



UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

**EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS DE REDUCCIÓN DEL VOLUMEN PARA  
ALMACENAMIENTO DE SEDIMENTOS APORTANTES A EMBALSES DE  
RIEGO MAYORES. APLICACIÓN A UN CASO EN CHILE**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

**ANGELA PATRICIA FUENTES NORAMBUENA**

PROFESOR GUÍA:

ENRIQUE KALISKI KRIGUER

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

ALEJANDRO LÓPEZ ALVARADO

ALDO TAMBURRINO TAVANZIS

**SANTIAGO DE CHILE**

**2018**

EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS DE REDUCCIÓN DEL VOLUMEN PARA  
ALMACENAMIENTO DE SEDIMENTOS APORTANTES A EMBALSES DE RIEGO  
MAYORES. APLICACIÓN A UN CASO EN CHILE

La sedimentación en los embalses se produce por la disminución de la velocidad del flujo y el aumento del ancho del cauce, debido a la presencia de la presa, con lo cual se generan sedimentos gruesos que se depositan primero y sedimentos finos que se depositan al final, más cerca del pie de la presa. El volumen que se define para almacenar la sedimentación de los embalses, determina las dimensiones de la presa y otras obras. Hay casos en que la tasa de producción de sedimentos de la cuenca aportante es alta y aumenta los costos del proyecto, por la gran magnitud del volumen muerto que se debe considerar durante la vida útil del embalse.

Con el propósito de reducir el volumen muerto de un embalse de riego y disminuir los correspondientes costos de las obras asociadas, se presentan cinco alternativas, que se dividen en los tres grupos siguientes: (i) reducir el aporte de sedimentos; (ii) pasar los sedimentos hacia aguas abajo del embalse; y (iii) extraer los sedimentos ya depositados.

Para reducir el aporte de sedimento al embalse, se consideró el controlar con vegetación en la cuenca aportante, ya sea con especies nativas o exóticas. La otra alternativa es la construcción de pequeños muros llamados *Sabo Dam*, aguas arriba de la presa del embalse. Para pasar los sedimentos hacia aguas abajo del embalse, existen varias técnicas. En este caso, se analizó el *Flushing*, que consiste en vaciar el embalse. Para extraer los sedimentos ya depositados, se considera la extracción mecánica con excavadoras y el dragado con una draga hidráulica, para luego transportar los sedimentos a un botadero. En Chile existe una gran cantidad de embalses de riego, de los cuales, para este informe se presenta un análisis de los cuatro embalses mayores de riego siguientes: Embalse Chironta, Embalse Chalinga, Embalse Chacrillas y Embalse Ancoa. Como resultado del análisis de la información existente de dichos embalses, se seleccionó al Embalse Chacrillas, ubicado en la Región de Valparaíso, como el caso en estudio, debido a la información disponible y la ubicación que posee una gran superficie sin cobertura vegetal.

Los resultados de la aplicación de las alternativas al Embalse Chacrillas, realizando un cálculo del VAN en la vida útil de 50 años del embalse, demuestran que reforestar con vegetación nativa o exóticas reduce más los costos, llegando a un 2% menos que la inversión total y junto al *Flushing* que reduce un 2,5% los costos. La construcción de *Sabo Dam* de enrocado, también disminuyen los costos en menor cantidad. Finalmente, la alternativa de dragado aumenta considerablemente los costos del embalse. Los principales impactos ambientales son positivos al disminuir las dimensiones de la presa y vertedero y disminuir el área de inundación, además de reforestar con árboles nativos. El principal impacto ambiental negativo es el comportamiento de la descarga de sedimentos aguas abajo del embalse en el *flushing*

## **Agradecimientos**

A mi familia por ayudarme toda la carrera, a mi mamá y papá, y mis hermanas, tíos y abuelos por apoyarme siempre.

A Felipe por acompañarme desde la mitad de la carrera hasta ahora. A mis amigas de toda la vida, a mis amigos de U, los primeros años de plan común a los “Tratorizados”, cuando entré a civil al gran “Team Pinga”, y finalmente en la última etapa a los compañeritos hidráulicos de estudio, de salita.

A los profesores de la comisión, por hacer posible esto, al profe Kaliski por ayudarme en esto.

