

# **PROYECTO HIDROELÉCTRICO ALTO MAIPO**

## **ESTUDIO SEDIMENTOLÓGICO AVANZADO**

### **RESUMEN EJECUTIVO**

**INFORME FINAL PARA LA DOH**

AP04-2015

JUNIO 2015



**APR INGENIERIA S.A.**

## ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN .....	1
1.1 OBJETIVO .....	1
1.2 ALCANCES DEL ESTUDIO .....	1
1.2.1 Antecedentes básicos.....	2
1.2.2 Trabajos complementarios de terreno .....	3
1.2.3 Estudios básicos de ingeniería fluvial.....	4
1.2.4 Análisis de la degradación aguas abajo de las obras de toma en afluentes .....	5
1.2.5 Análisis de la degradación aguas abajo de la descarga Las Lajas .....	5
1.2.6 Análisis de la socavación local al pie de obras de descarga.....	6
1.2.7 Programa de monitoreo y medidas de mitigación .....	6
2. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO Y CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA FLUVIAL ALTO MAIPO .....	7
2.1 PROYECTO HIDROELÉCTRICO ALTO MAIPO .....	7
2.2 PUNTOS DE CAPTACIÓN Y DESCARGA.....	7
2.3 SECTORIZACIÓN INICIAL DE AREAS DE INFLUENCIA SEDIMENTOLÓGICA.....	8
2.4 ANÁLISIS DE LA ESCALA DE TIEMPO Y EVOLUCIÓN MORFOLÓGICA DE LOS CAUCES .....	9
2.5 PUNTOS DE CONTROL REPRESENTATIVOS DEL TRANSPORTE DE SEDIMENTOS .....	10
3. CUANTIFICACIÓN DE LOS EFECTOS DEL PHAM SOBRE EL TRANSPORTE DE SEDIMENTOS.....	11
3.1 BASES CONCEPTUALES PARA LA MODELACIÓN DEL TRANSPORTE DE SEDIMENTOS .....	11
3.1.1 Componentes del transporte sólido y su cuantificación.....	11
3.1.2 Cálculo del transporte sólido potencial de fondo o capacidad de arrastre .....	12
3.1.3 Cálculo del transporte sólido efectivo de fondo (gravas y ripios) .....	12
3.1.4 Cálculo del transporte sólido en suspensión (arenas).....	12
3.1.5 Cálculo del transporte sólido de washload (finos y turbiedad del agua).....	13
3.2 EFECTO DEL PHAM SOBRE EL TRANSPORTE SÓLIDO EFECTIVO DE FONDO .....	13
3.2.1 Valores representativos del efecto del PHAM sobre los gastos sólidos efectivos de fondo.....	13
3.2.2 Reducciones de los gastos sólidos efectivos de fondo .....	14
3.3 EFECTO DEL PHAM SOBRE LA CAPACIDAD DE ARRASTRE.....	15
3.3.1 Valores representativos del efecto del PHAM sobre las capacidades de arrastre .....	15
3.3.2 Efecto del PHAM sobre los gastos sólidos asociados a la capacidad de arrastre .....	15
3.4 EFECTO DEL PHAM SOBRE RELACIÓN TRANSPORTE EFECTIVO-CAPACIDAD DE ARRASTRE .....	17
3.5 EFECTO DEL PHAM SOBRE EL TRANSPORTE SÓLIDO EN SUSPENSIÓN DEL LECHO .....	18
3.5.1 Valores representativos del efecto del PHAM sobre los gastos sólidos en suspensión.....	18
3.5.2 Efecto del PHAM sobre los gastos sólidos en suspensión.....	18

PROYECTO HIDROELÉCTRICO ALTO MAIPO

3.6 EFECTO DEL PHAM SOBRE EL TRANSPORTE TOTAL DE SÓLIDOS DEL LECHO.....	19
3.7 EFECTO DEL PHAM SOBRE EL TRANSPORTE SÓLIDO DE WASHLOAD .....	21
3.7.1 Valores representativos del efecto del PHAM sobre del gasto sólido de washload .....	21
3.7.2 Efecto del PHAM sobre los gastos sólidos de washload.....	21
3.8 ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE EL ESTUDIO DE LA U. DE CHILE Y EL PRESENTE ESTUDIO .....	22
3.8.1 Capacidad de arrastre .....	22
3.8.2 Gasto sólido efectivo de fondo .....	23
3.8.3 Gasto sólido en suspensión.....	24
3.8.4 Comparación en puntos de control similares.....	25
3.9 INTERACCIÓN SEDIMENTOLÓGICA DE LA DESCARGA LAS LAJAS CON LAS BOCATOMAS LA SIRENA E INDEPENDIENTE DEL RÍO MAIPO .....	25
3.9.1 Antecedentes.....	25
3.9.2 Situaciones y sectores analizados.....	25
3.9.3 Análisis del régimen mecánico fluvial actual del tramo .....	26
4. EFECTOS LOCALES EN LAS CERCANÍAS DE LAS OBRAS DEL PHAM .....	27
4.1 BASES PARA LA CUANTIFICACIÓN DE LOS EFECTOS MECÁNICO FLUVIALES LOCALES .....	27
4.1.1 Cálculo de la socavación local al pie de la Descarga Las Lajas y bocatomas .....	27
4.1.2 Cálculo de la degradación del lecho aguas abajo de las obras.....	27
4.2 SOCAVACIÓN LOCAL AL PIE DE LA DESCARGA LAS LAJAS Y BOCATOMAS .....	28
4.3 DEGRADACIÓN DEL LECHO AGUAS ABAJO DE LAS BOCATOMAS DEL PHAM .....	28
4.4 DEGRADACIÓN DEL LECHO AGUAS ABAJO DE LA DESCARGA LAS LAJAS .....	29
5. EFECTOS SEDIMENTOLÓGICOS DE LAS CENTRALES GUAYACÁN Y EL CANELO .....	30
5.1 CENTRAL GUAYACÁN .....	30
5.1.1 Sectores de estudio .....	30
5.1.2 Efecto sobre la capacidad de transporte de fondo .....	30
5.1.3 Efecto sobre el de transporte de sedimento del lecho.....	30
5.1.4 Efecto sobre el de transporte de sedimento de washload.....	30
5.1.5 Degradación local del cauce del río Maipo aguas abajo de la restitución .....	31
5.1.6 Socavación al pie de la obra de descarga de la central Guayacán.....	31
5.2 CENTRAL EL CANELO .....	31
5.2.1 Sectores de estudio .....	31
5.2.2 Escenarios de análisis .....	31
5.2.3 Efectos sobre el transporte de sedimentos del lecho .....	32
5.2.4 Efectos sobre el de transporte de sedimento de washload .....	33

Estudio Sedimentológico Avanzado

5.2.5 Degradación del cauce del río Maipo aguas abajo de la restitución de la central .....	33
6. PROGRAMA DE MONITOREO Y PLAN DE MITIGACIONES DE IMPACTOS DEL PHAM .....	33
6.1 PROGRAMA DE MONITOREO PROPUESTO .....	33
6.1.1 Variables sedimentológicas relevantes a monitorear .....	33
6.1.2 Medición de variables sedimentológicas relevantes.....	34
6.1.3 Manuales de procedimiento.....	34
6.1.4 Red de monitoreo integral de variables sedimentológicas relevantes.....	34
6.2 PLAN DE MITIGACIONES.....	37
6.2.1 Tipología de medidas de mitigación .....	37
6.2.2 Medidas de mitigación .....	38
7. RESUMEN DE CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	39
7.1 REVOLUCIÓN MORFOLÓGICA DE LOS CAUCES .....	39
7.2 EFECTOS DEL PHAM SOBRE EL TRANSPORTE DE SEDIMENTOS.....	40
7.2.1 Reducciones en los gastos sólidos efectivos de fondo .....	40
7.2.2 Reducciones en los gastos sólidos en suspensión removidos del lecho .....	40
7.2.3 Reducciones en los gastos sólidos totales removidos del lecho .....	41
7.2.4 Reducciones en los gastos sólidos de washload .....	41
7.2.5 Interacción sedimentológica en sector Las Lajas y bocatomas La Sirena e Independiente .....	41
7.3 SOCAVACIÓN LOCAL AL PIE DE LA DESCARGA LAS LAJAS Y BOCATOMAS DEL PHAM .....	42
7.4 DEGRADACIÓN AGUAS ABAJO DE LAS OBRAS DEL PHAM .....	42
7.5 EFECTOS SEDIMENTOLÓGICOS DE LAS CENTRALES GUAYACÁN Y EL CANELO Y EL PHAM .....	42
7.5.1 Central Guayacán.....	42
7.5.2 Central El Canelo.....	43
7.6 PROGRAMA DE MONITOREO .....	44
7.7 PLAN DE MITIGACIONES PROPUESTO .....	44

## RESUMEN EJECUTIVO

### 1. INTRODUCCIÓN

#### 1.1 OBJETIVO

El presente estudio surge dentro del marco del proceso de evaluación de impacto ambiental (EIA) del Proyecto Hidroeléctrico Alto Maipo (PHAM), llevado a cabo por AES Gener, y en respuesta a los requerimientos de la autoridad respecto a justificar, ampliar y fundamentar los impactos del PHAM sobre la componente sedimentológica de los cauces intervenidos. Su finalidad última es elaborar un plan de monitoreo para la componente hidráulica-mecánico fluvial y sedimentológica, acorde a los impactos previsibles establecidos en este estudio.

El año 2009, AES Gener y APR Ingeniería, concordaron con la Dirección de Obras Hidráulicas (DOH) los siguientes alcances y metodologías a utilizar para abordar este estudio:

- a) Definir las áreas directas e indirectas de influencia del proyecto, entendidas éstas como aquellas que pudieran ser impactadas directa o indirectamente por cambios en la condición sedimentológica generada por la operación de las obras del proyecto.
- b) Complementar los antecedentes relativos al impacto del PHAM sobre el arrastre de sólidos, debido a la reducción de caudales, en los tramos ubicados aguas abajo de las obras de captación proyectadas en los ríos Colorado y Yeso, así como en los esteros Colina, La Engorda, Las Placas y El Morado del río Volcán.
- c) Entregar elementos técnicos que permitan caracterizar el efecto de la obra de descarga de la Central Las Lajas sobre el cauce del río Maipo.
- d) Formular un plan de monitoreo cuyo fundamento tome en cuenta la información generada en los análisis específicos antes descritos.

#### 1.2 ALCANCES DEL ESTUDIO

El estudio comprendió como primera fase, una exhaustiva recopilación y revisión de antecedentes básicos la cual fue completada con una definición inicial de las áreas de influencia del proyecto, apoyada en el análisis de los antecedentes disponibles y de visitas de reconocimiento de terreno.

Lo anterior permitió establecer el alcance de una campaña de levantamiento de información en terreno, con el objetivo de complementar la información existente, campaña que incluyó la ejecución de un catastro de obras existentes en los cauces la cual incorporó una actualización completa de la infraestructura existente en ellos hasta el presente año 2010; la obtención de granulometrías representativas de los sedimentos a ser transportados por las aguas; y el levantamiento de topobatimetrías para caracterizar la geometría hidráulica de los cauces en tramos representativos, para la cuantificación del transporte de sedimentos y de los fenómenos mecánico fluviales,.

La información recopilada y aquella obtenida durante la campaña para completarla, constituyó la base para desarrollar el conjunto de estudios básicos de ingeniería fluvial, orientados a cuantificar la componente sedimentológica del impacto ambiental del PHAM, los cuales incluyeron: análisis de la evolución morfológica de los cauces de los principales afluentes de la hoya alta del río Maipo, evaluando sus cambios de forma a lo largo de los últimos 50 años; análisis hidrológico para la adecuada caracterización del régimen de caudales, a diferentes escalas temporales y en distintos puntos de interés de los cauces existentes, en las áreas de influencia del PHAM; estudios hidráulico fluviales de tramos seleccionados como representativos de los cauces mencionados; estudios sedimentológicos y mecánico fluviales que incorporaron la cuantificación de las componentes de transporte de sedimento asociadas al arrastre de fondo, al transporte en suspensión del sedimento del lecho y al transporte en suspensión de washload; cuantificación de los procesos de degradación y de socavación local en sectores de los cauces con discontinuidades mecánico fluviales

La parte final del estudio se orientó a consolidar toda la información generada, en una cuantificación de los probables impactos del PHAM sobre el régimen sedimentológico del río Maipo, dentro del área de influencia, cuyo límite de aguas abajo lo constituye la barrera de la Bocatoma Independiente de Aguas Andinas y Toma del Canal San Carlos. Dicha cuantificación consideró además la operación de la Central Guayacán y la futura Central El Canelo, operando bajo escenarios sin y con PHAM.

En el cierre del área de influencia, se incorporó de manera explícita en la evaluación del transporte de sedimentos, la interacción de la descarga Las Lajas con las bocatomas del canal La Sirena e Independiente ya indicada.

Finalmente, con base en las evaluaciones y conclusiones obtenidas de los probables impactos del PHAM sobre el régimen sedimentológico del río Maipo, se formuló un programa de monitoreo que incluye la definición, justificación y medición de variables sedimentológicas relevantes para el seguimiento de los impactos como asimismo, un plan de mitigaciones, asociados a estas variables en caso de ocurrir efectos indeseados o no previstos.

## **1.2.1 Antecedentes básicos**

### *1.2.1.1 Revisión de estudios anteriores*

Se efectuó la recopilación y revisión de los estudios, proyectos, planes, publicaciones, estadísticas y cartografía disponible de manera de formarse una idea cabal de la información posible de utilizar para el estudio.

La revisión incluyó además el análisis crítico a los antecedentes básicos disponibles en el proyecto PHAM, considerando la caracterización de la información asociada a los estudios hidrológicos, topográficos, hidráulicos y mecánico fluviales que resultaran de relevancia para el análisis a realizar.

Esta actividad atendió a dos aspectos principales; el primero relativo al análisis crítico de los antecedentes existentes, con especial atención a la validez y limitaciones de la información recabada y/o procesada antes; y el segundo, ligado a la caracterización de los principales problemas detectados.

Estudio Sedimentológico Avanzado

### 1.2.1.2 *Revisión y recopilación de información básica disponible*

Se realizó una exhaustiva revisión de la información contenida en los estudios analizados, determinando cuáles de ellos presentaban un mayor grado de vigencia y por lo tanto cuáles eran de mayor utilidad para el desarrollo del estudio.

En particular se recabó la siguiente información necesaria para el desarrollo del estudio:

- Obras del PHAM y condiciones de operación
- Características de los cauces del río Maipo y afluentes de su hoya alta
- Curvas granulométricas integrales representativas de los sedimentos constitutivos del lecho en los distintos tramos de cauces de interés para el estudio
- Caracterización topobatimétrica de los cauces en la zona de aguas arriba y aguas abajo del sector de emplazamiento de las obras y los tramos que se verían afectados por las obras del PHAM.
- Catastro de obras del río Maipo y afluentes enfocado fundamentalmente a aquellos relacionados con el posible efecto del PHAM sobre el comportamiento de los cauces.

## 1.2.2 **Trabajos complementarios de terreno**

### 1.2.2.1 *Reconocimiento de terreno*

Se efectuó un recorrido de los cauces con el fin de recabar en terreno información detallada de sus principales características geomorfológicas, hidráulicas, mecánico-fluviales y sedimentológicas, además de los usos e interacción con obras construidas, dando especial importancia al recorrido de los sectores donde se materializarán las obras del PHAM.

### 1.2.2.2 *Catastro de obras*

Se realizó la complementación del catastro de obras disponible del estudio del río Maipo, realizado para la DOH del MOP en 2008, cuya información permitió contar con una completa caracterización de este curso desde el sector del puente El Ingenio hacia aguas abajo.

Este catastro fue actualizado en el presente estudio, particularmente en las zonas de emplazamiento y aguas abajo de las obras del PHAM, que pudieran verse afectadas por la operación de las obras.

### 1.2.2.3 *Granulometrías integrales de los sedimentos de los cauces*

Con base a lo obtenido de las visitas a terreno y a la recopilación y revisión de información existente, se definieron los muestreos (calicatas de al menos 1,5 m de profundidad) necesarios para caracterizar debidamente la granulometría de los sedimentos de los lechos fluviales.

#### 1.2.2.4 Topobatimetría de los cauces

Con el fin de disponer de suficientes antecedentes topobatimétricos, para la representación de algunos sectores específicos de los cauces naturales, se obtuvieron perfiles transversales de los cauces en los esteros Colina, La Engorda, Las Placas y El Morado aguas arriba y aguas abajo de la zona de emplazamiento de las bocatomas; en el río Volcán aguas arriba de su confluencia con el río Maipo; en el río Maipo aguas arriba y aguas abajo de la confluencia con el río Volcán y similarmente aguas arriba y aguas abajo de las confluencias de los ríos Yeso y Colorado; y en el río Maipo en el sector de aguas abajo de la descarga en Las Lajas hasta alrededor de 100 m aguas abajo de la Bocatoma Independiente; y en los ríos Colorado y Yeso aguas arriba y aguas abajo de la zona de emplazamiento de las obras del PHAM.

