipos de infraestructura de riego, infraestructura de agua potable rural y urbana, extracción de áridos, sectores inmobiliarios, turísticos, mineros, de ocupación por relaves mineros, infraestructura vial asociada a distintos poblados, entre otros usos. Cada actor asociado a estos usos tiene intereses, lógicas y expectativas muy diversas que se expresan en los conflictos que cada cierto tiempo surgen en el valle. De estos usos, la actividad extractiva de áridos y las faenas mineras en algunas quebradas, son reconocidas por los actores como generadores de daño, contaminación y problemas en los sectores donde estas actividades se desarrollan, afectando incluso a otros sectores. Asimismo, existe la queja entre algunos organismos públicos, que son acusados de con su actuación, perjudicar a otros actores locales.

Debido a la amplitud de actividades presentes, también hay un grupo importante de instituciones del Estado involucradas entre los tomadores de decisiones de importancia para la cuenca, el río y su entorno (Municipio, DOH, DGA, Bienes Nacionales, entre otros). Los actores perciben una descoordinación entre estas instituciones, que –dados varios ejemplos durante las actividades realizadas- actúan inorgánicamente, lo que tiene como efecto que la ciudadanía no tiene la claridad respecto de las funciones y atribuciones de cada una de ellas y a cuáles recurrir cuando existen problemas.

Sin embargo, un aspecto a destacar fue el trabajo realizado con los funcionarios públicos y municipales. Se generó un espacio para el debate de las perspectivas institucionales en torno a los objetivos del estudio, existiendo una valiosa retroalimentación técnica. Los funcionarios presentaron muy buena disposición para el trabajo y dieron cuenta del vacío existente de una instancia coordinadora entre servicios. El impulso generado en el estudio puede servir de base para una futura mesa de trabajo interinstitucional, que se propone como medida No Estructural en este Plan de Manejo.

Otro elemento relevante en el proceso de participación ciudadana, fue la activa participación de las distintas organizaciones sociales del área de estudio. Juntas de vecinos, APR, clubes deportivos y canalistas, proporcionaron información, comunicaron sus problemas y participaron activamente en todas las reuniones PAC.

Como una de las principales recomendaciones, se propone que, en las siguientes etapas del estudio, se continúe con un proceso de participación y consulta que garantice una amplia participación de la comunidad afectada y/o beneficiada, que informe adecuadamente a las organizaciones representativas sobre los distintos estudios que se realizarán a futuro. En el contexto del Plan de Manejo de Cauce, con sus medidas estructurales y no estructurales, es prioritario la creación de una “Mesa del río Elqui”, como continuadora de las

reuniones efectuadas durante estudio y que reúna a los diversos tomadores de decisiones, resulta como una urgente medida para continuar con lo avanzado a la fecha. Resultará clave la elección de la institución que coordine estos esfuerzos preliminares de coordinación, siendo el gobierno regional el más recomendable.

Finalmente, las reuniones PAC han permitido una conversación sobre el río y el valle que no existía. Se ha corroborado la importancia que tiene el río y su cuidado para gran parte de los actores públicos y comunitarios. El presente estudio genera una base de información actualizada para ser utilizada por todos los organismos, ya sea públicos y/o privados, para estudios, programas y proyectos, que se requieran realizar a futuro.

11. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El presente estudio ha permitido identificar y cuantificar una serie de problemas de diversa índole que hoy en día presenta el río Elqui, que se manifestarán con grandes daños el día que haya grandes crecidas.

El estudio, en su desarrollo, generó información básica relevante que puede ser utilizada en futuros proyectos y planificaciones, tanto por los distintos Servicios Públicos y Privados como por particulares.

El estudio generó un Plan de Manejo de Cauces, que considera medidas estructurales y no estructurales, cuya ejecución queda en manos de diversos organismos vinculados o competentes en cada materia. Además, se establecieron soluciones locales en las quebradas, que apuntan a proteger en forma particular centros poblados expuestos a riesgos.

En relación a lo anterior, una de las medidas que más respaldo tuvo en las reuniones de participación ciudadana fue la “Mesa de la Cuenca del río Elqui”, ya que se ha considerado como punta pie inicial para fomentar y planificar las medidas a desarrollar. Por lo anterior, y dado el impulso generado en el estudio, se recomienda tomar la base generada para sustentar una futura mesa de trabajo.