# Tabla de contenido

|             |   |    |
|-------------|---|----|
| Capítulo 1. | Introducción .....  | 1  |
| 1.1.        | Motivación.....   | 1  |
| 1.2.        | Objetivos .....   | 2  |
| 1.2.1.      | Objetivo General.....   | 2  |
| 1.2.2.      | Objetivos Específicos.....                                      | 2  |
| 1.3.        | Organización del documento .....                                | 3  |
| Capítulo 2. | Revisión Bibliográfica.....                                     | 4  |
| 2.1.        | Sedimentación embalse .....                                     | 4  |
| 2.2.        | Cálculo del aporte de sedimentos.....                           | 5  |
| 2.3.        | Factores a considerar el problema de sedimentación .....        | 6  |
| 2.4.        | Análisis embalses en Chile .....                                | 7  |
| Capítulo 3. | Metodologías de alternativas de reducción de sedimentación..... | 11 |
| 3.1.        | Reducción de aportes.....                                       | 12 |
| 3.1.1.      | Control erosión del suelo.....                                  | 12 |
| 3.1.2.      | Tranque de retención o Sabo Dam.....                            | 18 |
| 3.2.        | Pasar sedimentos.....   | 21 |
| 3.2.1.      | Flushing.....   | 21 |
| 3.3.        | Extracción de sedimentos .....                                  | 24 |
| 3.3.1.      | Dragado .....   | 24 |
| 3.3.2.      | Extracción mecánica.....  | 26 |
| Capítulo 4. | Resultados y análisis .....                                     | 29 |
| 4.1.        | Elección de Embalse para desarrollar alternativas .....         | 29 |
| 4.2.        | Descripción de la zona de estudio.....                          | 36 |
| 4.3.        | Control de erosión con vegetación .....                         | 39 |
| 4.4.        | Sabo Dam.....   | 44 |
| 4.5.        | Flushing.....   | 52 |
| 4.6.        | Dragado .....   | 55 |
| 4.7.        | Extracción mecánica.....  | 56 |
| 4.8.        | Resumen resultados finales.....                                 | 57 |
| Capítulo 5. | Conclusiones y recomendaciones .....                            | 62 |
| Capítulo 6. | Bibliografía.....   | 64 |
| Capítulo 7. | Anexos .....  | 67 |

## Índice de Figuras Informe

|   |    |
|---|----|
| Figura 2.1-1: Esquema delta de sedimento de un río al llegar a embalse Fuentes (Lecaros, 2011)..... | 5  |
| Figura 2.4-1: Esquema de la disposición de las alturas relevantes en un embalse.....                | 8  |
| Figura 3-1: Esquema conceptual de las alternativas presentadas.....                                 | 11 |
| Figura 3.3.1-1: Draga hidráulica.....   | 25 |
| Figura 3.3.2-1: A la izquierda Excavadora, a la derecha retroexcavadora. ....                       | 26 |
| Figura 3.3.2-2: Rendimiento excavadoras hidráulicas. ....   | 27 |
| Figura 4.2-1: Localización Embalse Chacrillas.....  | 36 |
| Figura 4.2-2: Ubicación Embalse Chacrillas y afluente Río Rocín.....                                | 37 |
| Figura 4.3-1: Cobertura de suelo cuenca del Embalse Chacrillas.....                                 | 39 |
| Figura 4.4-1: Ubicación adecuadas para construir Sabo Dam. ....                                     | 45 |
| Figura 4.4-2: Curva volumen/Cota Sabo Dam 1. ....   | 45 |
| Figura 4.4-3: Curva volumen/Cota Sabo Dam 2. ....   | 46 |
| Figura 4.4-4: Curva volumen/Cota Sabo Dam 3. ....   | 46 |
| Figura 4.4-5: Curva volumen/Cota Sabo Dam 4. ....   | 46 |
| Figura 4.4-6: Curva volumen/Cota Sabo Dam 5. ....   | 47 |
| Figura 4.4-7: Ubicación Sabo Dam's.....   | 48 |
| Figura 4.4-8: Vista longitudinal Canal Teno Chimbarongo.....  | 49 |
| Figura 4.4-9: Ilustración diseño del muro de hormigón.....  | 50 |
| Figura 4.5-1: Sección Túnel de desvío. ....   | 53 |