Los perfiles transversales se obtuvieron con un distanciamiento de 100 m y como máximo de alrededor de 200 m.

### 1.2.3 Estudios básicos de ingeniería fluvial

Los estudios básicos incluyeron un análisis semi-cuantitativo de la evolución histórica de los cauces, un estudio hidrológico de la cuenca, estudios hidráulico-fluviales y estudios mecánico-fluviales de distintos tramos de los cauces de interés donde se hicieron levantamientos topobatimétricos.

#### 1.2.3.1 Evolución histórica de los cauces.

Con la finalidad de contar con un elemento de definición inicial de la línea base hidráulico-mecánico-fluvial y sedimentológica del sistema fluvial a ser posiblemente influenciado por PHAM, se realizó un análisis tendiente a caracterizar la evolución histórica de los cauces de los ríos Colorado, Yeso y Maipo así como de los esteros Las Placas, El Morado, Colina y La Engorda, abarcando un periodo de 50 años.

Dicho análisis se llevó a cabo con base en la revisión y estudio de fotografías aéreas obtenidas en diferentes fechas, complementadas con las visitas de reconocimiento en terreno y antecedentes básicos de hidrología de crecidas disponibles en los estudios recientes, caracterizando el comportamiento pasado de los ríos, y a partir de ello se obtuvo una mejor visión respecto al estado actual que refleja la evolución histórica (en décadas) que estos cauces han presentado.

#### 1.2.3.2 Estudio hidrológico

Se efectuó la recopilación y revisión de la información hidrológica disponible para el desarrollo del estudio, analizando fundamentalmente su calidad, validez y representatividad respecto de las zonas de interés al estudio.

Con base en estos antecedentes se generaron series de caudales medios diarios para el periodo de 45 años comprendido entre enero-1965 a julio-2009, a partir del estudio hidrológico del PHAM (Hito 3), de modo de disponer de la información apropiada para el análisis del comportamiento sedimentológico de los cauces.

### 1.2.3.3 Estudios hidráulico fluviales

El análisis desarrollado contempló el cálculo de los ejes hidráulicos a lo largo del tramo de cada cauce de interés, para caudales medios diarios de probabilidades determinadas, obtenidos de la curva de duración generadas para este análisis, a partir de una serie de valores que comprendió el periodo de 45 años.

### 1.2.3.4 Estudios mecánico fluviales y sedimentológicos

Se realizó el cálculo del gasto sólido a lo largo de los tramos de interés en los cauces de los ríos Colorado, Yeso y Maipo, así como en los esteros Las Placas, El Morado, Colina y La Engorda para series de caudales de interés al estudio.

Se evaluó la componente asociada al arrastre de fondo, enfocado este análisis primeramente a establecer la magnitud de la capacidad de arrastre de los cauces en los tramos de interés, así como la importancia relativa que ellos presentan entre si respecto de los diferentes escenarios hidrológicos representativos de la situación actual.

Además se incluyó la estimación del gasto sólido en suspensión, de modo de contar con estimaciones del gasto sólido total para cada punto de interés de los cauces en estudio. Dentro de esta componente, se diferenció entre sedimento proveniente del lecho de aquel asociado al washload incorporado al agua como finos originados en la erosión de los suelos de la cuenca.

## 1.2.4 Análisis de la degradación aguas abajo de las obras de toma en afluentes

Se evaluó el comportamiento hidráulico-mecánico fluvial y sedimentológico de los ríos Colorado, Yeso y esteros Colina, Las Placas, El Morado y La Engorda en los tramos de aguas arriba y abajo de la zona de emplazamiento de las obras de toma del proyecto PHAM.

Se realizaron simulaciones matemáticas para diferentes escenarios hidrológicos orientadas a caracterizar y cuantificar los volúmenes de sedimentos asociados al régimen actual (sin presencia de las obras del PHAM), así como los eventuales cambios futuros en dicho volumen, generados como producto de la puesta en operación del PHAM, estableciendo de este modo las magnitudes posibles de degradación en los lechos.

## 1.2.5 Análisis de la degradación aguas abajo de la descarga Las Lajas

En forma similar a los tramos de aguas abajo de las obras de toma del PHAM se realizaron simulaciones matemáticas para determinar la degradación del lecho como producto de la mayor cantidad relativa de arrastre de los caudales pasantes, provocada por un aumento local en la capacidad de transporte sólido de fondo en el tramo de aguas abajo de la descarga concentrada de 65 m<sup>3</sup>/s al río Maipo en el sector Las Lajas.

El análisis estableció también, la longitud del río en que dicho fenómeno se extendería, tomando en cuenta la existencia de las obras de toma del canal La Sirena así como de la Toma Independiente de

Aguas Andinas y del Canal San Carlos, ubicadas aguas abajo de la descarga Las Lajas. La importancia de estas obras radica en que en ambas se extraen caudales del mismo orden de magnitud que el que será entregado a futuro por la descarga del proyecto PHAM, lo cual tendería a neutralizar el efecto sobre las alteraciones del régimen sedimentológico de la descarga en el tramo de aguas abajo del sector de Las Lajas.

### **1.2.6 Análisis de la socavación local al pie de obras de descarga**

Se determinó la profundidad que podría alcanzar la socavación local que experimentaría el lecho del río Maipo en la zona de la descarga del proyecto PHAM, como producto de la descarga concentrada de un caudal estimado en 65 m<sup>3</sup>/s.

Se utilizaron para el cálculo, las recomendaciones que se describen en el Manual de Carreteras del MOP y que son de aplicación usual en el país. Asimismo se evaluaron las posibilidades de progresión de dicho fenómeno debido a un efecto retrógrado de la socavación, pudiendo hacer que la fosa se extienda más allá de la zona puntual de la descarga.

La cuantificación y análisis de los fenómenos de socavación local, se hicieron también extensivos a las obras de descarga de las obras de toma en los afluentes del río Volcán y en la bocatoma Yeso.

### **1.2.7 Programa de monitoreo y medidas de mitigación**

#### *1.2.7.1 Programa de monitoreo*

Sobre la base de los resultados de la caracterización y cuantificación de los efectos mecánico fluviales y sedimentológicos, que podrían producirse más generalizadamente en los cauces y/o en el entorno de las obras del PHAM, se elaboró un programa de monitoreo cuyo objetivo fundamental es realizar un seguimiento de los cambios que podrían experimentar las tasas de transporte de sedimentos y los fenómenos de socavación y degradación, tanto en magnitud como en extensión espacial, en distintos puntos de los cauces.

Dicho programa de monitoreo deberá permitir, la detección oportuna de los efectos mecánico fluviales y sedimentológicos, determinados teóricamente en el presente estudio, en particular la magnitud y evolución de éstos, asociados a la operación del proyecto PHAM.

#### *1.2.7.2 Medidas de mitigación*

Con base en los resultados que se vayan obteniendo del programa de monitoreo, se podrá implementar oportunamente medidas paliativas o correctivas de efectos adversos o efectos negativos imprevistos, de naturaleza mecánico fluvial y sedimentológica, detectados y asociados a la operación de las obras del PHAM. El presente estudio propone algunas de estas medidas.

## 2. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO Y CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA FLUVIAL ALTO MAIPO

### 2.1 PROYECTO HIDROELÉCTRICO ALTO MAIPO

El PHAM consiste en un complejo hidroeléctrico compuesto por dos centrales de pasada en serie hidráulica, las llamadas centrales Alfalfal II y Las Lajas las cuales, generan en conjunto una potencia máxima de 531 MW que será aportada al Sistema Interconectado Central (SIC). Se emplazará al sureste de la ciudad de Santiago, en la comuna de San José de Maipo, Provincia Cordillera, Región Metropolitana, específicamente en la cuenca alta del Río Maipo.

Las centrales proyectadas, se localizarán en la cuenca del río Colorado, aguas abajo de la actual Central Hidroeléctrica Alfalfal I. La Central Alfalfal II aprovechará principalmente las aguas provenientes de la zona alta del río Volcán y del río Yeso, mientras que la Central Las Lajas aprovechará las aguas que se generan en la Central Alfalfal II y en la Central existente Alfalfal I, más aquellas aguas provenientes de las captaciones en la hoya intermedia del río Colorado.

El proyecto contempla la construcción de un total de 70 km de túneles de los cuales aproximadamente 60 km corresponden a los túneles hidráulicos de ambas centrales y el resto lo constituyen las ventanas (túneles) de acceso a los túneles principales y los túneles de acceso a las cavernas de máquinas.

### 2.2 PUNTOS DE CAPTACIÓN Y DESCARGA

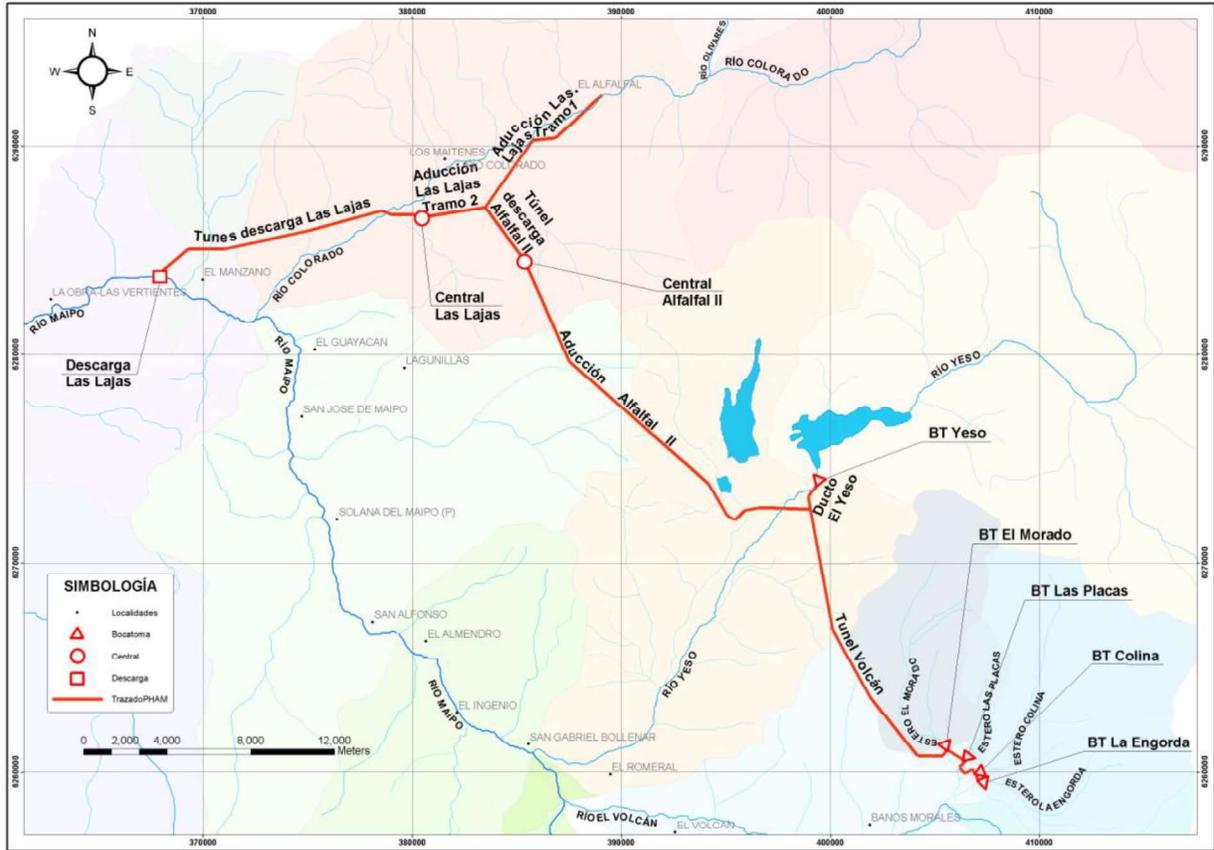
Los puntos de captación de caudales determinan las zonas de influencia directa e indirecta del estudio. El cambio de régimen de caudal por la extracción en bocatomas, puede tener efecto en el régimen hidráulico-mecánico fluvial y sedimentológico, de la zona próxima aguas abajo de la captación. Las captaciones nuevas que abastecerán la Central Alfalfal II y las del río Colorado de Central Las Lajas son:

- Bocatoma La Engorda
- Bocatoma Colina
- Bocatoma Las Placas
- Bocatoma El Morado
- Bocatoma El Yeso
- Maitenes (ya construida)
- Alfalfal (ya construida)
- Aucayes (ya construida)

La restitución final de los caudales generados por la Central Las Lajas estará ubicada en el río Maipo, aguas abajo de la confluencia con el estero El Manzano, en el sector del mismo nombre

La ubicación de estas obras se pueden observar en la Fig.2.1 y algunas características de estas captaciones se resumen en la Tabla 2.1

**Fig. 2.1 Esquema simplificado del PHAM y su relación con la cuenca del Alto Maipo**



**Tabla 2.1 Características de las obras de captación**

Bocatoma	Río	Tipo de Captación	Caudal Máximo (m <sup>3</sup> /s)	Caudal Ecológico (m <sup>3</sup> /s)
La Engorda	Estero La Engorda	Bocatoma lateral	2.1	0.20
Colina	Estero Colina	Bocatoma lateral	6.0	0.37
Las Placas	Estero Las Placas	Bocatoma de alta montaña	1.0	0.14
El Morado	Estero El Morado	Bocatoma lateral	3.7	0.24
El Yeso	Yeso	Bocatoma lateral	15.0	0.82
Maitenes	Colorado	Conexión a Canal 1 Maitenes existente	10.0	2.51
Alfalfal	Colorado	Conexión a Canal de descarga existente	30.0	
Aucayes	Estero Aucayes	Bocatoma lateral	2.0	-

### 2.3 SECTORIZACIÓN INICIAL DE AREAS DE INFLUENCIA SEDIMENTOLÓGICA

Como parte de las primeras etapas de este estudio, se definieron tentativamente las áreas de influencia del Proyecto Hidroeléctrico Alto Maipo (PHAM), basadas en el análisis de los antecedentes disponibles, lo cual permitió establecer el alcance de una campaña de levantamiento de información en terreno, cuyo objetivo fue complementar la información existente, en particular, la información topobatemétrica de éstos y la información granulométrica de los sedimentos de los lechos.

Estudio Sedimentológico Avanzado

A pesar de que el proyecto se desarrolla en una extensa área geográfica, la mayoría de sus obras se localizan a gran profundidad (en promedio más de 800 m bajo la superficie), lo que hace que las áreas de intervención superficial directa se circunscriban sólo a las zonas que se encuentran en las inmediaciones de las distintas obras de captación y de la obra de descarga de la Central Las Lajas. Consecuentemente, en lo que se refiere a transporte de sedimentos e influencia sobre el régimen hidráulico-mecánico fluvial y sedimentológico, las sub-áreas de influencia directa son:

- Sector 1: comprende la cuenca alta del río Volcán, específicamente los esteros Colina, La Engorda, Las Placas y El Morado en el entorno de cada obra de captación y un tramo acotado aguas abajo de éstas
- Sector 2: corresponde al área del río Yeso, en el entorno de la captación y un tramo de aguas abajo de ésta.
- Sector 3: concierne al río Colorado, en el entorno de la captación en bocatoma Maitenes y un tramo de aguas abajo de ésta, Sector 4: incluye el río Maipo, en el sector de la descarga en Las Lajas, hasta la bocatoma independiente

En lo referente a transporte de sedimentos, adicionalmente puede definirse una zona de influencia indirecta, que comprende la red fluvial sobre la cual se dispondrán las obras de captación y descarga antes mencionadas. Dicha zona comprende las siguientes zonas:

- Esteros Colina, La Engorda, Las Placas y El Morado entre las zonas de emplazamiento de las respectivas obras de toma y su confluencia con el río Volcán.
- Río Volcán entre la confluencia con esteros anteriores y la confluencia con el río Maipo.
- Río Yeso entre la zona de emplazamiento de la obra de captación y su desembocadura en el río Maipo.
- Río Maipo en las confluencias con los ríos Volcán, Yeso y Colorado.

## 2.4 ANÁLISIS DE LA ESCALA DE TIEMPO Y EVOLUCIÓN MORFOLÓGICA DE LOS CAUCES

Como primera etapa de caracterización del sistema fluvial alto Maipo se realizó un análisis para caracterizar la evolución morfológica de los cauces de los ríos de esta cuenca, sobre la base de la revisión y estudio de fotografías aéreas obtenidas en diferentes fechas, abarcando un horizonte aproximado de 50 años comprendido entre los años 1965 y 2009, comprendiendo los siguientes cauces y sectores:

- Bocatomas proyectadas PHAM: La Engorda, Colina, Las Placas y El Morado
- Confluencia del río Maipo con río Volcán
- Río Yeso, sector de la bocatoma proyectada PHAM
- Confluencia del río Maipo con el río Yeso
- Río Colorado, en el sector de la bocatoma Maitenes
- Confluencia río Maipo con río Colorado
- Río Maipo en el sector descarga Las Lajas

Del análisis de los antecedentes históricos de caudales, pudo constatar que ninguno de los eventos hidrológicos acaecidos en este período, provocó inestabilidad de los cauces.