Por otra parte, la existencia del proyecto GIRAGUA en la región de Coquimbo, que tiene como objetivo ayudar a resolver los desafíos sobre el recurso hídrico mediante el desarrollo de una metodología para el manejo integrado de los mismos, generando así un modelo de gobernanza para lograr un desarrollo sostenible, integrado y de largo plazo, tiene como una de las prioridades, que se conforme la “Unidad de Gestión Integrada de Cuenca, del Río Elqui”. Por lo anterior, y conforme a lo señalado en párrafo precedente, se recomienda se realicen los contactos de coordinación con los desarrolladores del proyecto GIRAGUA, para definir una única mesa de trabajo que sea integradora de modo que no se duplique la información y los esfuerzos de trabajo, dado que es un proyecto que lleva más de un año en desarrollo.

Respecto de las medidas propuestas, se propone que exista un Plan de Seguimiento y Evaluación Participativo Multisectorial, siguiendo la orientación del proceso

efectuado para la elaboración del Plan, incluyendo de manera activa a instituciones participantes de la “Mesa de la Cuenca del Elqui”.

Se recomienda involucrar en mayor medida a las Municipalidades de La Serena y Vicuña, especialmente con las unidades especializadas como SECPLAC, Asesoría Urbana, DOM y DIDECO. La Implementación del Plan de Manejo de Cauce, requiere contar con el apoyo decidido de la organización municipal por el contacto directo que tiene con los principales actores locales involucrados en el plan como por la injerencia directa que tiene en los principales instrumentos de planificación.

Se realizó una evaluación económica de los proyectos DOH y solo en cuatro casos, quebradas El Arenal, Leiva, Santa Gracia en Lambert y Talca, resultaron positivos. Obras de alto costo, como los retenedores de sólidos, muy difícilmente resulten rentables. Mientras estas obras no se construyan, será imperioso despejar el cauce y restituir el fondo del lecho, al menos en la confluencia de la quebrada de Marquesa con el río Elqui, después de cada crecida importante.

Existe un consenso a nivel de Servicios Públicos y Comunidad que la intervención de los cauces con obras no es necesariamente la solución más acertada a todos los problemas del área de estudio y se apunta a “dejar pasar el agua” de forma libre para evitar acrecentar los problemas de inundación y/o inundar sectores que históricamente no se han inundado.

En relación a lo indicado en los párrafos anteriores, se recomienda establecer dentro de la normativa existente el “Espacio Mínimo Fluvial”, entendiendo como tal, *el espacio mínimo necesario para mantener una dinámica fluvial acorde con los distintos usos y usuarios del cauce*, restringiendo particularmente el uso habitacional. Cabe señalar que, dentro del desarrollo del estudio, se define y se propone en planos, el espacio mínimo fluvial a lo largo de todo el río Elqui.

Dadas las características generales de pendientes pronunciadas en quebradas, no se recomienda encauzar las quebradas que aún conservan grados de naturalidad, sobre todo si eso significa reducir la sección natural, ya que además de acrecentar el problema hidráulico, se propicia la ocupación ribereña de forma no planificada.

En relación a los áridos disponibles en el río Elqui, se tiene que, del total de sedimentos disponible en la cuenca, aproximadamente **dos tercios del total** se queda retenido en el embalse Puclaro. En términos prácticos, se tiene que en el río Elqui aguas abajo del embalse, la disponibilidad anual de áridos sería del orden de los 127.000 m³ dispuestos a lo largo de un tramo que abarca desde el embalse hasta el Puente Zorrilla (aproximadamente 40 km). Por lo anterior, no se recomienda autorizar extracciones de áridos mecanizadas en el cauce.

Se recomienda evitar, bajo todas las circunstancias, la extracción de áridos en las cercanías de los puentes, dado los efectos nocivos que se generan en éstos o en la infraestructura cercana a ellos. Un caso de afectación existente es el Puente Ruta 5 Antiguo

(200 m aguas abajo del puente FF.CC), en el cual es posible observar parte de la base del estribo derecho del puente y de algunas de las cepas. Aun cuando todavía queda vestigios de un muro guarda-radier, el fondo del cauce aguas abajo de éste, se encuentra profundizado aproximadamente 2 m.