## Índice de Tablas Informe

|  |    |
|--|----|
| Tabla 1-1 Resumen estudios de sedimentación realizados en Chile .....                        | 6  |
| Tabla 2.4-1: Alturas relevantes y volúmenes de embalses en Chile. ....                       | 9  |
| Tabla 2.4-2: Coeficientes de altura de volumen muerto para distintos embalses.....           | 9  |
| Tabla 3.1.1-1: Factor K según textura de suelo y contenido de materia orgánica.....          | 14 |
| Tabla 3.1.1-2: Factor m según pendiente.....   | 14 |
| Tabla 3.1.1-3: Valores para C (Mancilla, 2008).....  | 15 |
| Tabla 3.1.1-4: Valores del Factor C.....   | 15 |
| Tabla 3.1.1-5: Factor C para áreas de bosques alterados. ....                                | 16 |
| Tabla 3.1.1-6: Valores del Factor P.....   | 16 |
| Tabla 4.1-1: Cuadro resumen elección de alternativa de embalse. ....                         | 34 |
| Tabla 4.2-1: Resumen sedimentos retenidos por embalse. ....                                  | 38 |
| Tabla 4.3-1: Resumen resultados método Owen y Branson.....                                   | 40 |
| Tabla 4.3-2: Valores utilizados para el cálculo de FUPS.....                                 | 41 |
| Tabla 4.3-2: Resumen resultados FUPS.....  | 41 |
| Tabla 4.3-3: Costo expropiación. ....  | 41 |
| Tabla 4.3-4: Resumen escenarios de área a reforestar.....                                    | 42 |
| Tabla 4.3-5: Costos de especies nativas y exóticas.....                                      | 42 |
| Tabla 4.3-6: Resumen costos de implementar vegetación exótica y nativa.....                  | 43 |
| Tabla 4.4-1: Volumen acumulado según altura muro.....  | 47 |
| Tabla 4.4-2: Gasto sólido de fondo, Embalse Chacrillas. ....                                 | 47 |
| Tabla 4.4-3: Costos enrocado. ....   | 49 |
| Tabla 4.4-4: Resumen dimensiones enrocado.....   | 49 |
| Tabla 4.4-5: Resumen dimensiones Muro de hormigón. ....                                      | 50 |
| Tabla 4.4-6: Resumen costos de implementar Sabo Dam de hormigón y enrocado. ....             | 51 |
| Tabla 4.5-1: Resumen costos Flushing. ....   | 54 |
| Tabla 4.8-1: Análisis de sensibilidad de los costos alternativas a nivel de perfil. ....     | 59 |
| Tabla 4.8-2: Resumen impactos ambientales producidos por las alternativas<br>planteadas..... | 61 |
| Tabla 4.8-3: Resumen impactos ambientales producidos por las alternativas<br>planteadas..... | 6  |

## Índice de Anexos Informe

|  |    |
|--|----|
| Anexo I: Curva de embalse Embalse Chacrillas.....  | 67 |
| Anexo II: Flujo de caja Alternativa control con vegetación especie nativa 40% (dólar observado \$691 el 29 octubre 2018).....  | 68 |
| Anexo III: Flujo de caja Alternativa control con vegetación especie nativa 30% (dólar observado \$691 el 29 octubre 2018)..... | 69 |
| Anexo IV: Flujo de caja Alternativa control con vegetación especie nativa 20% (dólar obs. \$691 el 29 octubre 2018). ....      | 70 |
| Anexo V: Flujo de caja Alternativa control con vegetación especie nativa 40% (dólar observado \$691 el 29 octubre 2018).....   | 72 |
| Anexo VI: Flujo de caja Alternativa control con vegetación especie nativa 30% (dólar observado \$691 el 29 octubre 2018).....  | 73 |
| Anexo VII: Flujo de caja Alternativa control con vegetación especie nativa 20% (dólar observado \$691 el 29 octubre 2018)..... | 74 |
| Anexo VIII: Flujo de caja Sabo Dam muro de hormigón 1 muro (dólar observado \$691 el 29 octubre 2018).....                     | 76 |
| Anexo IX: Flujo de caja Sabo Dam muro de hormigón 2 muro (dólar observado \$691 el 29 octubre 2018).....                       | 77 |
| Anexo X: Flujo de caja Sabo Dam muro de enrocado 1 muro (dólar observado \$691 el 29 octubre 2018).....                        | 78 |
| Anexo XI: Flujo de caja Sabo Dam muro de enrocado 1 muro (dólar observado \$691 el 29 octubre 2018).....                       | 80 |
| Anexo XII: Flujo de caja Flushing (dólar observado \$691 el 29 octubre 2018). ....   | 81 |
| Anexo XIII: Flujo de caja Extracción mecánica (dólar observado \$691 el 29 octubre 2018). ....                                 | 82 |
| Anexo XIV: Flujo de caja Dragado (dólar observado \$691 el 29 octubre 2018).....   | 84 |