Sin embargo, se detectaron cambios en la forma de los cauces de los ríos Yeso y Colorado atribuibles a otro tipo de causas. La modificación del cauce en el río Yeso tuvo que ver con la construcción del embalse El Yeso, en tanto la del río Colorado dice relación con el aluvión del 29 de noviembre del año 1987, fenómeno de alta energía que modificó drásticamente el cauce en una extensión significativa.

## 2.5 PUNTOS DE CONTROL REPRESENTATIVOS DEL TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

Basado en las características del proyecto y de la red de drenaje del sistema alto Maipo, se seleccionaron los 17 puntos de control individualizados a continuación que permiten caracterizar sedimentológicamente los cauces principales en lugares específicos de los afluentes cordilleranos del río Maipo.

### A. Sistema Volcán

- A1: Bocatoma estero El Morado
- A2: Bocatoma estero Las Placas
- A3: Estero El Morado aguas arriba junta estero Colina
- A4: Bocatoma estero Colina
- A5: Estero El Morado aguas abajo junta estero Colina
- A6: Bocatoma estero La Engorda
- A7: Río Volcán aguas arriba junta río Maipo

### B. Sistema Yeso

- B1: Bocatoma río Yeso
- B2: Río Yeso aguas arriba junta río Maipo

### C. Sistema Colorado

- C1: Río Colorado aguas abajo descarga Alfalfal I
- C2: Río Colorado aguas arriba junta río Maipo

### D. Sistema Maipo

- D1: Río Maipo aguas arriba junta Río Volcán
- D2: Río Maipo aguas arriba junta Río Yeso
- D3: Río Maipo aguas abajo junta Río Yeso
- D4: Río Maipo aguas arriba junta Río Colorado
- D5: Río Maipo aguas arriba descarga Las Lajas
- D6: Río Maipo aguas abajo descarga Las Lajas

### 3. CUANTIFICACIÓN DE LOS EFECTOS DEL PHAM SOBRE EL TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

#### 3.1 BASES CONCEPTUALES PARA LA MODELACIÓN DEL TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

##### 3.1.1 Componentes del transporte sólido y su cuantificación

La caracterización del régimen sedimentológico de la cuenca alta del río Maipo dentro del área de influencia del PHAM se basó en el cálculo de la tasa de transporte sólido (gasto sólido) en los 17 puntos de control antes indicados, para las series de caudales medios diarios de 45 años de extensión empleadas en el proyecto, que comprenden los escenarios actual y futuro (una vez en operación el PHAM), asociada a la movilización de los sólidos correspondientes a partículas:

- (1) provenientes del fondo, transportadas por la corriente en contacto permanente con el lecho (partículas continuamente rodando, resbalando o dando pequeños saltos, impulsadas por la turbulencia de la corriente), denominada gasto sólido de fondo;
- (2) originadas en el lecho y transportadas en suspensión por la turbulencia del flujo (básicamente arenas), denominada gasto sólido en suspensión; y
- (3) finos, bajo la malla 200 (limos y arcillas), cuyo origen se vincula a los fenómenos de erosión laminar de los suelos de la cuenca o washload por escorrentía de aguas lluvia o de derretimiento de nieves o hielos.

La componente (1) se denomina transporte sólido efectivo de fondo y se distingue de la capacidad de arrastre de un cauce, para una determinada condición hidrológica, en cuanto la primera corresponde a la tasa real a la que la corriente efectivamente moviliza las partículas de sedimento del lecho, mientras la segunda concierne al potencial de movilización del flujo para un cauce de características determinadas, si existiera todo el material disponible y éste fuera íntegramente transportado.

Teniendo en consideración lo anterior, en el presente estudio se optó por realizar una caracterización del transporte de fondo que incluyera tanto la capacidad de arrastre del fondo de los cauces, como el transporte efectivo por el fondo.

Respecto de las componentes del sedimento en suspensión, una asociada a los sedimentos removidos desde el lecho (arenas) y otra producto de la erosión de los suelos de la cuenca (washload o turbiedad), si bien ellas coinciden en cuanto al mecanismo de transporte (suspensión por turbulencia de la corriente), entre ambas hay una diferencia esencial que es necesario reconocer a la hora de cuantificarlas. Se trata de su origen y por lo mismo, del mecanismo que las genera. En efecto, en el caso del sedimento en suspensión removido del lecho, éste se incorpora desde los horizontes superficiales del cauce al seno de la corriente por un proceso de dispersión turbulenta.

Por otro lado, el sedimento en suspensión tipo washload, está constituido por partículas bajo la malla 200 (0,074 mm) que corresponden a limos y arcillas que remueven las láminas de agua que bajan por los suelos de la cuenca, como parte de la escorrentía que produce una lluvia o el derretimiento de las nieves o hielo.

### 3.1.2 Cálculo del transporte sólido potencial de fondo o capacidad de arrastre

El comportamiento hidráulico fluvial de los cauces estudiados se caracterizó primeramente a través del transporte potencial de sólidos de fondo o capacidad de arrastre, empleando relaciones empíricas definidas en el Manual de Carreteras del MOP que relacionan el caudal con la tasa de arrastre de sedimentos por el cauce, en función de las características granulométricas de los sedimentos constitutivos de su lecho y de su pendiente. Las relaciones permiten estimar valores en un rango de valores mínimos y máximos esperables los cuales reflejan el potencial de arrastre de fondo del cauce, relacionado con el caudal que circula por él y con sus características geométricas y granulométricas.

La caracterización se realizó igualmente en forma estadística, mediante la generación de curvas de duración de los gastos sólidos medios diarios potenciales de fondo en función de la probabilidad de excedencia del caudal, tanto para los escenarios hidrológicos sin PHAM como con PHAM.

### 3.1.3 Cálculo del transporte sólido efectivo de fondo (gravas y ripios)

El cálculo de la tasa de transporte sólido efectivo de fondo, se realizó a partir de información de desripados diarios que abarcan un periodo cercano a 7 años, las cuales permiten calcular tasas diarias de arrastre de fondo efectivo y sus respectivos caudales. Esta información proviene de 4 bocatomas operadas por AES Gener, que se encuentran localizadas, dos en los ríos Olivares y Colorado (Central Alfalfal) y otras dos, en los ríos Volcán y Maipo (Central Queltehues).

Con esta información se desarrollaron funciones empíricas de arrastre efectivo, las cuales fueron posteriormente aplicadas a los 17 puntos de control de interés del estudio, para generar series de gastos sólidos medios diarios efectivos de fondo y sintetizar con ellas las curvas de duración para los distintos los puntos de control del estudio

Estas series de gastos sólidos diarios efectivos de fondo y las correspondientes curvas de duración, calculadas tanto para la condición sin PHAM como con PHAM, permitieron cuantificar el efecto del proyecto sobre el régimen de gastos sólidos efectivos de fondo de los cauces de la cuenca dentro del área de influencia del proyecto. Complementando estos cálculos, el transporte efectivo de fondo se comparó con las capacidades de arrastre de los cauces con el fin de analizar la relación entre ambas variables.

### 3.1.4 Cálculo del transporte sólido en suspensión (arenas)

La determinación de la tasa de transporte sólido en suspensión, se realizó empleando el modelo clásico basado en la teoría de dispersión turbulenta de partículas sólidas el cual permite describir la variación vertical en la columna de agua, de la concentración del sedimento removido del lecho.

El modelo se aplicó al transporte de arenas medias y finas del lecho (bajo 2 mm), principalmente, ya que las fracciones gruesas son arrastradas por el fondo (transporte sólido de fondo) en tanto los finos (limos y arcillas bajo 0,074 mm) se incorporan al agua como una suspensión, proveniente de la erosión laminar de los suelos de la cuenca y por tanto, son sedimentos que no provienen del lecho.

Debido a la influencia mutua que se ejercen entre sí la corriente y su lecho, existe una interrelación entre el transporte de fondo y el transporte en suspensión del lecho, razón por la cual el modelo requiere como input información del modelo de transporte sólido efectivo de fondo.

A través del modelo se calculó el gasto sólido en suspensión medio diario, removido del lecho empleando las series de caudales medios diarios y curvas de duración procediéndose a generar a partir de estos cálculos, las series diarias de gastos sólidos en suspensión del lecho y a sintetizar con ellas, las curvas de duración para los distintos los puntos de control del estudio tanto para la condición sin PHAM como con PHAM.

### **3.1.5 Cálculo del transporte sólido de washload (finos y turbiedad del agua)**

El transporte sólido de washload se vincula a la componente de sólidos más fina asociada a los limos y arcillas o partículas bajo la malla 200 que transportan en suspensión las aguas (turbiedad del agua). Estos sólidos, corresponden a sedimentos erosionados de los suelos de la cuenca por un fenómeno de erosión laminar de los suelos de la cuenca que provocan las aguas que escurren por las laderas antes de canalizarse e integrarse a la red de drenaje de una cuenca.

La estimación del gasto sólido de washload, se realizó en base a la información sedimentométrica de muestreos integrados y puntuales, correspondientes a la información fluviométrica de cuatro estaciones de la DGA: Colorado en Desembocadura, Maipo en El Manzano, Maipo en San Alfonso y Volcán en Quelitehues. Esta estimación se efectuó para el periodo común de la información de muestreos integrados y muestreos puntuales correspondiente, principalmente a los años 1985 y 2005, la cual se extiende, en el caso de la estación Maipo en El Manzano, hasta el año 2008, y de la estación Colorado en Desembocadura, hasta el año 2007.

Con la información de concentraciones de washload medida, se procedió a calcular la concentración y el correspondiente gasto sólido de washload diario generando series de gastos sólidos medios diarios de washload con las cuales se sintetizaron las correspondientes curvas de duración para cada punto de control del estudio, para los escenarios sin PHAM y con PHAM.

## **3.2 EFECTO DEL PHAM SOBRE EL TRANSPORTE SÓLIDO EFECTIVO DE FONDO**

### **3.2.1 Valores representativos del efecto del PHAM sobre los gastos sólidos efectivos de fondo**

A partir de las series medias diarias del gasto sólido efectivo de fondo se desarrollaron curvas de duración que cubren todo el espectro de caudales y de gastos sólidos, desde aquéllas asociadas a los grandes caudales (crecidas de baja recurrencia) hasta las vinculadas a los bajos caudales (de estiaje). Los estadígrafos derivados de estas curvas, permitieron caracterizar el transporte efectivo de fondo por medio de valores recurrentes (probabilidad de excedencia 90 %), valores esperados y valores medios del rango recurrente-esperado.

Los valores esperados representan la magnitud promedio de las series de valores diarios analizados, del periodo enero 1965 a julio de 2009.

Estudio Sedimentológico Avanzado

La Tabla 3.1 resume los valores obtenidos y las reducciones probables del transporte efectivo de fondo para los distintos puntos de control del río Maipo y sus afluentes de la cuenca alta.

**Tabla 3.1 Transporte efectivo de fondo y reducciones probables por efecto del PHAM**

Puntos de Control	Transporte efectivo de fondo (mill ton/año)						Reducciones probables en el transporte efectivo de fondo (mill ton/año)			
	Sin PHAM			Con PHAM			RECURRENTE	ESPERADO	MEDIO RANGO	PORCENTAJE MEDIO RANGO
	RECURRENTE	ESPERADO	MEDIO RANGO	RECURRENTE	ESPERADO	MEDIO RANGO				
<b>Sistema Volcán</b>										
A1	0,012	0,046	0,029	0,005	0,010	0,008	0,007	0,036	0,021	72%
A2	0,002	0,015	0,009	0,002	0,004	0,003	0	0,011	0,006	67%
A3	0,02	0,059	0,04	0,009	0,015	0,012	0,011	0,044	0,028	70%
A4	0,023	0,078	0,051	0,008	0,024	0,016	0,015	0,054	0,035	69%
A5	0,045	0,12	0,083	0,026	0,044	0,035	0,019	0,076	0,048	58%
A6	0,013	0,032	0,023	0,01	0,012	0,011	0,003	0,020	0,012	52%
A7	0,014	0,153	0,084	0,014	0,094	0,054	0	0,059	0,03	36%
<b>Sistema Yeso</b>										
B1	0,032	0,157	0,095	0,008	0,018	0,013	0,024	0,139	0,082	86%
B2	0,1	0,21	0,155	0,05	0,095	0,073	0,050	0,115	0,082	53%
<b>Sistema Colorado</b>										
C1	0,13	0,33	0,23	0,07	0,14	0,105	0,06	0,19	0,125	54%
C2	0,24	0,49	0,365	0,07	0,28	0,175	0,170	0,21	0,19	52%
<b>Sistema Maipo</b>										
D1	0,3	0,7	0,5	0,3	0,7	0,5	0,00	0,00	0,00	0%
D2	0,3	0,8	0,55	0,3	0,7	0,5	0,00	0,10	0,05	9%
D3	0,4	1	0,7	0,3	0,8	0,55	0,10	0,20	0,15	21%
D4	0,4	1,1	0,75	0,4	1	0,7	0,00	0,10	0,05	7%
D5	0,6	1,4	1	0,4	1,1	0,75	0,20	0,30	0,25	25%
D6	0,6	1,4	1	0,6	1,4	1	0,00	0,00	0,00	0%

### 3.2.2 Reducciones de los gastos sólidos efectivos de fondo

#### 3.2.2.1 Reducciones características

Las reducciones por efecto del PHAM del transporte efectivo de fondo del valor medio del rango de valores esperados y recurrentes, obtenidas para los distintos puntos de control desde A1 a A7 en el sistema Volcán, B1 y B2 en el sistema Yeso, C1 y C2 en el sistema Colorado, y D1 a D6 en el sistema Maipo, pueden resumirse en los rangos que se indican a continuación.

#### 3.2.2.2 Reducciones en afluentes principales en desembocaduras

- Río Volcán: 0 - 0,06 mill ton/año en río Volcán en desembocadura
- Río Yeso: 0,05 - 0,12 mill ton/año en el río Yeso en desembocadura
- Río Colorado: 0,17 - 0,21 mill ton/año en el río Colorado en desembocadura

#### 3.2.2.3 Reducciones en el río Maipo aguas arriba de Las Lajas

- Aguas arriba de la confluencia con el río Volcán: de 0 mill ton/año
- Aguas arriba de la confluencia con el río Yeso, de 0 – 0,1 mill ton/año

- Aguas abajo de la confluencia con el río Yeso, de 0,1 mill ton/año
- Aguas arriba de la confluencia con el río Colorado, de 0,1 mill ton/año
- Aguas arriba de Las Lajas, se producirían reducciones máximas en el gasto sólido efectivo de fondo, de 0,2 – 0,3 mill ton/año

#### 3.2.2.4 Reducciones en el río Maipo aguas abajo de Las Lajas

Hacia aguas abajo de la descarga Las Lajas, el gasto sólido efectivo de fondo del río Maipo no cambia en promedio con la entrada en operación del PHAM en razón de que los caudales y condiciones hidráulicas que determinan el transporte de sedimentos del lecho, son los mismos para la situación actual sin PHAM y la situación futura con PHAM.

Lo anterior supone que la alimentación de sedimentos hasta este punto es igual o mayor que el gasto sólido efectivo asociado al caudal del respectivo día, lo cual podría ser un proceso discontinuo a lo largo del año, dado que el aporte de sedimentos de aguas arriba superará ese umbral durante los periodos de mayores caudales vinculados con crecidas de deshielo o pluviales. Durante los intervalos que el aporte quede bajo el umbral señalado, se iniciará un lento proceso de degradación que proveerá temporalmente el material del lecho necesario para satisfacer la capacidad de transporte del flujo. Cuando se restituyan los aportes de aguas arriba en las magnitudes requeridas, por sobre el umbral mencionado, este proceso terminará dando paso a un proceso temporal de sedimentación (condicionado principalmente por la influencia de la barrera de la bocatoma del Canal La Sirena), repitiéndose esta alternancia con distintas duraciones según la hidrología del año.

### 3.3 EFECTO DEL PHAM SOBRE LA CAPACIDAD DE ARRASTRE

#### 3.3.1 Valores representativos del efecto del PHAM sobre las capacidades de arrastre

Las curvas de duración determinadas para caracterizar esta variable, cubren todo el espectro de capacidades de arrastre de fondo, desde aquéllas asociadas a los grandes caudales y crecidas de baja recurrencia hasta las vinculadas a los bajos caudales de estiaje.