En relación a los sedimentos en suspensión, la situación no varía mayormente, ya que, en este caso, de acuerdo a la literatura existente y a casos como el embalse Cogotí, se tiene que prácticamente el 90% del sedimento en suspensión queda atrapado en el embalse. Lo anterior implica que del total de sedimentos en suspensión que aporta la cuenca del río Elqui, aproximadamente solo el 40% llega al humedal ubicado en la desembocadura del río, por lo que se recomienda incluir esta condición en el/los estudios del humedal que se realicen y/o se encuentren en ejecución bajo el proyecto “GEF” impulsado por el Ministerio de Medio Ambiente.

Se recomienda que previo al otorgamiento de permisos de distinta índole y/o cambios de usos de suelo, se consulte a la Dirección de Obras Hidráulicas sobre los riesgos de inundación a los que están expuestos, dado que, dentro del desarrollo del estudio, se constató la proliferación de viviendas y condominios en las riberas del río Elqui que históricamente han sido inundables.

Si bien un decreto de deslinde no limita el riesgo, se convierte en una herramienta útil para el Ministerio de Bienes Nacionales para limitar los otorgamientos de accesión y regularización de pequeña propiedad en riberas de cauces, por lo que se recomienda que en sectores identificados en el estudio como probables de ser ocupados, se desarrollen los estudios técnicos (con topografía de detalle) y legales (realizado por Bienes Nacionales) para propuesta de Decreto de Deslinde. Cabe señalar que la definición de deslindes es una herramienta que también se ha señalado de utilidad para los funcionarios municipales, en el sentido de limitar actividades en el cauce o en su ribera.

En el caso de desarrollar proyectos en el sector de desembocadura, se recomienda realizar el estudio de mareas para incluir los efectos de ésta en el análisis hidráulico del río y tener una mejor comprensión de la dinámica que se produce en este sector para poder abordar las soluciones. A este respecto, se recomienda incluir una topografía a una escala adecuada para efectos de estudios específicos de obras en desembocadura, así como también otros factores no hidráulicos de relevancia para el funcionamiento del humedal.

- El Plan de Manejo de Cauces, considera medidas estructurales y no estructurales, cuya ejecución queda en manos de diversos organismos vinculados o competentes en cada materia, por lo que se indican algunas recomendaciones para la ejecución de las Medidas Estructurales dependientes de otros organismos, distintos a DOH:

Las obras asociadas a sifones o protección de canales, vinculadas a organizaciones de Canalistas, deben ejecutarse en coordinación con las obras DOH que pudieran intervenir los cruces de las quebradas con los

canales. Además, se recomienda que los sifones puedan realizarse bajo la Ley 1123 de la Comisión Nacional de Riego.

Las obras de control de relaves localizadas en la quebrada de Talca, El Arrayán y Marquesa, cuyo ejecutor se ha denominado “DOH-Convenio”, pueden comenzar a ejecutarse en el corto plazo de manera paralela, en función de los acuerdos logrados con las empresas titulares de cada relave. Se propone que la DOH sea la contraparte técnica que apruebe las obras a construir.

En relación a las soluciones de competencia de Vialidad, se propone separar su ejecución en 2 grupos. El primer grupo, que se visualiza prioritario y debería abordarse en el primer periodo, correspondiente a los proyectos que involucran a la ruta 5, cruces en el río Elqui y cruces con la ruta Ch-41. El segundo grupo, corresponde a proyectos de badenes o puentes interiores en quebradas