# Capítulo 1. Introducción

## 1.1. Motivación

En el diseño de un embalse mayor o Tipo C, según se define en Decreto Supremo MOP N° 50 de 2015, esto es, con altura de muro igual o mayor a 30 metros o capacidad de almacenamiento igual o mayor a 60 millones de metros cúbicos, uno de los aspectos relevantes es la determinación del volumen de sedimentos que quedarán almacenados durante su vida útil, lo que también se denomina como “volumen muerto”. Cabe destacar que la presente memoria acota el estudio a embalses de riego, cuyo fin es tener un mayor volumen útil para almacenar agua con fines de regadío y/o uso consuntivo del agua.

La relevancia del volumen muerto, radica en que éste se debe restar de la capacidad total de almacenamiento de un embalse, para obtener el volumen disponible para ser utilizado, lo que es denominado como volumen útil. De esta forma, para una capacidad total de un embalse definida, a mayor volumen muerto, menor será su volumen útil. En consecuencia, en los proyectos en que, de acuerdo con el tipo y cantidad de sedimentos que almacene el embalse, resulta un volumen muerto muy alto, el muro del embalse resulta de mayor altura y, por lo tanto, de mayor costo para mantener un volumen útil.

En Chile, han sido pocos los embalses en que se ha podido medir el volumen de sedimentos acumulados, después de un período de operación, como para estimar factores que inciden en el cálculo del volumen muerto del embalse, tales como la capacidad de retención del embalse y la tasa de erosión de la cuenca, entre otros. Al respecto, se destaca las mediciones realizadas en el Embalse Cogotí, IV Región (López, Arrau y Núñez, 1993), en el Embalse Rapel VI Región realizada por ENDESA (2010) y en el Embalse Paloma, IV región realizado por Arrau Ingeniería EIRL (2016). Con estas mediciones, se ha demostrado que la magnitud que ha tenido el volumen acumulado de sedimentos en dichos embalses, en el período de operación analizado, en cada caso ha sido muy importante. Por ejemplo en el Embalse Cogotí en 50 años el volumen de sedimento alcanza los 23 millones de  $m^3$  (Filosa, 2017).

Las mediciones de sedimento en los embalses mencionados han hecho surgir la inquietud por la gran incidencia del Volumen Muerto en los costos finales de las obras asociadas del embalse, como el muro de la presa y las obras de entrega de agua.

El proceso de sedimentación se puede explicar con dos distribuciones distintas, primero el sedimento llega aguas arriba del embalse y el material más grueso se deposita y acumula; luego desde el punto de sumergencia, se produce una corriente de turbidez con el sedimento fino que avanza por debajo, hasta en algunos casos, el muro del embalse (Gracia, 1986).

En Chile se ha demostrado que el mayor tipo de sedimento que produce problemas de sedimentación es el fino, con alrededor de 87,6% en el río Aconcagua (Gajardo, 2003).



Las técnicas para disminuir los sedimentos se clasifican en tres grandes grupos: el primero es reducir la producción de sedimentos antes que llegue al embalse, donde la principal medida es reducir la erosión del cauce con vegetación como bosques o atrapar el sedimento antes que sea arrastrado al embalse, con estructuras pequeñas que retengan distintos tamaños de grano.

El segundo grupo, se refiere a pasar los sedimentos a través de la presa, reduciendo el nivel del embalse durante crecidas, descargando corrientes de turbiedad o pasarlos alrededor del embalse mediante un canal de crecidas o un túnel.

Finalmente, el tercer grupo es simplemente remover los sedimentos una vez que están depositados, con excavación en seco o dragado.