Estas curvas y los estadígrafos que de ellas se derivan, permiten determinar las capacidades de arrastre características de los cauces en los sectores estudiados.

De manera similar al transporte efectivo de fondo, se efectuó la caracterización de la capacidad de arrastre en conjunto con las reducciones de las 3 variables características de la capacidad de arrastre (valor recurrente, valor esperado y valor medio del rango), por efecto del PHAM, obtenidas para los distintos puntos de control del sistema Volcán (A1 a A7), del sistema Yeso (B1 y B2), del sistema Colorado (C1 y C2) y del sistema Maipo (D1 a D6).

#### 3.3.2 Efecto del PHAM sobre los gastos sólidos asociados a la capacidad de arrastre

Los resultados obtenidos indican que para el escenario con PHAM, en los esteros El Morado, Las Placas, Colina y la Engorda, en los tramos donde se emplazarán las bocatomas del PHAM, se producen

reducciones de la capacidad de arrastre que en términos de valores esperados se encuentran entre 0,1 a 0,2 millones ton/año. Para los valores recurrentes de las reducciones, estos límites decrecen a 1/6 a 1/10 aproximadamente de estos valores, con lo cual los valores medios del rango recurrente-valor esperado fluctúan entre 0,03 y 0,1 millones ton/año.

En el río Yeso en la bocatoma PHAM, la reducción del valor esperado de la capacidad de arrastre es del orden de 0,2 millones ton/año para el valor esperado, decreciendo a 1/10 de esta tasa para el valor recurrente con lo cual el valor medio del rango recurrente-valor esperado es del orden de 0,1 millones ton/año.

En el río Colorado en la descarga de la Central Alfalfal I, la reducción generada por el PHAM en el valor esperado de la capacidad de arrastre es del orden de 1 millón ton/año, decreciendo a aproximadamente a 1/6 de esta tasa para el valor recurrente, lo cual conduce a un valor medio del rango recurrente-valor esperado del orden de 0,5 millones ton/año.

Para los tramos de desembocadura de los principales afluentes al río Maipo, los órdenes de magnitud de las reducciones en los valores esperados de las capacidades de arrastre son, para el río Volcán, 0,2 millones ton/año, y para el río Yeso y río Colorado, del orden de 1 millón ton/año. Estas cifras se traducen en valores medios del rango recurrente-valor medio inferiores 0,09 mill ton /año para el primero y de 0,5 a 0,7 mill ton /año para los segundos<sup>1</sup>.

En el río Maipo, las reducciones en los valores esperados de las capacidades de arrastre, son del orden de 0,1 a 1,8 millones ton/año, para los valores esperados, salvo aguas abajo de la descarga Las Lajas, donde no se produce reducción. En términos de valores recurrentes, el intervalo indicado arriba es 0,05 a 0,5 millones ton/año mientras que las reducciones expresadas como valores medios de del rango recurrente-valor esperado son cifras intermedias de 0,5 a 1,1 millones ton/año para todos los tramos aguas arriba de la descarga.

En síntesis, puede afirmarse que los efectos relativos mayores del PHAM, con reducciones más significativas en el valor esperado de la capacidad de arrastre, se aprecian en los esteros El Morado, Las Placas, Colina y la Engorda (70-80% de reducción), y en el río Yeso (90% de reducción), aguas abajo de las secciones donde se emplazarán las bocatomas del PHAM.

Sin embargo, estos efectos relativos tienden a atenuarse hacia aguas abajo, salvo en el caso del río Colorado para el cual su reducción en la capacidad sigue siendo significativa hasta la desembocadura en el río Maipo (60%). En caso del río Volcán en desembocadura la reducción bordea el 50%.

A lo largo del río Maipo, la reducción en la capacidad de arrastre es de 10 a 20%, a excepción del tramo aguas abajo de la desembocadura del río Colorado que aumenta a 40% para terminar sin reducciones aguas abajo de Las Lajas donde se restituye todo el caudal empleado por las centrales hidroeléctricas del PHAM.

---

<sup>1</sup> En el caso del río Volcán, se produce un aumento en el valor recurrente cuando entre en operación el PHAM debido a las exigencias que deberán cumplirse de dejar pasar un caudal ecológico aguas abajo de la Bocatoma Maipo de la Central Queltehue

### 3.4 EFECTO DEL PHAM SOBRE RELACIÓN TRANSPORTE EFECTIVO-CAPACIDAD DE ARRASTRE

Los efectos del PHAM sobre el régimen sedimentológico de los cauces, deben ser evaluados través de las tasas de transporte efectivas y de la capacidad de arrastre ya que las primeras reflejan el comportamiento sedimentológico real del sistema fluvial, en tanto la segunda caracteriza un potencial que solo se alcanza eventual y esporádicamente.

En la Tabla 3.2 se resumen los resultados de las reducciones en las tasa de transporte efectivo de fondo y de las capacidades de arrastre, así como su razón.

En resumen, los resultados obtenidos muestran que la razón entre las reducciones en el transporte efectivo y en la capacidad de arrastre no es constante entre el mismo tipo de variable característica (valor recurrente, valor esperado o media del rango) ni entre puntos de control.

No obstante lo señalado, dominan ampliamente los casos en que la razón está comprendida entre el 0 y 40% aproximadamente (valores esperados y medios del rango), es decir, en que el transporte efectivo es una fracción menor de la capacidad de arrastre. Son pocos los casos en que esta fracción supera el 60%, como por ejemplo en el sistema Volcán, el punto de control A1 (estero El Morado en Bocatoma PHAM), en el sistema Yeso, el punto B1 (Río Yeso en Bocatoma PHAM) y otros 3 casos más cuando se analiza solo el valor recurrente.

**Tabla 3.2 Reducciones en el transporte efectivo y en la capacidad de arrastre por efecto del PHAM**

Puntos de Control	Reducciones por efecto del PHAM (mill ton /año)								
	Transporte efectivo de fondo			Capacidad de arrastre			Transporte efectivo/Capacidad arrastre (%)		
	RECURRENTE	VALOR ESPERADO	MEDIO RANGO	RECURRENTE	VALOR ESPERADO	MEDIO RANGO	RECURRENTE	VALOR ESPERADO	MEDIO RANGO
<b>Sistema Volcán</b>									
A1	0,007	0,036	0,022	0,008	0,05	0,029	88%	72%	76%
A2	0	0,011	0,006	0	0,189	0,094	-	6%	6%
A3	0,011	0,044	0,028	0,011	0,114	0,063	100%	39%	44%
A4	0,015	0,054	0,035	0,015	0,156	0,086	100%	35%	41%
A5	0,019	0,076	0,048	0,078	0,666	0,372	24%	11%	13%
A6	0,003	0,02	0,012	0,019	0,169	0,094	16%	12%	13%
A7	0	0,059	0,03	-0,011	0,191	0,09	0%	31%	33%
<b>Sistema Yeso</b>									
B1	0,024	0,139	0,082	0,024	0,224	0,124	100%	62%	66%
B2	0,05	0,115	0,083	0,256	1,111	0,683	20%	0%	12%
<b>Sistema Colorado</b>									
C1	0,06	0,19	0,125	0,163	0,983	0,573	37%	19%	22%
C2	0,17	0,21	0,19	0,229	0,812	0,521	74%	26%	36%
<b>Sistema Maipo</b>									
D1	0	0	0	0,052	0,053	0,052	-	-	-
D2	0	0,1	0,05	0,144	0,816	0,48	-	12%	10%
D3	0,1	0,2	0,15	0,425	1,137	0,781	24%	0%	19%
D4	0	0,1	0,05	0,18	0,515	0,348	-	19%	14%
D5	0,2	0,3	0,25	0,455	1,801	1,128	44%	0%	0%
D6	0	0	0	0	0	0	-	-	-

Lo anteriormente explicado, se basa en el hecho que la capacidad de arrastre es el potencial de movilización que tiene un cauce cuyas secciones presentan dimensiones, formas y sedimentos particulares, y cuya estimación se basa en fórmulas empíricas aplicadas bajo condiciones que no necesariamente se cumplen a cabalidad en los cauces que se están estudiando, por lo que deben entenderse como aproximaciones. En tanto, el transporte efectivo es la tasa real a la que conduce sedimentos dicho cauce, condicionado por la disponibilidad y movilidad de material del lecho que en este tipo de cauces está determinado en medida importante por los fenómenos de acorazamiento y ocasionalmente por los procesos erosivos de sus lechos y riberas durante el paso de crecidas de cierta importancia. En tal sentido, la estimación del gasto sólido efectivo de fondo realizada en el presente estudio, constituye un aporte en cuanto a la cuantificación de las tasas reales de transporte de fondo del sistema fluvial Maipo.

### 3.5 EFECTO DEL PHAM SOBRE EL TRANSPORTE SÓLIDO EN SUSPENSIÓN DEL LECHO

#### 3.5.1 Valores representativos del efecto del PHAM sobre los gastos sólidos en suspensión

Se desarrolló un modelo de transporte de sedimento en suspensión removido del lecho, el que fue aplicado a todos los puntos de control para los escenarios Sin PHAM y Con PHAM, generando series de gastos sólidos en suspensión medios diarios en cada uno de los puntos de control con sus correspondientes curvas de duración de fondo.

Los resultados se tradujeron en valores característicos, asociados a diversas probabilidades de excedencia y al valor esperado, obtenidos para los escenarios Sin y Con PHAM, además de la variación del gasto sólido entre ambos escenarios.

Los resultados, además de permitir apreciar los órdenes de magnitud del gasto sólido en suspensión de las arenas removidas del lecho, en distintos puntos de la cuenca, muestran que la variación porcentual de gasto sólido efectivo en suspensión entre los escenarios Sin PHAM y Con PHAM es mayor en las partes altas de la cuenca.

#### 3.5.2 Efecto del PHAM sobre los gastos sólidos en suspensión

##### 3.5.2.1 Reducciones características

De manera similar al caso del gasto sólido de fondo efectivo, el análisis de esta información permite apreciar que debido al sesgo que presenta la distribución de gastos sólidos en suspensión, la reducción en su valor esperado corresponde a probabilidades de excedencia del orden de 30 a 40%, revelando así el mayor peso que tienen los caudales más altos en las series, sobre las tasas de transporte de sólido en suspensión.

En razón de lo anterior, para reflejar con mayor realismo el impacto a largo plazo del PHAM sobre el régimen de transporte de arenas provenientes del lecho, a continuación se presentan las reducciones en el valor medio del rango de valores esperados a valores recurrentes.

### 3.5.2.2 Reducciones en afluentes principales en desembocaduras

- Río Volcán: 0 - 0,06 mill ton/año en río Volcán en desembocadura
- Río Yeso: 0,01 - 0,06 mill ton/año
- Río Colorado: 0,11 - 0,34 mill ton/año

### 3.5.2.3 Reducciones en el río Maipo aguas arriba de Las Lajas

- Aguas arriba de la confluencia con el río Volcán: 0 mill ton/año
- Aguas arriba de la confluencia con el río Yeso: 0,1 – 0,5 mill ton/año
- Aguas abajo de la confluencia con el río Yeso: 0,2 – 0,9 mill ton/año
- Aguas arriba de la confluencia con el río Colorado: 0,3 - 0,9 mill ton/año
- Aguas arriba de Las Lajas, se producirían reducciones máximas de 0,4 – 1,5 mill ton/año

### 3.5.2.4 Reducciones en el río Maipo aguas abajo de Las Lajas

Hacia aguas abajo de Las Lajas, gasto sólido en suspensión del río Maipo, no cambia con la entrada en operación del PHAM en razón que los caudales y condiciones hidráulicas que determinan el transporte de sedimentos del lecho, son los mismos para la situación actual sin PHAM y la situación futura con PHAM.

## 3.6 EFECTO DEL PHAM SOBRE EL TRANSPORTE TOTAL DE SÓLIDOS DEL LECHO

Los resultados presentados en los puntos precedentes reflejan el comportamiento de cada una de las componentes de transporte sólido por separado, para los escenarios sin y con PHAM.

Desde un punto de vista mecánico fluvial, dado que los cauces son moldeados por el escurrimiento de las aguas y éste a su vez es influenciado por el sedimento del cauce y su morfología, generándose un proceso de retroalimentación mutua, resulta relevante caracterizar el régimen de transporte total de los sedimentos del lecho que intervienen en el proceso, esto es, tomando en conjunto los sólidos transportados efectivamente por el fondo (ripios, material grueso y bloques de roca) y aquellos transportados en suspensión (arenas).

Los resultados obtenidos, revelan que el efecto del PHAM sobre el transporte total de sedimentos del lecho, se circunscribe al tramo comprendido entre los puntos A3 y D5 donde la mayor reducción probable en el gasto sólido total se produciría entre la confluencia del río Colorado y Las Lajas (D5), con una magnitud del orden de 1,2 mill ton/año (valor medio del rango valor recurrente-valor esperado).

Como se explica a continuación, durante episodios de crecidas pluviales y nivales, la tasa de transporte aumentará lo que podrá generar superávit temporales que podrían producir sedimentación local transitoria en este sector. Con caudales menores pero con capacidad de arrastre suficiente, el cauce se remodelará restituyendo su morfología a su estado anterior lo que se repetirá cíclicamente a lo largo del año o a lo largo de lapsos mayores, dependiendo de la hidrología que lo caracterice.

Le siguen en importancia los puntos D3 y D4 con reducciones probables del orden de 0,7 mill ton/año y en tercer lugar los puntos D2 y C2 con órdenes de magnitud de 0,4 mill ton/año.

Como ha sido señalado, aguas abajo de Las Lajas, en el punto D6, en promedio no se produciría una reducción en el gasto sólido total, ya que si la alimentación de sedimentos desde aguas arriba de este punto es menor que el gasto sólido asociado al caudal del río, durante el tiempo que dure esa condición se iniciará un proceso de degradación que aportará transitoriamente el material del lecho para satisfacer la capacidad de transporte del flujo, y cuando los aportes de aguas arriba sean mayores, este proceso terminará dando paso a un proceso temporal de sedimentación (condicionado principalmente por la influencia de la barrera de la bocatoma del Canal La Sirena):

La alternancia descrita de periodos con degradación y sedimentación temporales, se repetirá con distintas duraciones según la hidrología del año, pero manteniendo una tasa de transporte promedio igual a la condición actual toda vez que el perfil del cauce tendrá que mantenerse constante debido a las condiciones impuestas por la bocatoma.

**Tabla 3.3 Transporte sólido total del lecho y reducciones probables por el PHAM**

Puntos de Control	Transporte sólido total (fondo+suspensión) en mill ton/año						Reducciones probables transporte sólido total (fondo+suspensión) en mill ton/año			
	Sin PHAM			Con PHAM			RECURRENTE	VALOR ESPERADO	MEDIO RANGO	PORCENTAJE MEDIO RANGO
	RECURRENTE	VALOR ESPERADO	MEDIO RANGO	RECURRENTE	VALOR ESPERADO	MEDIO RANGO				
<b>Sistema Volcán</b>										
A1	0,013	0,054	0,034	0,005	0,011	0,008	0,008	0,043	0,026	76%
A2	0,002	0,02	0,011	0,002	0,005	0,004	0	0,015	0,007	64%
A3	0,026	0,111	0,069	0,011	0,022	0,017	0,015	0,089	0,052	75%
A4	0,028	0,116	0,072	0,009	0,032	0,021	0,019	0,084	0,051	71%
A5	0,068	0,257	0,163	0,036	0,074	0,055	0,032	0,183	0,108	66%
A6	0,021	0,068	0,045	0,015	0,02	0,018	0,006	0,048	0,027	60%
A7	0,016	0,265	0,141	0,016	0,146	0,081	0	0,119	0,06	43%
<b>Sistema Yeso</b>										
B1	0,037	0,213	0,125	0,009	0,022	0,016	0,028	0,191	0,109	87%
B2	0,118	0,287	0,203	0,056	0,116	0,086	0,062	0,171	0,117	58%
<b>Sistema Colorado</b>										
C1	0,18	0,59	0,385	0,09	0,23	0,16	0,09	0,36	0,225	58%
C2	0,37	1,09	0,73	0,09	0,54	0,315	0,28	0,55	0,415	57%
<b>Sistema Maipo</b>										
D1	0,7	3	1,85	0,7	2,9	1,8	0	0,1	0,05	3%
D2	1,4	6	3,7	1,3	5,4	3,35	0,1	0,6	0,35	9%
D3	1,4	5,8	3,6	1,1	4,7	2,9	0,3	1,1	0,7	19%
D4	1,3	6,1	3,7	1	5,1	3,05	0,3	1	0,65	18%
D5	1,4	5,7	3,55	0,8	3,9	2,35	0,6	1,8	1,2	34%
D6	1,4	5,9	3,65	1,4	5,9	3,65	0	0	0	0%

### 3.7 EFECTO DEL PHAM SOBRE EL TRANSPORTE SÓLIDO DE WASHLOAD

#### 3.7.1 Valores representativos del efecto del PHAM sobre del gasto sólido de washload

A partir de las series medias diarias del gasto sólido de washload, se desarrollaron curvas de duración que cubren todo el espectro de caudales y de gastos sólidos, desde aquéllas asociadas a los grandes caudales y crecidas de baja recurrencia hasta las vinculadas a los bajos caudales de estiaje. Los estadígrafos que derivados de estas curvas, permiten determinar caracterizar el washload por medio de valores recurrentes (probabilidad de excedencia 90 %), valores esperados y valores medios del rango recurrente-esperado.