- Respecto de las medidas propuestas, tanto el seguimiento como la evaluación son actividades imprescindibles en la implementación del Plan, por lo anterior, se propone que exista un Plan de Seguimiento y Evaluación Participativo Multisectorial, siguiendo la orientación del proceso efectuado para la elaboración del Plan, el cual otorga un rol relevante a la institucionalidad regional/provincial vinculada a alguna temática de las abordadas en este estudio, en lo referente al control y monitoreo, incluyendo de manera activa a instituciones participantes de la “Mesa de la Cuenca del Elqui”.
- A partir del diagnóstico ambiental realizado en el área de influencia, se determinó que los componentes ambientales más sensibles son: los suelos agrícolas, la calidad del agua (vinculada a efectos de relaves), el humedal de la desembocadura del río Elqui, algunos asentamientos humanos y zonas turísticas ribereñas, puentes, caminos y pozos (APR) afectados por las crecidas o aluviones.
- En relación al análisis de pertinencia de ingreso al SEIA, de las medidas propuestas, de acuerdo al Reglamento del SEIA (D.S. N°40/2013), artículo 3, se concluye que 14 medidas estructurales ingresan al SEIA. De estos 14 proyectos, 10 corresponden a sifones (a ejecutar por las organizaciones de canalistas respectivas), y 4 son proyectos de competencia DOH localizados en la Quebradas Marquesa, El Arenal, El Cebollín y Pullayes.
- Dentro de los estudios ambientales que se recomiendan para etapas futuras de los proyectos, se encuentra elaborar líneas de base específicas a las áreas influencias de los proyectos, individualmente, de esta forma se podrá definir adecuadamente el ingreso al SEIA, la vía, medidas, costos y el resto de los temas asociados a cada proyecto. También se recomienda completar los estudios de análisis ambiental considerando las actividades particulares de cada obra y evaluar criterios en el diseño de las obras que consideren la ingeniería naturalística y la restauración fluvial.

- Por último, se debe recalcar que el presente estudio, junto con el análisis de pertinencia de ingreso al SEIA de las Medidas del Plan, la vía de ingreso, los Permisos Ambientales Sectoriales, las Medidas y Costos Ambientales asociados; se basan en la información secundaria recopilada, por lo que tiene las limitaciones propias del alcance de la consultoría. Por ello, se debe tomar como referencia y primer acercamiento a los aspectos ambientales y tramitaciones que se deberán considerar.
- Respecto de los problemas y obras propuestas en quebrada Marquesa, se recomienda, en primera instancia, se realicen las obras que eviten que los relaves se “laven” por estar acopiados en las riberas de la quebrada. Lo anterior es para evitar que en una crecida se sume aporte sólido y/o que este material quede atrapado en las obras destinadas al control aluvional, restando capacidad a estas últimas.
- De no prosperar las obras en la quebrada Marquesa, se recomienda una limpieza permanente en la confluencia de esta quebrada con el río Elqui, con el objeto de evitar que se acumule el sólido en la confluencia misma y que peralte el agua que pueda fluir por la quebrada inundando la localidad de Marquesa.
- Aguas abajo del embalse Puclaro, se recomienda efectuar una limpieza de vegetación en el cauce en zonas puntuales que representen una amenaza de inundación en zonas vulnerables. Cierta vegetación puede generar obstrucción del escurrimiento y desbordes.

Debido a la importancia que tiene para la Comuna de Vicuña, se recomienda incluir en un próximo estudio las quebradas de “El Tambo” y “Los Loros”.

Contenido

1. INTRODUCCIÓN	1
2. ÁREA DE ESTUDIO Y OBJETIVOS	1
3. DESARROLLO DEL ESTUDIO Y ACTIVIDADES REALIZADAS	2
4. LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO	2
4.1. GENERALIDADES	2
4.2. POLIGONAL GEODÉSICA DE APOYO.....	3
4.3. LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO DE PUENTES	3
4.4. LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO LIDAR.....	3
5. ESTUDIOS BÁSICOS	4
5.1. GENERALIDADES	4
5.2. CAUDALES MEDIOS MENSUALES	4
5.3. ESTUDIO DE CRECIDAS	5
5.4. CAUDALES LÍQUIDOS	6
5.5. CAUDALES DETRÍTICOS.....	7
5.6. MUESTREO DE CALICATAS Y ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO	8
6. ANÁLISIS HIDRAULICO FLUVIAL.....	8
6.1. GENERALIDADES.....	8
6.2. RUGOSIDAD EN CAUCES.....	9
6.3. MODELACIÓN HIDRÁULICA	11
6.3.1 AGUAS ARRIBA DE EMBALSE PUCLARO	11
6.3.2 AGUAS ABAJO DE EMBALSE PUCLARO	12
6.3.3 QUEBRADAS.....	17
6.4. TRANSPORTE DE SEDIMENTOS	18
6.5. ANÁLISIS DE SOCAVACIÓN	19
7. DIAGNÓSTICO	22
8. PLAN DE MANEJO DE CAUCE.....	23
9. ANÁLISIS AMBIENTAL DEL PLAN.....	31
10. PARTICIPACIÓN CIUDADANA	32
11. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	34