## **1.2. Objetivos**

### **1.2.1. Objetivo General**

Realizar una evaluación técnica y económica de alternativas de manejo y de almacenamiento de los sedimentos aportantes a embalses de riego mayores, a nivel de perfil (etapa de la ingeniería antes de la pre-factibilidad, con alto nivel de incertidumbre en costos), con el propósito de prolongar su vida útil y disminuir los costos de construcción de las obras asociadas.

### **1.2.2. Objetivos Específicos**

- Plantear una metodología general para la evaluación de alternativas de reducción del volumen muerto de embalses mayores, sobre la base de métodos de cálculo disponibles.
- Realizar una aplicación de la metodología planteada a un caso en Chile, con el objetivo de probar la metodología y concluir si la aplicación de estas medidas genera una disminución en los costos totales del embalse.
- Identificar los posibles impactos ambientales atribuibles a alternativas de reducción del volumen muerto de embalses mayores.

### **1.3. Organización del documento**

A continuación, se describe brevemente el contenido de los capítulos siguientes:

- i. Capítulo I “Introducción”: Se expone la motivación y objetivos del trabajo junto a la estructura del informe.
- ii. Capítulo II “Revisión Bibliográfica”: Se presentan los fundamentos teóricos que avalan el trabajo realizado.
- iii. Capítulo III “Metodología de trabajo”: Se describen las metodologías de las alternativas.
- iv. Capítulo IV “Resultados y discusión”: Se describe como se escoge el ejemplo de caso de estudio en Chile, la descripción de la zona de estudio del Embalse escogido y se muestran los resultados más destacados de cada alternativa.
- v. Capítulo V “Conclusiones y recomendaciones”: Se presentan las principales conclusiones logradas en base a los resultados. A su vez, se plantean recomendaciones para futuros trabajos atinentes.

## Capítulo 2. Revisión Bibliográfica

### 2.1. Sedimentación embalse

Con el tiempo, los embalses acumulan sedimentos que se clasifican en finos y gruesos, los gruesos se depositan en todo el vaso del área de inundación, en cambio los finos en la zona más próxima al muro del embalse. Por lo anterior es necesario diseñar un muro más alto, tal que cubra la altura del material sedimentado durante la vida útil.

Un poco más abajo del nivel del muro se construye el vertedero que permite la descarga de crecidas para la seguridad de la obra. Además, se construye un desagüe de fondo, que generalmente es una tubería que atraviesa el muro del embalse, y permite vaciar el embalse ante una emergencia, la que también puede utilizarse para descargar sedimentos.

Al volumen de sedimentos acumulado en la presa se le llama “*volumen muerto*”, y muchas veces se alcanza antes de lo previsto, por lo que es necesario disminuir el volumen de sedimentación. En general con un 50% de pérdida de capacidad, el embalse tendrá serios problemas para cumplir su función (Morris et al, 2015).

Al imponer un obstáculo al río, en este caso, una presa, se origina una disminución de la velocidad aguas arriba y por lo tanto un estancamiento del flujo. El proceso se explica mediante el siguiente mecanismo (Gracia, 1986):

Al entrar la corriente al embalse, se deposita el material grueso debido a la disminución de la velocidad que se genera por ampliar el cauce, el espacio donde se acumula este sedimento es llamado delta. El sedimento más fino continua en la corriente hacia adentro del vaso y se le denomina “*corriente de turbidez*” que posteriormente se deposita en el fondo.

La corriente de turbidez se genera por la diferencia de densidad del fluido inmóvil y la corriente. Como la corriente tiene mayor densidad por los sólidos en suspensión presentes, las fuerzas gravitacionales superan a las inerciales y se genera una inmersión del flujo, y las partículas son transportadas por la turbulencia. Tal corriente puede avanzar hasta el muro de la presa y como puede ser un flujo subcrítico se condiciona con la condición de borde aguas abajo, y puede generarse una corriente estancada o simplemente detenerse antes de llegar al muro del embalse.

Para pendientes suaves, es difícil suponer que la corriente llegue al muro, es más común que esto ocurra en pendientes fuertes con flujos supercríticos y que el muro produzca un resalto (Balbontín, 2013). Se considera eficiente para la descarga del sedimento fino que llega al pie del muro del embalse y el que viene con el agua descargar.