Los resultados de esta caracterización, muestran que la variación porcentual de gasto sólido entre los escenarios Sin PHAM y Con PHAM es mayor en las partes altas de la cuenca. Sin embargo, sus magnitudes son comparativamente poco significantes en relación a los valores esperados de los puntos más bajos del propio río Maipo, puesto que arriba el orden de magnitud está entre 0,001 y 0,06 mill ton/año en tanto abajo en el sector de Las Lajas es del orden de 2,8 mill ton /año.

El río Yeso no aporta prácticamente washload como tampoco lo hace el río Volcán, pero en el otro extremo se sitúa el río Colorado, que constituye una excepción ya que aporta washload en cantidades significativas que bordean 1,1 mill ton /año.

#### 3.7.2 Efecto del PHAM sobre los gastos sólidos de washload

##### 3.7.2.1 Reducciones características

Al igual que en el caso de los gastos sólidos de fondo y en suspensión de los sedimentos removidos del lecho, las probables reducciones en el transporte de washload que produciría el PHAM, permiten visualizar cómo se verían afectados los afluentes principales y el río Maipo, en el área de influencia del PHAM respecto de este tipo de transporte de sedimento. Las reducciones del valor medio del rango de valores recurrentes a esperados, se resume en los puntos que vienen a continuación.

##### 3.7.2.2 Reducciones en afluentes principales en desembocaduras

- Río Volcán: 0 - 0,03 mill ton/año en río Volcán en desembocadura
- Río Yeso: no aporta washload significativo
- Río Colorado: 0,02 - 0,76 mill ton/año

##### 3.7.2.3 Reducciones en el río Maipo aguas arriba de Las Lajas

- Aguas arriba de la confluencia con el río Volcán: 0,01 - 0,19 mill ton/año
- Aguas arriba de la confluencia con el río Yeso: 0,01 – 0,19 mill ton/año
- Aguas abajo de la confluencia con el río Yeso: 0,01 – 0,19 mill ton/año
- Aguas arriba de la confluencia con el río Colorado: 0,01 – 0,19 mill ton/año
- Aguas arriba de Las Lajas, se producirían reducciones máximas en el gasto sólido de washload, de 0,1 – 1,6 mill ton/año

#### 3.7.2.4 Reducciones en el río Maipo aguas abajo de Las Lajas

Hacia aguas abajo de Las Lajas, a partir de la junta del río Colorado, el washload se reduce de los actuales gastos sólidos de 0 – 2,8 mill ton/año a valores de 0 – 1,3 mill ton/año, sin cambiar aguas abajo de Las Lajas, si bien la restitución de los caudales de la central generarán mayor dilución.

### 3.8 ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE EL ESTUDIO DE LA U. DE CHILE Y EL PRESENTE ESTUDIO

Como parte del estudio, se llevó a cabo un análisis detallado del estudio sedimentológico de la Universidad de Chile que incluye comparaciones y discusiones de los resultados obtenidos con los del presente estudio, particularmente de aquellas componentes del transporte sólido que son efectivamente comparables (capacidad de arrastre o gasto sólido potencial, gasto sólido efectivo y washload) para el escenario Sin PHAM y Con PHAM.

#### 3.8.1 Capacidad de arrastre

##### 3.8.1.1 Curvas de descarga de capacidad de arrastre

Dado que la información de ambos estudios, no es exactamente la misma, se procedió a reproducir las curvas del estudio de la Universidad, obtenidas con el Método de Wilcock y Crowe (Método W-C) y a compararlas tanto con las del presente estudio obtenidas con el Método de la Envolvente Inferior (Método E.I.) del Manual de Carreteras del MOP, como con las resultantes de aplicar directamente el Método W-C, a las condiciones de los cauces con la información, topobatemétrica y granulométrica de los sedimentos de los lechos relevada en el presente estudio.

El análisis de las distintas curvas de descarga de capacidad de arrastre en cada cauce, permitió constatar que la capacidad de arrastre estimada por la Universidad con sus propios datos, es superior a la del presente estudio (obtenida también con datos propios), llegando a ser en el caso de los caudales altos, más de 60 veces en El Morado; más de 10 veces en el estero Colina y en el río Colorado; en el río Yeso cerca de 6 veces y en el río Maipo aguas arriba del río Colorado, 9 veces. Para los caudales bajos estas razones se sitúan en valores de 15, 10, 8, 3, 6 y 3 veces respectivamente, para estos cauces, es decir, son algo más bajas, pero igualmente importantes.

Para los demás cauces del sistema Maipo, las razones tanto para caudales altos como bajos son del orden de 2 o 3, pero para La Engorda, se da la excepción de que para caudales hasta aproximadamente 1,5 m<sup>3</sup>/s, se invierte la razón siendo mayores los valores predichos por el Método E.I. que el Método W-C.

Algo similar ocurre con el río Volcán antes de la junta con el río Maipo, donde este último método predice una fracción del primero, fracción que para caudales altos se aproxima 0,5. En los demás cauces, las razones máximas se sitúan en el entorno de 2 a 3, es decir, la capacidad estimada por la Universidad de Chile es 2 a 3 veces la predicha por el presente estudio.

La aplicación del mismo Método W-C a los datos obtenidos en el presente estudio, revela que los resultados de capacidad de arrastre que se obtienen con el mismo método, pueden diferir sustantivamente

dependiendo de la información topobatimétrica y granulométrica de los sedimentos, empleada para caracterizar hidráulica y mecánico-fluvialmente los cauce.

En otras palabras, estos métodos permiten hacer estimaciones de la capacidad de arrastre de un sector o tramo de cauce, pero debe tenerse presente que ellas reflejan el potencial de arrastre de un cauce con una geometría hidráulica y sedimentos específicos del tramo caracterizado.

### 3.8.1.2 *Valores esperados de la capacidad de arrastre*

De acuerdo a los análisis realizados, las estimaciones de los valores esperados de la capacidad de arrastre hechas por la Universidad, para la situación sin PHAM, son entre 2 y 10 veces las del presente estudio, con la excepción del estero La Engorda y el río Volcán, en que ambas cifras difieren poco, y del caso atípico del estero El Morado en que el valor de la Universidad se empina a cerca de 25 veces el de presente estudio.

Este tipo de diferencia tiende a mantenerse para la situación con PHAM (salvo El Morado que baja a 15 veces), pero hay que considerar que en el caso de la Universidad, los valores esperados además que se obtuvieron a partir de curvas de descarga de capacidad de arrastre generada con el Método W-C, provienen de curvas de duración de series mensuales en tanto las del presente estudio, corresponden a series diarias.

Los valores esperados con series diarias, deberían resultar en general más altos, razón por la cual las diferencias con la Universidad podrían ser incluso mayores, y estas diferencias modificarse si se considera que en la situación con PHAM, a las series se les debe restar el caudal captado en las bocatomas, para ser turbinado en las centrales.

Consecuente con lo anterior, las reducciones en los valores esperados de las capacidades de arrastre entre la situación con PHAM y sin PHAM, estimadas por ambos estudios, se ven reflejadas con distintos valores absolutos (menores en el caso del presente estudio), pero en términos porcentuales dichas diferencias se reducen o son más parecidas.

### 3.8.2 **Gasto sólido efectivo de fondo**

Para estimar un valor promedio de la tasa de transporte sólido efectivo afluente a la zona de la Bocatoma Independiente, en el estudio de la Universidad de Chile, se agregó una explotación local de áridos del orden de 2,4 millones de ton/año, obteniéndose con ella un total de unos 8,5 (6,1+2,4) millones de ton/año. Según lo señala el informe de la universidad, basado en que este valor resultaría “bastante cercano y coherente” con las estimaciones de la capacidad de arrastre de fondo en la zona Maipo en Las Vertientes (8,9 millones de ton/año), se aceptó esta última tasa como representativa de la producción de sedimento grueso en la zona en estudio.

La explotación adicional de áridos no está fundamentada como tampoco queda claro por qué se asimila capacidad de arrastre con producción de sedimento grueso, siendo la suposición más cuestionable, en todo caso, la de hacer equivalente el máximo del volumen consignado en los permisos de extracción de áridos con la tasa de transporte efectivo del río.

Tampoco resulta claro por qué el estudio de la Universidad estimó el gasto sólido efectivo en los ríos Colorado, Yeso y Volcán, suponiendo que la proporción en la producción de sedimentos entre dos cuencas es similar a la proporción de sus respectivos caudales, y además que los valores específicos de estas variables (por unidad de superficie) son homogéneos en la zona en estudio. Considerando que la relación entre gasto sólido y caudal no es lineal, se puede concluir que las estimaciones realizadas en el citado estudio, constituyen aproximaciones gruesas cuya cercanía con la realidad se desconoce.

Una comparación entre los valores esperados de la tasa de transporte efectivo de sedimentos por el fondo estimados en el estudio de la Universidad de Chile y aquellos determinados en el presente estudio, revela que los valores esperados del transporte efectivo de fondo de la Universidad difieren de manera importante con los del presente estudio, siendo para la situación sin PHAM, entre 1 y 9 veces los del presente estudio, es decir, similares a las diferencias entre capacidades analizadas antes.

Cabe comentar que en casos como río Volcán y río Maipo en Las Melosas y en Las Vertientes, el estudio de la Universidad considera las tasas efectivas iguales a las capacidades, para la situación actual sin PHAM. Para situación futura con PHAM, estas tasas se reducen en Las Vertientes, pero no en Volcán ni en Las Melosas, aun cuando en el primero debería producirse una disminución por efecto de las captaciones en El Morado, Las Placas, Colina y La Engorda.

De manera semejante a lo que ocurre con la capacidad de arrastre, las reducciones entre la situación con PHAM y sin PHAM, estimadas por ambos estudios, se ven reflejadas con distintos valores absolutos (menores en el caso del presente estudio), y también con menores valores porcentuales, salvo en el caso del Volcán.

### **3.8.3 Gasto sólido en suspensión**

En el estudio de la Universidad de Chile, el gasto sólido en suspensión en los distintos cauces se determinó a partir de las curvas de concentraciones diarias de sedimento en función del caudal medio diario, empleando las estadísticas sedimentométricas de sólidos en suspensión obtenidas por la DGA. El uso de este tipo de estadísticas, revela que se evaluó el washload y no propiamente el sedimento en suspensión removido del lecho (arenas).

Un análisis comparativo entre los valores esperados del washload de la Universidad y los del presente estudio permiten apreciar que las diferencias no son significativas.

Respecto a las reducciones por efecto del PHAM, éstas resultan bastante comparables tanto en términos de valores absolutos como relativos (porcentuales). Debe tenerse presente, en todo caso, que si bien los datos originales empleados en ambos estudios provienen de los registros sedimentométricos de las estaciones operadas por la DGA, el procesamiento de la información es distinto ya que la Universidad hizo uso de series mensuales y no diarias, y las concentraciones puntuales (superficiales) y no integradas en la sección que son en general mayores que las primeras, además que en presente estudio la series fueron corregidas y extendidas.

### 3.8.4 Comparación en puntos de control similares

La información sobre valores esperados del gasto sólido y reducciones por efecto del PHAM, estimados por el presente estudio y el estudio de la Universidad de Chile en 3 puntos de control seleccionados (por ser los más comparables entre sí), permiten concluir que los valores esperados y las reducciones absolutas por efecto del PHAM de la capacidad de arrastre y del transporte efectivo, estimados en el presente estudio, son iguales o menores que los del estudio de la Universidad de Chile.

En términos del washload, las estimaciones del presente estudio son mayores que las de la Universidad de Chile, aguas abajo de la junta con el río Volcán.

Lo anterior refleja las diferencias y similitudes de los resultados de ambos estudios, que han sido comentadas antes, y las razones que las causan según el tipo de variable considerada, es decir, capacidad de arrastre, transporte sólido efectivo de fondo y washload.

## 3.9 INTERACCIÓN SEDIMENTOLÓGICA DE LA DESCARGA LAS LAJAS CON LAS BOCATOMAS LA SIRENA E INDEPENDIENTE DEL RÍO MAIPO

### 3.9.1 Antecedentes

Se analizaron los efectos sobre el régimen sedimentológico del río Maipo de la Descarga Las Lajas considerando la presencia de la Bocatoma La Sirena y la Bocatoma Independiente, teniendo presente la posible interacción de las obras dado que la primera se localiza a 1170 m aguas abajo de la descarga, en tanto la Bocatoma Independiente se ubica a 5 km aguas abajo de esta última.

Desde el punto de vista sedimentológico y mecánico fluvial, el tramo aguas abajo de la descarga Las Lajas, se caracteriza por presentar una clara tendencia a la depositación causada por la existencia de las barreras transversales al cauce, de ambas bocatomas.

Otro factor relevante en los cambios del régimen sedimentológico que introducen ambas bocatomas, se relaciona con la reducción de caudales en el río, al captarse y desviarse hasta 30 m<sup>3</sup>/s en la Bocatoma La Sirena y hasta 50 m<sup>3</sup>/s en la Bocatoma Independiente.

La disminución de los caudales aguas abajo, hace que las tasas de transporte de sedimentos sean reducidas a partir de las bocatomas hacia abajo en el río, agregado a lo cual, por efecto de las faenas de explotación de áridos aguas arriba o inmediatamente aguas abajo de las barreras, se produce una merma de material para ser transportado por la corriente ya que se deja acopiado, en sectores protegidos del río.

### 3.9.2 Situaciones y sectores analizados

Con el fin específico de analizar los efectos del PHAM sobre el transporte de sedimentos en el tramo aguas abajo de la Descarga Las Lajas, primeramente se analizó la situación actual del régimen sedimentológico del río, caracterizando su comportamiento hidráulico y mecánico fluvial bajo la presencia de las Bocatomas La Sirena e Independiente. Para el análisis cuantitativo, se seleccionaron los 3 sectores de estudio que se individualizan a continuación, procediéndose a determinar en cada uno de ellos las curvas de duración de los caudales medios diarios considerando las siguientes condiciones hidrológicas:

Estudio Sedimentológico Avanzado

- Aguas abajo de la Descarga Las Lajas hasta la Bocatoma La Sirena (Sector D6(1)): régimen hidrológico actual según los registros fluviométricos de la estación Maipo en El Manzano
- Aguas abajo de la Bocatoma La Sirena hasta la Bocatoma Independiente (Sector D6(2)) régimen hidrológico actual con extracción de hasta 30 m<sup>3</sup>/s (20 m<sup>3</sup>/s para generación y 10 m<sup>3</sup>/s para riego)
- Aguas abajo de la Bocatoma Independiente (Sector D7) régimen hidrológico actual con extracción de hasta 50 m<sup>3</sup>/s (15 m<sup>3</sup>/s para generación y 35 m<sup>3</sup>/s para riego)

De acuerdo con los antecedentes reunidos en vistas a terreno efectuadas a las zonas de ambas bocatoma e imágenes satelitales, en este sector del río existe actualmente una importante actividad de procesamiento y extracción de áridos que se verifica aguas abajo y arriba de las bocatomas La Sirena e Independiente, producto de los embanques que generan ambas barreras y los procesos de desarenado y desripado.

Se puede apreciar que en razón de la existencia de las barreras, en las cercanías de las obras se produce un activo proceso de depositación del material arrastrado desde aguas arriba, lo que desde el punto de vista del cauce, se traduce en una disminución de su pendiente y en consecuencia de su capacidad de arrastre.

### 3.9.3 Análisis del régimen mecánico fluvial actual del tramo

Las estimaciones realizadas en el presente estudio indican que el sector entre la Descarga Las Lajas y la Bocatoma La Sirena (Sector D6(1)) y el sector siguiente de aguas abajo hasta la Bocatoma Independiente (Sector D6(2)), se produciría una reducción en la tasa de transporte de arenas, ripios y gravas de 3,4 mill ton/año, en términos de valores esperados, cifra que representa el 52% de lo que transporta el río en el sector D6(1). En término de valores recurrentes, esta reducción alcanzaría a 0,2 mill ton/año cifra equivalente al 100% del transporte de aguas arriba.

El PHAM solo cambiará el washload, reduciendo su valor esperado a 1,5 mill ton/año y su valor medio del rango a 0,8 mill ton/año, cifras que representan del orden de un 55% de los respectivos valores característicos, lo cual traería como consecuencia que las cargas de sedimento del desarenador se verán reducidas a poco más del 80% de su valor actual, es decir, a una cifra cercana a 0,6 mill ton/año. En otras palabras, el PHAM podría producir una reducción potencial en las cargas de sedimentos finos y arenosos que llegan al desarenador, pero su efecto estaría acotado al 20% de reducción.