CUADRO 4.2-1 COORDENADAS GEODÉSICAS MQSS	3
CUADRO 5.4-1 CAUDALES MÁXIMOS INSTANTÁNEOS (m ³ /s) EN QUEBRADAS	6
CUADRO 5.4-2 CAUDALES MÁXIMOS RÍO ELQUI AGUAS ARRIBA DEL EMBALSE PUCLARO.....	6
CUADRO 5.4-4 CAUDALES PEAK EN DESEMBOCADURA EXTRAPOLACIÓN DE CURVA DE FRECUENCIAS	7
CUADRO 5.5-1 CAUDALES MÁXIMOS INSTANTÁNEOS DETRÍTICOS (m ³ /s)	8
CUADRO 6.2-1 RUGOSIDADES RÍO ELQUI.....	9
CUADRO 6.2-2 RUGOSIDADES QUEBRADAS	11
CUADRO 6.3.1-1 COTAS DE AGUA EN RELACIÓN A COTA DE VIGA DE PUENTES	11
CUADRO 6.3.2-1 CAUDALES MÁXIMOS POR PERÍODO DE RETORNO (DATOS DE ENTRADA MODELO)	12
CUADRO 6.3.1-1 CAUDALES MÁXIMOS INSTANTÁNEOS EN SECTOR DE DESEMBOCADURA.....	14
CUADRO 6.3.1-2 CAUDALES DE DISEÑO AGUAS ABAJO DEL EMBALSE PUCLARO	15
CUADRO 6.3.1-3 COTAS DE AGUA EN RELACIÓN A COTA DE VIGA DE PUENTES	17
CUADRO 6.3.3-1 PERFILES TOPOGRÁFICOS POR QUEBRADA.....	17
CUADRO 6.3.3-2 CAUDAL DE DISEÑO CONSIDERANDO SÓLIDOS EN ARRASTRE (m ³ /s) EN QUEBRADAS	17
CUADRO 6.4-1 APOORTE SEDIMENTOLÓGICO TOTAL ESTIMADO ANUAL	19
CUADRO 6.5-1 SOCACCIÓN GENERAL POR SECTOR AGUAS ARRIBA EMBALSE PUCLARO	20
CUADRO 6.5-2 SOCACCIÓN GENERAL POR SECTOR AGUAS ABAJO EMBALSE PUCLARO	20
CUADRO 6.5-3 SOCACCIÓN TOTAL PUENTES AGUAS ARRIBA EMBALSE PUCLARO	21
CUADRO 6.5-4 SOCACCIÓN TOTAL PUENTES AGUAS ABAJO EMBALSE PUCLARO.....	21
CUADRO 8-1 MEDIDAS ESTRUCTURALES	24
CUADRO 8-2 MEDIDAS NO ESTRUCTURALES.....	26
CUADRO 8-3 EVALUACIÓN ECONÓMICA.....	27
CUADRO 8-4 CRONOGRAMA SOLUCIONES DOH EN ORDEN DE PRIORIDAD.....	29
CUADRO 8-4 CRONOGRAMA SOLUCIONES DOH EN ORDEN DE PRIORIDAD.....	30
FIGURA 2-1 ÁREA DE ESTUDIO	1
FIGURA 3-1 PRINCIPALES ACTIVIDADES REALIZADAS EN FUNCIÓN DE LOS OBJETIVOS	2
FIGURA 4.4-1 UBICACIÓN GENERAL DEL LEVANTAMIENTO LIDAR.....	4
FIGURA 5.2-1 CURVA VARIACIÓN ESTACIONAL RÍO ELQUI EN ALGARROBAL PERÍODO 1984/85-2016/17	5
CUADRO 5.4-3 CAUDALES MÁXIMOS RÍO ELQUI AGUAS ABAJO DEL EMBALSE PUCLARO.....	7
FIGURA 6.2-1.....	10
UBICACIÓN DE SECTORES EN ÁREA DE ESTUDIO	10
FIGURA 6.3.2-1 ÁREA DE INUNDACIÓN AGUAS ARRIBA EMBALSE PUCLARO PARA T=100 AÑOS.....	13
FIGURA 6.3.2-1- HIDROGRAMAS EN SECTOR DE DESEMBOCADURA	14
FIGURA 6.3.1-2 ÁREA DE INUNDACIÓN AGUAS ABAJO EMBALSE PUCLARO PARA T=100 AÑOS.....	16