Por su parte la Bocatoma Independiente provoca un embanque en la zona inmediata aguas arriba de la barrera y compuertas del Canal San Carlos y de Aguas Andinas, por lo que el efecto del PHAM sería similar en cuanto a la reducción del washload, pero no así en cuanto al arrastre de fondo ni en el transporte en suspensión, ya que éstos quedarán esencialmente condicionados por las descargas de los sedimentos de la bocatoma La Sirena, lo que podría resultar en procesos alternados de degradación temporal y de sedimentación asociados estos últimos al paso de crecidas en el río.

## **4. EFECTOS LOCALES EN LAS CERCANÍAS DE LAS OBRAS DEL PHAM**

### **4.1 BASES PARA LA CUANTIFICACIÓN DE LOS EFECTOS MECÁNICO FLUVIALES LOCALES**

#### **4.1.1 Cálculo de la socavación local al pie de la Descarga Las Lajas y bocatomas**

Como parte del análisis mecánico fluvial, se cuantificaron también los fenómenos de socavación local al pie de las obras de captación y descarga del PHAM.

El análisis incluyó el cálculo de la profundidad y extensión de las fosas de socavación local tanto al pie de las obras de descarga que se ha estimado funcionarán principalmente de manera eventual, como al pie de las barreras fija y móvil de las bocatomas, las que tendrán un funcionamiento más permanente dependiendo de los caudales del curso de agua y de su relación con el caudal captado.

La descarga principal corresponde a la obra de restitución de la Central Las Lajas en el río Maipo, aguas abajo de la confluencia del río Colorado. Las demás obras corresponden a las barreras móviles y fijas de las bocatomas proyectadas en el río Yeso, aguas abajo del embalse del mismo nombre, y en los esteros El Morado, Las Placas, Colina y la Engorda, todos ellos afluentes del río Volcán.

En el caso de las descargas de emergencia, para los cálculos de las socavaciones al pie de las obras se supuso que los caudales captados por las bocatomas, podrían ser restituidos en su totalidad a través de estas obras, limitados a su capacidad hidráulica. Conjuntamente se consideró un caudal pasante en el cauce (en el punto donde se descarga) igual al caudal afluente a la bocatoma menos el caudal captado para generación.

Para los cálculos de las socavaciones aguas abajo de las barreras fijas y/o móviles, los caudales empleados suponen la situación más desfavorable que se da cuando no se capta caudal para generación y se deja pasar todo el caudal del estero o río hacia aguas abajo de la obra. Además, en el caso de la barrera móvil se supuso la barrera funcionando con ambas compuertas abiertas.

Los cálculos de socavación se realizaron para la situación sin y con PHAM, considerando 3 escenarios hidrológicos de probabilidad de excedencia, 5%, 50% y 95% en cada curso de agua donde se ubican estas estructuras, compatibilizando los caudales disponibles en estos cursos (situación sin PHAM) con la máxima extracción o descarga de cada estructura.

#### **4.1.2 Cálculo de la degradación del lecho aguas abajo de las obras**

La degradación de un cauce es un proceso que ocurre en un lecho fluvial a partir de una sección determinada, cuando la alimentación de sedimento hacia aguas abajo se ve interrumpida, manteniéndose sin embargo, la capacidad de arrastre de la corriente. Como consecuencia del desbalance entre esta capacidad de arrastre insatisfecha por la interrupción del flujo de material sólido desde aguas arriba, se produce una erosión paulatina del cauce, acompañada de un asentamiento gradual de la pendiente y de un progresivo acorazamiento del lecho (fenómeno que ocurre en el caso de lechos de granulometría gruesa y extendida como los cauces de las cuencas alta del sistema hidrográfico del río Maipo).

El proceso descrito puede tardar en estabilizarse años o décadas, según las características del cauce y la hidrología del río, y puede comprometer varios cientos de metros o algunos kilómetros del cauce.

En el presente estudio se analizó la posible degradación de los cauces con obras del PHAM, en los tramos aguas abajo de las secciones de emplazamiento de las bocatomas y de la descarga de la Central Las Lajas del PHAM.

Uno de los aspectos que no se ha tomado en cuenta al modelar teóricamente la degradación, es la restitución de los sedimentos que se hace al operar las bocatomas, mediante los procesos de desripado y desarenado habituales, a través los cuales los sedimentos se devuelven al cauce, tal como regularmente se realiza en las bocatomas operadas en la cuenca por Aes Gener. Eso debe tenerse presente a la hora de interpretar y analizar los resultados que arrojan los modelos ya que por las razones expuestas, éstos tenderán a sobrevalorar la profundidad y extensión de la degradación, en el caso de las bocatomas.

#### 4.2 SOCAVACIÓN LOCAL AL PIE DE LA DESCARGA LAS LAJAS Y BOCATOMAS

Los cálculos de las profundidades y de las dimensiones en planta de las fosas de socavación al pie de la descarga Las Lajas en el río Maipo y al pie de las obras de las bocatomas del PHAM, incluyen el canal de descarga de emergencia del canal de aducción como asimismo las barreras móviles y fijas en los esteros Las Placas, Colina, la Engorda y El Morado pertenecientes al sistema hidrográfico del río Volcán, y de la bocatoma en el río Yeso. También se incluyó una descarga de emergencia al río Colorado la cual operaría frente a un rechazo de carga de la Central Las Lajas.

Los resultados están asociados a caudales en los esteros y ríos con probabilidades de excedencia 5, 50 y 95 %, los cuales representan escenarios hidrológicos infrecuentes, normales y de alta recurrencia, respectivamente, los cuales han sido considerados importantes de incorporar a los cálculos debido a que fijan las condiciones hidráulicas en los cauces con las cuales se “encuentran” las aguas descargadas desde los canales o rápidos de las barreras de las bocatomas, y por tanto, determinan también las características de los fenómenos de socavación local.

Los resultados obtenidos permiten apreciar que las socavaciones locales para condiciones medias o escenarios hidrológicos normales, son en general poco significativas puesto que representan profundidades del orden de 1 a 1,5 m como máximo, no obstante haberse supuesto en el cálculo la situación más desfavorable posible en la que el caudal captado en cada bocatoma es el máximo de acuerdo con la capacidad de la obra y el caudal del río, y éste es devuelto en su totalidad al cauce (descargas de emergencia) y los sedimentos arrastrados por el río aguas arriba, no son transportados con la corriente hacia la fosa de socavación (caso de las barreras), supuesto este último, conservador.

#### 4.3 DEGRADACIÓN DEL LECHO AGUAS ABAJO DE LAS BOCATOMAS DEL PHAM

Los resultados obtenidos para diferentes escenarios hidrológicos y periodos de simulación de hasta 50 años, determinadas bajo un supuesto conservador que conduce posiblemente a volúmenes de cuñas de degradación mayores que las que se darán en la realidad, esto es, que las obras interceptarán

todo el material proveniente de aguas arriba (aunque en la realidad los procesos de desarenado y desripado harán que se restituya al cauce parte de este material), pueden sintetizarse como sigue:

- Estero El Morado: la degradación sería nula para cualquier condición y escenario
- Estero Las Placas: el proceso de degradación que pudiera experimentar su cauce no es significativo por la escasa profundización (máxima) que se daría, de 0,7 m, abarcando unos 5 km aproximadamente
- Estero Colina: el proceso de degradación que pudiera experimentar el cauce, se traduciría en una profundización máxima de 1,3 m, comprometiendo una extensión máxima de 3,5 km, lo que permite concluir que en este cauce el fenómeno sería escasamente significativo
- Estero La Engorda: En este caso se concluye que el proceso de degradación que pudiera experimentar el cauce, en términos de profundidades máximas alcanzaría 0,6 m y una longitud 2 km, lo cual revela que el proceso de degradación en este cauce es también poco significativo
- Río Yeso: Para este río, se constata que el proceso de degradación que pudiera experimentar el cauce, alcanzaría profundidades máximas de 3,2 m con una longitud asociada de 2,8 km

#### 4.4 DEGRADACIÓN DEL LECHO AGUAS ABAJO DE LA DESCARGA LAS LAJAS

El proceso de degradación en el río Maipo aguas abajo de la descarga de la Central Las Lajas, obedece a un desequilibrio temporal mecánico fluvial, pero originado por el ingreso de “aguas limpias” devueltas en un cierto punto del cauce, que se suma al caudal pasante lo cual causa, a partir de ese punto, un aumento de la capacidad de arrastre que no es igualada a la tasa de alimentación de sedimentos de aguas arriba, por estar asociada esta última a un menor caudal.

Sin embargo, dada la presencia cercana de la barrera de la bocatoma del Canal La Sirena (aguas abajo) que genera un remanso y una zona de depositación causante del asentamiento del perfil del río hacia aguas arriba de la barrera, este eventual proceso de degradación quedaría significativamente limitado por esta condición del río. En efecto, dada la proximidad de la descarga con la barrera de la bocatoma La Sirena, es previsible que exista una interacción que signifique limitar el proceso de degradación causado por la descarga Las Lajas.

Teniendo presente que la barrera frontal de la bocatoma, impone un punto inamovible del lecho a 1.170 m aguas abajo de la descarga de Las Lajas, se ha estimado con supuestos conservadores que la profundidad de la cuña, alcanzaría un valor cercano a 0,9 m, lo cual lleva a la conclusión que la barrera La Sirena, juega un rol determinante en acotar las dimensiones de la cuña, en largo y profundidad.

Por su parte la Bocatoma Independiente constituye un punto de control sedimentológico relevante que provoca un embanque en la zona inmediata aguas arriba de la barrera y compuertas del Canal San Carlos y de Aguas Andinas, razón por la cual es improbable que se produzca un proceso de degradación aguas abajo de la Bocatoma La Sirena, y si ocurre, quedará constreñido a un tramo más corto que probablemente no alcanzará a comprometer a las obras de la Bocatoma Independiente.

## 5. EFECTOS SEDIMENTOLÓGICOS DE LAS CENTRALES GUAYACÁN Y EL CANELO

### 5.1 CENTRAL GUAYACÁN

#### 5.1.1 Sectores de estudio

Con el objeto de cuantificar los efectos de la Central Guayacán sobre el transporte de sedimentos del río Maipo, se analizaron tres sectores en la zona de estudio:

- Sector PC1: Río Maipo aguas arriba de la bocatoma de la central
- Sector PC2: Río Maipo entre la bocatoma y la descarga de la central
- Sector PC3: Río Maipo aguas abajo de la descarga de la central

#### 5.1.2 Efecto sobre la capacidad de transporte de fondo

Los resultados indican que la entrada en operación de la Central Guayacán genera en el tramo ubicado entre la bocatoma y la descarga de la central (PC2), una reducción de la capacidad de arrastre de sedimentos de un 31%, lo que implica disminuciones de 0,51 millones de ton/año. En el sector PC1 y PC3, no se producen cambios en esta capacidad.

Por su parte, la posterior puesta en marcha del PHAM, generaría una reducción, sobre la ya producida por la operación de la Central Guayacán, de un 15% aguas arriba de la bocatoma de la central Guayacán (PC1), de un 18% en el tramo comprendido entre la bocatoma y la descarga de la central (PC2), y de 16% en el tramo de aguas abajo de esta obra (PC3). Las magnitudes promedio de reducción en las tasas potenciales de arrastres, adicionales a las ya generadas por la operación de la Central Guayacán en el tramo entre la bocatoma y descarga de la central, serían de 0,21 mill ton/año (18%).

Comparando los resultados anteriores se observa que la Central Guayacán genera una reducción de la capacidad de arrastre de sedimentos del río mayor que la que produciría la futura puesta en operación del PHAM.

#### 5.1.3 Efecto sobre el de transporte de sedimento del lecho

Los resultados del análisis efectuado, indican que en términos de valores esperados, la reducción incremental que genera el PHAM sobre las reducción ocasionada por la Central Guayacán es de 0,24 a 0,29 mill ton/año y en términos de valores recurrentes de 90% de excedencia, de 0,06 a 0,31 mill ton/año. Las cifras medias corresponden a 0,15 mill ton/año para el PC1; 0,16 mill ton/año para el PC2; y 0,30 mill ton/año para el PC3.

#### 5.1.4 Efecto sobre el de transporte de sedimento de washload

Los resultados de los cálculos de los valores característicos del washload permiten apreciar que en términos de valores esperados, la reducción incremental causada por el PHAM sobre lo que genera la Central Guayacán, es de 0,4 a 0,5 mill ton/año en los PC1, PC2 y PC3 y que en términos de valores recurrentes de 90% de excedencia, la reducción queda dentro del rango de 0,01 a 0,02 mill ton/año. Esto

conduce a una reducción media del rango valor recurrente-valor esperado, 0,26 mill ton/año en PC1; 0,19 mill ton/año en PC2 y 0,26 mill ton/año en PC3.

### 5.1.5 Degradación local del cauce del río Maipo aguas abajo de la restitución

Como resultado del cálculo se obtuvo que la profundidad máxima de degradación del lecho oscilaría entre 4 y 6 m con un tiempo de estabilización entre 40 y 45 años, y la extensión de la cuña alcanzaría entre 2 y 4 km en un tiempo de estabilización de 10 a 45 años.

### 5.1.6 Socavación al pie de la obra de descarga de la central Guayacán

La socavación al pie de la descarga de la central, se cuantificó a partir de la profundidad local analizando tres tipos de situaciones hidrológicas en el río Maipo, concluyéndose que para el escenario más desfavorable, la profundidad de la fosa alcanzaría 3,5 m, su longitud menos de 15 m y su ancho, 11 m.

## 5.2 CENTRAL EL CANELO

### 5.2.1 Sectores de estudio

Con el objeto de cuantificar los efectos de la Central El Canelo sobre el transporte de sedimentos del río Maipo, se analizaron tres sectores en la zona de estudio, considerando a su vez 3 escenarios de interés.

- Zona 1: sector entre la bocatoma y la confluencia de río Maipo y Colorado, representado por el punto de control EC1
- Zona 2: sector entre la confluencia del río Maipo y Colorado y la restitución de la central, representado por el punto de control EC2
- Zona 3: sector del río Maipo aguas abajo de la restitución de la central, representado por el punto de control EC3

### 5.2.2 Escenarios de análisis

#### 5.2.2.1 Escenario actual

Se analizó un escenario actual en que no operan ni la Central El Canelo ni el PHAM, por lo que no hay variaciones en la hidrología respecto de río Maipo aguas arriba ni aguas abajo de la junta con el río Colorado. Para este escenario, los caudales medios diarios en el río Maipo, en los puntos de control EC1, EC2 y EC3 son equivalentes al caudal del río Maipo aguas arriba y aguas abajo de la junta del río Colorado, sin PHAM.

#### 5.2.2.2 Escenario futuro 1

Se analizó además, un escenario futuro en el cual opera la Central El Canelo pero no el PHAM. Las variaciones en la hidrología respecto de río Maipo ocurren en el tramo comprendido entre la bocatoma y la descarga de la central, es decir aguas arriba y abajo de la junta con el río Colorado.

- a) Río Maipo aguas abajo de la bocatoma (punto EC1) y aguas abajo de la descarga de la central

En este caso, aguas abajo de la bocatoma de la central (EC1), la variación en la hidrología se produce por la captación del caudal en la bocatoma, viéndose éste reducido frente al escenario anterior. Por su parte, en el punto de control ubicado aguas abajo de la descarga (EC3), el caudal permanece igual que en el escenario anterior, debido a la restitución de la central, y al caudal procedente de la confluencia del río Maipo.

- b) Río Maipo entre la bocatoma y la descarga de la central (punto EC2)

En EC2, que se encuentra ubicado justo aguas abajo de la confluencia con el río Colorado, el caudal del río se ve disminuido por la extracción del agua para la central, pero a diferencia del EC1, los caudales son mayores a causa del caudal procedente del río Colorado.

### 5.2.2.3 Escenario futuro 2

Este escenario considera la operación tanto de la Central El Canelo como del PHAM.

- a) Río Maipo aguas abajo de la bocatoma (EC1) y aguas debajo de la descarga de la central(EC3)

En este caso, tanto en el punto EC1 como EC3, los caudales se verán reducidos, por efecto del PHAM, En el punto EC1, además los caudales del río quedan afectados por la extracción de caudal en la bocatoma de la central. El punto EC3 por su parte, recibe el caudal procedente de la restitución de la Central.

- b) Río Maipo entre la bocatoma y la descarga de la central(PC 2)

Esta situación es similar al punto anterior. Los caudales se verán disminuidos por efectos del PHAM aguas abajo de la confluencia del río Colorado, y por efecto del funcionamiento de la propia central.

### 5.2.3 Efectos sobre el transporte de sedimentos del lecho

En los 3 sectores analizados, se calcularon las capacidades de arrastre para los 3 escenarios hidrológicos arriba descritos, y a continuación se procedió a calcular el transporte efectivo de sedimentos del lecho, determinando por separado el transporte efectivo de fondo del transporte en suspensión. Separadamente se calculó la componente de washload para los escenarios en estudio, es decir, antes de la entrada en operación de la Central El Canelo, posterior a ello y a futuro con el PHAM funcionando.

Una vez hecha la cuantificación de los cambios que experimentan las tasas de arrastre asociadas a los escenarios descritos, mediante un análisis comparativo de los resultados asociados a cada escenario, se determinaron los efectos de la operación de la Central El Canelo y del PHAM, en el futuro, concluyéndose que la central genera una reducción de la capacidad de arrastre de sedimentos del río, mayor que la que produciría la futura puesta en operación del PHAM.

De acuerdo con los resultados obtenidos, la puesta en marcha del PHAM posterior a la entrada de la Central El Canelo, generaría una reducción en la capacidad de arrastre sobre la que produciría esta

central, en términos del valor medio del rango recurrente-valor esperado, de 0,15 mill ton/año (20%) en EC1; de 0,72 mill ton/año (42%) en EC2; y de 1,1 mill ton/año (36%) en EC3.

En relación a las reducciones en el transporte total de sedimento del lecho, en EC1, éstas alcanzarían 0,17 mill ton/año equivalente a una reducción del 20%; en EC2, alcanzaría un valor de 0,53 mill ton/año equivalente a una reducción del 40%; en EC3, 1,2 mill ton/año equivalente a una reducción del 34%.

#### **5.2.4 Efectos sobre el de transporte de sedimento de washload**

Los resultados de los cálculos de los valores característicos del washload, en los puntos EC1, EC2 y EC3, permiten apreciar que en términos de valores esperados, la reducción incremental causada por el PHAM sobre lo generado por la Central El Canelo, es de 0,28; 0,89; y 1,17 mill ton/año (reducciones relativas de 23%, 45% y 41%) en los puntos EC1, EC2 y EC3, respectivamente y que en términos de valores recurrentes de 90% de excedencia, la reducción es de 0,01, 0,07 y 0,1 mill ton/año (reducciones relativas de 50%, 88% y 59%), en los mismo puntos.

Estos valores equivalen a los siguientes valores medios del rango: 0,15 mill ton/año (24% reducción relativa) en EC1; 0,48 mill ton /año (47%) en EC2; y 0,64 mill ton /año (43%) en EC3.

#### **5.2.5 Degradación del cauce del río Maipo aguas abajo de la restitución de la central**

El cálculo de la degradación se hizo en un escenario de máxima captación, que es un escenario conservador. Dio como resultado una profundidad máxima de degradación del lecho de 0,16 m y una extensión de la cuña hacia aguas abajo, de 25 km, en 50 años, revelando estos resultados que el proceso de degradación que causaría la descarga de la central El Canelo, sería muy poco significativa.

### **6. PROGRAMA DE MONITOREO Y PLAN DE MITIGACIONES DE IMPACTOS DEL PHAM**

#### **6.1 PROGRAMA DE MONITOREO PROPUESTO**

No obstante que en las etapas previas del estudio se realizaron estimaciones de los efectos en variables sedimentológicas características utilizando supuestos conservadores, a modo de verificación adicional, se propone implementar un programa de monitoreo para medir la evolución real de aquellas variables consideradas como relevantes, en secciones indicativas de los cursos fluviales más importantes.

##### **6.1.1 Variables sedimentológicas relevantes a monitorear**

Sin perjuicio que a futuro puedan agregarse nuevas variables de monitoreo, en el presente programa se han definido 6 variables sedimentológicas relevantes (VSR-x), a saber:

- VSR-1: Transporte sólido en suspensión de arenas removidas del lecho
- VSR-2: Transporte sólido fondo de ripios y sedimento grueso

- VSR-3: Transporte sólido de washload de limos y arcillas
- VSR-4: Socavación local
- VSR-5: Degradación de los cauces
- VSR-6: Otras variables relevantes

### 6.1.2 Medición de variables sedimentológicas relevantes

El programa de monitoreo y seguimiento considera sistemas de medición y registro ad-hoc, así como el análisis e interpretación de la información a lo largo del tiempo, diferentes según el tipo de variable relevante (VSR-x).

La medición de cada variable será realizada de forma estandarizada, siguiendo preferentemente los manuales de procedimiento que recomiendan la forma y el método de medición como además, los sistemas de registro y sistematización de la información.

Los resultados del programa de monitoreo deberán consolidarse en una base de datos para consultas, procesamiento, interpretación y análisis de la información con el objetivo de poder cuantificar la evolución, rangos de las variables, tendencias, etc., de las variables observadas, obtener conclusiones y definir medidas preventivas o de mitigación si es pertinente.

### 6.1.3 Manuales de procedimiento

El detalle de los procedimientos de medición, registro y análisis debe quedar consignado en manuales de monitoreo de cada una de las variables sedimentológicas relevantes. En el presente estudio, se han elaborado los siguientes manuales:

- Manual de monitoreo de sedimentos en suspensión del lecho y de fondo en obras de captación
- Manual de monitoreo de washload en estaciones fluvio-sedimentométricas
- Manual de monitoreo de socavaciones y de procesos de degradación del lecho

### 6.1.4 Red de monitoreo integral de variables sedimentológicas relevantes

#### a) Red de monitoreo

La red de monitoreo de las variables sedimentológicas, tiene un carácter integral y global ya que persigue capturar información en distintos puntos de la cuenca, dentro del área de influencia del PHAM, involucrando en la medición y seguimiento de las variables, a otros actores importantes que hacen uso de los recursos hídricos y pétreos del río Maipo y sus afluentes, además del PHAM. Sin embargo, la incorporación de terceros distintos a los titulares del PHAM, no puede ser comprometida a priori ya que constituyen personas jurídicas independientes a los señalados titulares.

#### b) Monitoreo del transporte sólido de arenas (VSR-1)

*Sistemas de medición:* el monitoreo del transporte de arenas del lecho en suspensión, se hará de manera indirecta recolectando información sobre los volúmenes y frecuencias de purga y limpieza de los desarenadores de cada bocatoma.

*Mediciones regulares:* se practicarán mediciones regulares del tiempo (día-hora-minuto) en que se comienza y termina cada operación de purga de los desarenadores, la temperatura del agua, etc., que resultan básicas o complementarias para cuantificar el gasto sólido de las arenas removidas del lecho.

*Registro y almacenamiento:* este proceso se realizará a través de la lectura automática de sensores, recepción y registro de la información en un procesador de datos en una Central de Operaciones o similar, y almacenamiento en una base de datos administrada por un experto o equipo de expertos. Las mediciones periódicas se deben consolidar en un informe quincenal y mensual, para luego proceder a analizar e interpretar la información.

*Análisis, generación y manejo de informes* incluirán: revisión de los datos almacenados, verificación de la consistencia de la información, procesamiento de estadísticas diarias de volúmenes y gastos sólidos del lecho en suspensión, y otras variables de interés para caracterizar el transporte de las arenas en suspensión, generación de informes consolidados semanales, mensuales y anuales, publicación y difusión de la información y atención de consultas técnicas.

*Mediciones esporádicas:* estas mediciones se llevarán a cabo semanalmente durante el periodo de purga de los desarenadores para el día u hora más representativa del peak de concentraciones del sedimento en suspensión del río, o más frecuentemente si ocurre algún evento de crecida importante, y cada vez que se haga una purga o limpieza de los desarenadores durante el periodo de caudales bajos en el río.

*Análisis e interpretación de la información:* se deberá observar la consistencia entre los volúmenes desarenados, los caudales afluentes y la concentración de sólidos en suspensión.

c) Transporte sólido de ripios y sedimento grueso (VSR-2)

*Sistemas de medición:* el monitoreo del transporte de ripios y material de arrastre del lecho, se hará de manera indirecta al igual que la variable VSR-1, recolectando información sobre los volúmenes y frecuencias de purga y limpieza de las desripiadoras en cada bocatoma.

*Mediciones regulares:* se medirán de manera regular los tiempos (día-hora-minuto) de comienzo y término de cada operación de desripiado, ya sea primario o secundario, los cuales se requieren para cuantificar adecuadamente el gasto sólido de fondo de los ripios y material grueso del lecho, y las condiciones en que éste ocurre (algunas de estas variables auxiliares son las mismas de la variable VSR-1, por lo que no será necesario repetir las).

*Registro y almacenamiento:* este proceso se realizará de forma similar a la variable VSR-1.

*Análisis, generación y manejo de informes:* similar al caso VSR-1

*Mediciones esporádicas:* estas mediciones se llevarán a cabo mensualmente durante el periodo de desripiación para el día u hora más representativa del peak de arrastre en el río, o más frecuentemente, si ocurre algún evento de crecida importante, y cada vez que se haga una purga o limpieza de los desarenadores durante el periodo de caudales bajos en el río.

*Procesamiento de registros y manejo de información:* las mediciones deben efectuarse diariamente de forma de ir consolidando una base de datos con dicha periodicidad, para hacer posible que se generen informes quincenales y mensuales, a partir de los cuales se podrá luego proceder a analizar e interpretar la información registrada.

*Análisis e interpretación de la información:* similar a VSR-1

d) Transporte sólido de limos y arcillas (VSR-3)

El procedimiento de monitoreo para el transporte en suspensión de finos o washload, que corresponde a la variable sedimentológica relevante VSR-3, está ligado estrechamente con los procedimientos de medición, registro y publicación de datos empleados por la Dirección General de Aguas.

*Medición:* El proceso de medición consta de una fase de toma de muestras en terreno, de trabajo de laboratorio para determinar la concentración y las granulometrías de los sólidos.

*Registro:* este proceso de registro y publicación de datos es resorte de la Dirección General de Aguas (DGA) para las estaciones existentes. Se espera que las estaciones futuras sean también incorporadas a la red e la DGA.

*Almacenamiento y análisis:* los datos entregados por la DGA son almacenados en forma semanal y mensual o según los plazos que tiene esta institución estatal para suministrar la información.

e) Socavación local (VSR-4)

*Mediciones regulares:* se efectuarán mediciones periódicas de la cota del fondo del lecho (dos veces al año) a través de un sistema adecuado a las condiciones que se dan en una fosa de socavación y su entorno.

*Registro y almacenamiento:* para lograr un registro más o menos continuo de la medición, se recomienda instalar cámaras de video apuntando a un punto de referencia inamovible que permita apreciar la fosa de socavación, de modo tal que las imágenes que puedan ser observadas a distancia, en cualquier instante, por ejemplo en una central de operaciones. Se pondrá especial atención a las observaciones posterior a la ocurrencia de crecidas importantes.

*Análisis, generación y manejo de informes:* los datos tomados en cada punto de monitoreo serán consolidados y almacenados en forma semestral y anual. Se deberán realizar análisis periódicos tendientes a ver la evolución de la variable en el punto y además realizar comparaciones entre distintos puntos de monitoreo.

*Mediciones esporádicas:* una vez al año o cada 2 años se deberá hacer un levantamiento topobatimétrico del sector ubicado aguas abajo de la obra donde se localice la fosa de socavación.

f) Degradación de los cauces (VSR-5)

*Mediciones regulares:* para efectos de monitorear la longitud y profundidad del tramo del cauce que experimentará o pueda experimentar degradación, se deberá estimar la distancia que media entre el pie de la obra y una sección de control donde no se producirá una profundización perceptible o significativa del cauce.

*Registro y almacenamiento:* la información de los levantamientos deberá ser adecuadamente registrada y almacenada en una base de datos administrada por la Central de Operaciones del sistema de monitoreo para poder ser consultada con facilidad y usada expeditamente.

*Análisis, generación y manejo de informes:* la información deberá ser procesada de modo que se disponga de un arreglo de perfiles perfectamente identificables, ordenados en forma correlativa a lo largo del cauce, que puedan ser utilizados para fines análisis tanto de las secciones transversales del cauce como de perfiles longitudinales.

*Mediciones esporádicas:* se debe efectuar un levantamiento de perfiles transversales que permita hacer un seguimiento del cauce durante crecidas, comparando su geometría y pendiente con la información previa disponible.

## 6.2 PLAN DE MITIGACIONES

### 6.2.1 Tipología de medidas de mitigación

El plan de mitigaciones incluye las tipologías de medidas asociadas a los posibles cambios o impactos adversos individualizados en cada caso a continuación, pudiendo ser éstas estructurales y no estructurales. Las primeras deberán definirse, diseñarse e implementarse en base a las recomendaciones del Manual de Carreteras del MOP u otras normas empleadas y aceptadas por la ingeniería nacional o extranjera.

- *MEM-1. Reducciones en las tasas de transporte sólido en suspensión de arenas y de fondo de rípios:* Si producto del monitoreo asociado a las variables relevantes se observan disminuciones mayores a las estimadas en las tasas de transporte en suspensión de arenas (VSR-1) y de fondo de rípios y sedimento grueso (VSR-2), se deberán materializar medidas de mitigación del Tipo MEM-1.
- *MEM-2. Reducciones en las tasas de transporte sólido de washload de finos (limo y arcillas):* En general la variable relevante VSR-3 (washload) experimentará modificaciones directamente asociadas a los cambios en los caudales del río, ya que la fuente de sedimento (erosión laminar de suelos) no será afectada por el proyecto. El cambio más evidente que experimentará VSR-3 será una disminución en la magnitud del gasto sólido en los tramos de cauce ubicados entre las captaciones y descargas, porque aquí el caudal líquido disminuirá. Aguas abajo de las restituciones, se producirá una dilución de las concentraciones una vez devuelta el agua turbinada al río.
- *MEM-3. Cambios en la morfología local del cauce por la ocurrencia de fenómenos de socavación:* Las socavaciones locales (VSR-3), provocados por un desequilibrio local entre la tasa de remoción de sedimento de un lecho fluvial y la tasa a la que se alimenta el material a un sector determinado del

cauce, pueden contrarrestarse utilizando medidas estructurales diversas como las que se describen a continuación.

- *MEM-4. Modificaciones en el perfil del lecho por la generación de fenómenos de degradación de cauces:* De detectarse variaciones importantes en las secciones transversales por efecto de la degradación de un cauce, medidas con cierta regularidad, debe verificarse si el proceso de estabilización está en curso y si no, implementar medidas de mitigación para evitar consecuencias adversas por excesiva profundización del cauce.
- *MEM-5. Situaciones derivadas que afecten infraestructura existente:* Esta medida va orientada a proteger específicamente infraestructura emplazada en el río, como, cepas y estribos de puentes y pasarelas, estructuras de bocatomas de riego, defensas fluviales, etc., la cual podría verse impactada por los efectos de las obras del PHAM.

### 6.2.2 Medidas de mitigación

- a) Medidas Tipo MEM-1 para mitigar cambios en el régimen de transporte sólido de arenas, rípios y sedimento grueso

*Operación optimizada de desarenadores y desripiadoras:* este tipo de medida no estructural consiste en realizar una operación destinada a conseguir una restitución más efectiva de sedimentos retenidos temporalmente en estructuras de desarenación y aguas arriba de las barreras de la bocatoma

*Manejo de acopios y restitución de sedimentos al cauce:* los trabajos de manejo de acopios y de restitución localizada de sedimento al cauce, tienen como objetivo lograr que el material devuelto al cauce quede efectivamente disponible para ser removido y transportado por la corriente, río abajo, especialmente en épocas de caudales mayores.

*Otra alternativa:* organizar y ejecutar labores periódicas de manejo del río con maquinaria, para reincorporar o trasladar sedimentos depositados sobre el lecho en zonas ubicadas aguas abajo de obras de toma o de descarga, de manera de asegurar un más efectivo arrastre durante eventos de crecidas.

- b) Medidas Tipo MEM-2 para mitigar cambios en el transporte de washload

*Medidas posibles:* Las medidas de mitigación Tipo MEM-2 serán básicamente de tipo no estructural, asociadas a acciones que permitan que parte del gasto sólido de washload sea recuperado, minimizando su eventual reducción, se limitarían a hacer más eficientes los procesos de limpieza y purga de desarenadores y desripiadoras, y eventualmente la limpieza y desagüe de componentes del sistema de conducción, en la medida que ello sea factible tanto por diseño de estas componentes como operativamente.

- c) Medidas Tipo MEM-3 aplicadas al control de socavaciones

*Revestimientos con hormigón:* la obra consiste en un revestimiento con hormigón en la zona socavada y al pie de la descarga, abarcando principalmente la zona socavada y el pie de ella.

*Revestimientos de enrocado:* Se compone de una doble capa de enrocado y un geotextil en toda la superficie revestida, separando el lecho de las unidades de enrocado, que permita rellenar y proteger el lecho en la zona socavada, evitando que el fenómeno progrese.

*Uso de muros guardarradier:* la finalidad de un muro guardarradier es restituir el fondo de un cauce socavado o degradado, imponiendo en una sección dada, localizada usualmente aguas abajo del sector afectado, un control transversal al escurrimiento y al movimiento de sedimentos.

d) Medidas Tipo MEM-4 aplicadas al control de degradaciones del lecho

*Recuperación del fondo del cauce:* es posible restituir la cota de fondo de un cauce que ha experimentado o está experimentando un proceso de degradación, mediante la construcción de muros guardarradier que favorecen la depositación de material aguas arriba de la estructura.

*Protecciones de estructuras adicionales o complementarias:* en los casos que se detecten, además, socavaciones en cepas o estribos de puentes, las mitigaciones en base a muros guardarradier pueden requerir reforzamientos locales construidos con coronas de enrocado. En situaciones de bocatomas afectadas o potencialmente afectadas por procesos erosivos, deberán implementarse medidas de mitigación en base a protecciones de enrocados y/o encauzamientos que direccionen adecuadamente el flujo evitando sectores donde existan cambios bruscos de dirección que den origen a procesos erosivos.

*Obras de encauzamiento:* es posible aplicar medidas de mitigación basadas en obras de encauzamiento, teniendo éstas como objetivo canalizar y ordenar el escurrimiento del flujo para mejorar la sección de escurrimiento y evitar el deterioro de las obras contiguas.

e) Medidas Tipo MEM-5 aplicadas al control de efectos no deseados en infraestructura emplazadas en lechos fluviales:

Estas de medidas son de tipo estructural, similar a las indicadas anteriormente, es decir protecciones locales, muros guardarradier y encauzamientos, entre otras.

## 7. RESUMEN DE CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 7.1 EVOLUCIÓN MORFOLÓGICA DE LOS CAUCES

- Se concluye que la variación de la forma y localización de los cauces que forman parte de la red de drenaje de la hoya alta del río Maipo, fue prácticamente nula en 5 décadas que abarcó al análisis hasta el año 2009.
- En aquellos casos en que se detectó un cambio, éste no se originó por crecidas, sino debido a dos sucesos puntuales como la construcción del embalse El Yeso en el río del mismo nombre y el aluvión que alteró el cauce del río Colorado en 1987

## 7.2 EFECTOS DEL PHAM SOBRE EL TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

Los que siguen a continuación presentan un resumen de los valores absolutos y relativos de las reducciones en los gastos sólidos de las distintas componentes asociadas al transporte de sedimento, que provocaría el PHAM en los principales cauces de la hoya alta del río Maipo hasta la sección donde se localiza la Bocatoma Independiente de Aguas Andinas y del Canal San Carlos.

En la interpretación de estos resultados debe tenerse presente que los cálculos y estimaciones para llevar a cabo la cuantificación de los efectos del PHAM sobre el transporte de los sedimentos, fueron realizados sobre escenarios muy conservadores, buscando siempre acotar superiormente dichos efectos.

### 7.2.1 Reducciones en los gastos sólidos efectivos de fondo

- Río Volcán: 0 - 0,06 mill ton/año en río Volcán en desembocadura
- Río Yeso: 0,05 - 0,12 mill ton/año (equivalente a un 42% de la reducción del valor esperado) en el río Yeso en desembocadura
- Río Colorado: 0,16 - 0,21 mill ton/año (equivalente a un 76% de la reducción del valor esperado) en el río Colorado en desembocadura
- En el río Maipo aguas arriba de la confluencia con el río Volcán: de 0 mill ton/año
- En el río Maipo aguas arriba de la confluencia con el río Yeso, de 0 – 0,1 mill ton/año En el río Maipo aguas abajo de la confluencia con el río Yeso, de 0,1 mill ton/año
- En el río Maipo aguas arriba de la confluencia con el río Colorado, de 0,1 mill ton/año
- En el río Maipo aguas arriba de Las Lajas, se producirían reducciones máximas en el gasto sólido efectivo de fondo, de 0,2 – 0,3 mill ton/año
- Hacia aguas abajo de la descarga Las Lajas, el gasto sólido efectivo de fondo del río Maipo no cambia con la entrada en operación del PHAM

### 7.2.2 Reducciones en los gastos sólidos en suspensión removidos del lecho

- Río Volcán: 0 - 0,06 mill ton/año en río Volcán en desembocadura
- Río Yeso: 0,01 - 0,06 mill ton/año
- Río Colorado: 0,11 - 0,34 mill ton/año
- En el río Maipo aguas arriba de la confluencia con el río Volcán: 0 mill ton/año
- En el río Maipo aguas arriba de la confluencia con el río Yeso: 0,1 – 0,5 mill ton/año
- En el río Maipo aguas abajo de la confluencia con el río Yeso: 0,2 – 0,9 mill ton/año
- En el río Maipo aguas arriba de la confluencia con el río Colorado: 0,3 - 0,9 mill ton/año
- En el río Maipo aguas arriba de Las Lajas, se producirían reducciones máximas de 0,4 – 1,5 mill ton/año
- En el río Maipo hacia aguas abajo de Las Lajas, el gasto sólido en suspensión no cambia con la entrada en operación del PHAM en razón que los caudales y condiciones hidráulicas que determinan el transporte de sedimentos del lecho, son los mismos para la situación actual sin PHAM y la situación futura con PHAM

### 7.2.3 Reducciones en los gastos sólidos totales removidos del lecho

- El efecto del PHAM sobre el transporte total de sedimentos del lecho, se circunscribe al tramo comprendido entre los puntos A3 (estero El Morado aguas arriba junta estero Colina) y D5 (río Maipo aguas arriba descarga Las Lajas) donde la mayor reducción probable en el gasto sólido total se produciría entre la confluencia del río Colorado y Las Lajas, con una magnitud del orden de 1,2 mill ton/año (valor medio del rango de valores recurrentes a esperados).
- Le siguen en importancia los puntos D3 (río Maipo aguas abajo junta Río Yeso) y D4 (río Maipo aguas arriba junta Río Colorado) con reducciones probables del orden de 0,7 mill ton/año y en tercer lugar, los puntos D2 (río Maipo aguas arriba junta Río Yeso) y C2 (río Colorado aguas arriba junta río Maipo) con órdenes de magnitud de 0,4 mill ton/año.
- Aguas abajo de Las Lajas (en el punto D6) no se produciría una reducción en el gasto sólido total.

### 7.2.4 Reducciones en los gastos sólidos de washload

- Río Volcán: 0 - 0,03 mill ton/año en río Volcán en desembocadura
- Río Yeso: no aporta washload significativo
- Río Colorado: 0,02 - 0,76 mill ton/año
- En el río Maipo aguas arriba de la confluencia con el río Volcán: 0,01 - 0,19 mill ton/año
- En el río Maipo aguas arriba de la confluencia con el río Yeso: 0,01 - 0,19 mill ton/año
- En el río Maipo aguas abajo de la confluencia con el río Yeso: 0,01 - 0,19 mill ton/año
- En el río Maipo aguas arriba de la confluencia con el río Colorado: 0,01 - 0,19 mill ton/año
- En el río Maipo aguas arriba de Las Lajas, se producirían reducciones máximas en el gasto sólido de washload, de 0,1 - 1,6 mill ton/año
- En el río Maipo aguas abajo de Las Lajas el washload se reduce de los actuales gastos sólidos de 0 - 2,8 mill ton/año a valores de 0 - 1,3 mill ton/año. Esta reducción se verifica a partir de la junta del río Colorado, sin cambiar aguas abajo de Las Lajas, bajando la concentración de los finos (menor turbiedad del agua) a partir de este punto

### 7.2.5 Interacción sedimentológica en sector Las Lajas y bocatomas La Sirena e Independiente

- Las bocatomas La Sirena e Independiente provocan un embanque en la zona inmediata aguas arriba de sus respectivas barreras, además que extraen un caudal significativo del río
- El sector entre la Descarga Las Lajas y la Bocatoma La Sirena (Sector D6(1)) y el sector siguiente de aguas abajo hasta la Bocatoma Independiente (Sector D6(2)), se produce una reducción en la tasa de transporte de arenas, ripios y gravas de 3,4 mill ton/año, en términos de valores esperados, cifra que representa el 52% de lo que transporta el río en el sector D6(1). En término de valores recurrentes, esta reducción alcanza a 0,2 mill ton/año cifra equivalente al 100% del transporte de aguas arriba.
- El PHAM solo cambiará el washload, reduciendo su valor esperado a 1,5 mill ton/año y su valor medio del rango a 0,8 mill ton/año, cifras que representan del orden de un 55% de los respectivos valores característicos.
- La Bocatoma Independiente provoca un embanque en la zona de aguas arriba de la barrera y compuertas del Canal San Carlos y de Aguas Andinas, por lo que el efecto del PHAM sería similar en

cuanto a la reducción del washload, pero no así en cuanto al arrastre de fondo ni en el transporte en suspensión, ya que éstos quedarán esencialmente condicionados por las descargas de los sedimentos de la bocatoma La Sirena, lo que podría resultar en procesos alternados de degradación temporal y de sedimentación asociados estos últimos al paso de crecidas en el río.

### 7.3 SOCAVACIÓN LOCAL AL PIE DE LA DESCARGA LAS LAJAS Y BOCATOMAS DEL PHAM

- Los cálculos de las profundidades y de las dimensiones en planta de las fosas de socavación al pie de la descarga Las Lajas en el río Maipo y al pie de las obras de las bocatomas del PHAM (incluyen el canal de descarga de emergencia del canal de aducción como asimismo las barreras móviles y fijas), señalan que las magnitudes de estas variables, son en general poco significativas puesto que representan profundidades del orden de 1 a 1,5 m como máximo

### 7.4 DEGRADACIÓN AGUAS ABAJO DE LAS OBRAS DEL PHAM

- Estero El Morado: la degradación será nula para cualquier condición y escenario hidrológico
- Estero Las Placas: proceso de degradación poco significativo con una profundización de 0,7 m, y extensión de 5 km.
- Estero Colina: proceso de degradación escasamente significativo con profundización de 1,3 m y extensión de 3,5 km.
- Estero La Engorda: proceso de degradación poco significativo con profundidades máximas de 0,6 m y una longitud 2 km.
- Río Yeso: degradación con profundidades máximas de 3,2 m y extensión de 2,8 km
- Río Maipo en Las Lajas: proceso de degradación escasamente significativo con una profundidad máxima cercana a 1 m, sin considerar el límite impuesto aguas abajo por de la barrera de la bocatoma del Canal La Sirena ubicada a 1,2 km de la descarga.

### 7.5 EFECTOS SEDIMENTOLÓGICOS DE LAS CENTRALES GUAYACÁN Y EL CANELO Y EL PHAM

#### 7.5.1 Central Guayacán

##### a) Efecto sobre la capacidad de transporte de fondo

- Reducción de la capacidad de arrastre de sedimentos de un 31%, lo que implica disminuciones de 0,51 millones de ton/año, en el tramo entre la bocatoma y la restitución (PC2).
- Reducción adicionales por efecto del PHAM en las tasas potenciales de arrastre, de 0,21 mill ton/año (18%).

##### b) Efecto sobre el de transporte de sedimento del lecho

- Reducción incremental que genera el PHAM en los valores esperados de 0,24 a 0,29 mill ton/año
- Reducción incremental de los valores recurrentes de 90% de excedencia, de 0,06 a 0,31 mill ton/año
- Las cifras medias del rango (valor recurrente-valor esperado), corresponden a 0,15 mill ton/año aguas arriba de la bocatoma (PC1) 0,16 mill ton/año para el tramo entre la bocatoma y la restitución (PC2) y 0,30 mill ton/año aguas abajo restitución (PC3).

Estudio Sedimentológico Avanzado

- c) Efecto sobre el de transporte de sedimento de washload
- Reducción incremental de los valores esperados de gastos sólidos de washload, causada por el PHAM de 0,4 a 0,5 mill ton/año en los PC1, PC2 y PC3.
  - Reducción para los valores recurrentes de 90% de excedencia, dentro del rango de 0,01 a 0,02 mill ton/año
  - Reducción media del rango (valor recurrente-valor esperado) de 0,26 mill ton/año en PC1; 0,19 mill ton/año en PC2 y 0,26 mill ton/año en PC3.
- d) Degradación aguas abajo de la restitución
- Profundidad máxima de 4 a 6 m, con un tiempo de estabilización entre 40 y 45 años
  - Extensión de la cuña entre 2 y 4 km, con un tiempo de estabilización de 10 a 45 años.
- e) Socavación al pie de la obra de descarga de la central Guayacán
- Profundidad de la fosa de 3,5 m
  - Longitud de la fosa, menor a 15 m
  - Ancho de la fosa de 11 m, aproximadamente

### 7.5.2 Central El Canelo

- a) Efectos sobre el transporte de sedimentos del lecho
- Reducción incremental en el valor medio del rango valor recurrente-valor esperado de la capacidad de arrastre con el PHAM de 0,15 mill ton/año (20%) en EC1 (aguas arriba de la bocatoma); de 0,72 mill ton/año (42%) en EC2 (aguas abajo antes de la restitución); y de 1,1 mill ton/año (36%) en EC3 (aguas abajo de la restitución).
  - Reducciones en el transporte total de sedimento del lecho en EC1, 0,17 mill ton/año equivalente a un 20%; en EC2, 0,53 mill ton/año equivalente a un 40%; en EC3; 1,2 mill ton/año equivalente a un 34%.
- b) Efectos sobre el de transporte de sedimento de washload
- Reducción incremental de valores esperados causada por el PHAM de 0,28; 0,89; y 1,17 mill ton/año (reducciones relativas de 23%, 45% y 41%) en los puntos EC1, EC2 y EC3, respectivamente, en los puntos EC1, EC2 y EC3, respectivamente
  - Reducción incremental de valores recurrentes de 90% de excedencia, de 0,01; 0,07 y 0,1 mill ton/año (reducciones relativas de 50%, 88% y 59%), en los mismo puntos.
  - Reducción incremental de valores medios del rango equivalentes corresponden a 0,15 mill ton/año (24%) en EC1; 0,48 mill ton /año (47%) en EC2; y 0,64 mill ton /año (43%) en EC3.
- c) Degradación del cauce del río Maipo aguas abajo de la restitución de la central
- Profundidad máxima de degradación del lecho de 0,16 m
  - Extensión de la cuña hacia aguas abajo, de 25 km, en 50 años

## 7.6 PROGRAMA DE MONITOREO

- *Red de monitoreo:* integral y global ya que persigue capturar información en distintos puntos de la cuenca, dentro del área de influencia del PHAM, involucrando en la medición y seguimiento de las variables, a otros actores importantes que hacen uso de los recursos hídricos y pétreos del río Maipo y sus afluentes, además del PHAM.
- *Variables sedimentológicas relevantes:*
  - VSR-1: Transporte sólido en suspensión de arenas removidas del lecho
  - VSR-2: Transporte sólido fondo de rípios y sedimento grueso
  - VSR-3: Transporte sólido de washload de limos y arcillas
  - VSR-4: Socavación local
  - VSR-5: Degradación de los cauces
  - VSR-6: Otras variables relevantes
- *Medición de variables relevantes:* realizada de forma estandarizada, siguiendo preferentemente los manuales de procedimiento que recomiendan la forma y el método de medición como además, los sistemas de registro y sistematización de la información.
- *Base de datos:* resultados del programa de monitoreo deberán consolidarse en una base de datos para consultas, procesamiento, interpretación y análisis de la información con el objetivo de poder cuantificar la evolución, rangos de las variables, tendencias, etc.,
- *Manuales de procedimiento:* los procedimientos de medición, registro y análisis quedarán consignados en manuales de monitoreo de cada una de las variables sedimentológicas relevantes.

## 7.7 PLAN DE MITIGACIONES PROPUESTO

- *Tipos de medidas de mitigación:*
  - Tipo MEM-1: Tasas de transporte sólido en suspensión de arenas y de fondo de rípios
  - Tipo MEM-2: Tasas de transporte sólido de washload de finos (limo y arcillas)
  - Tipo MEM-3: Morfología local del cauce por la ocurrencia de fenómenos de socavación
  - Tipo MEM-4: Perfil del lecho por la generación de fenómenos de degradación de cauces
  - Tipo MEM-5: Situaciones derivadas que afecten infraestructura existente
- *Ejemplos de medidas de mitigación para reducciones en el transporte de sedimentos:*

### *Operación optimizada de desarenadores y desrapiadoras:*

- Manejo de acopios y restitución de sedimentos al cauce:
- Acciones de recuperación parcial gasto sólido de washload como eventual limpieza y desagüe de componentes del sistema de conducción.

- *Ejemplos de medidas de mitigación para control de socavaciones y degradaciones:*
  - Revestimientos con hormigón
  - Revestimientos de enrocado
  - Muros guardarradier
  - Obras de encauzamiento