En el caso de que se produzca la corriente de turbidez hasta el muro, se sugiere descargar la corriente a través del muro. Los sedimentos finos se depositan mayormente aguas arriba del muro y para esto es necesario construir el muro más alto, tal que cubra la altura de material sedimentado.

El proceso anterior depende de factores como la temperatura, las dimensiones, el aporte de sedimentos (que depende de la tasa de erosión de la cuenca aportante) de la cuenca y la operación del embalse.

Por ejemplo, si la presa no es muy grande probablemente el delta ocupe gran parte del vaso con sedimento grueso, ya que el material fino no será retenido.

La Figura 2.2-1 muestra un esquema de un delta de sedimento de un río al llegar a un embalse, justo antes del pie de la presa.

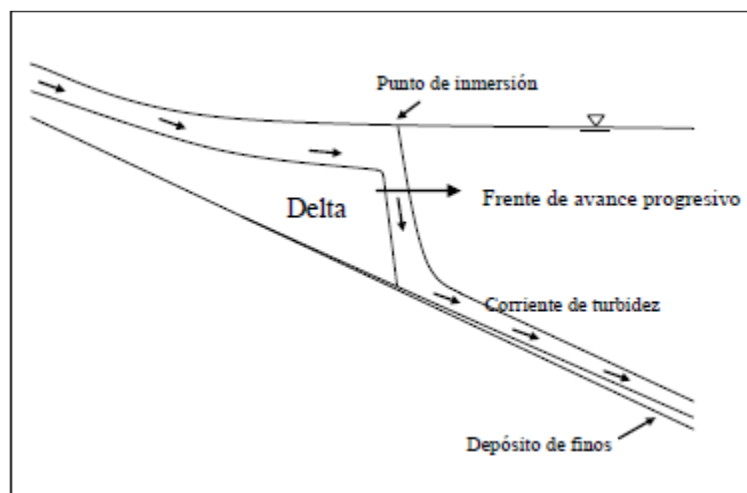


Figura 2.1-1: Esquema delta de sedimento de un río al llegar a embalse Fuentes (Lecaros, 2011).

## 2.2. Cálculo del aporte de sedimentos

Existen diversos procedimientos para calcular el aporte de los sedimentos que se generan:

- **Medición directa:** se realiza mediante fotografía aérea y levantamiento topográfico cuando el vaso del embalse se vacía.
- **Predicción del transporte:** Para el material de lavado se realizan aforos de caudal y con las muestras se puede calcular directamente el gasto sólido de fondo y de suspensión.
- **Criterios de predicción:** Cuando el embalse aún no se construye o no se tiene la información suficiente, se desarrollaron métodos que requieren de las características de la cuenca y régimen de las lluvias. Se utiliza el criterio Fórmula Universal de Pérdida de Suelos (FUPS) (Mancilla,2008)

En Chile se han calculados los sedimentos del Embalse Rapel (Lecaros, 2011) comparando métodos empíricos y una simulación en MOSSEM (que es un modelo numérico capaz de simular el avance de un delta desarrollado por González (2006)).

Además, se calculó el volumen muerto mediante una comparación de las batimetrías medidas con 45 años de diferencia en el Embalse La Paloma y Cogotí.

Los resultados de los estudios citados se resumen en la Tabla 2.2-1.

Tabla 2.2-1 Resumen estudios de sedimentación realizados en Chile.

|                   | <b>Volumen muerto de diseño [hm<sup>3</sup>]</b> | <b>Volumen medido [hm<sup>3</sup>]</b> |
|-------------------|--|--|
| Embalse La Paloma | 11   | 9,5                                    |
| Embalse Cogotí    | 14   | 23                                     |

Fuente: (1) "Estudio sedimentación en embalse La Paloma, Región de Coquimbo" Enzo Filosa, 2017.

## **2.3. Factores a considerar el problema de sedimentación**

- Determinar el aporte de sedimento

Se puede determinar con mediciones de campo o criterios de predicción. Entre los modelos empíricos para el transporte de fondo se encuentra la relación de Meyer Peter & Müller que considera el gasto sólido adimensional como una función de la diferencia entre el esfuerzo de corte crítico adimensional y un valor de referencia para el cual comienza a producirse el arrastre (Meyer-Peter & Müller, 1948).

- Determinar la eficiencia de atrape

Es el cociente entre la cantidad de sedimento depositado y la cantidad total de material que llega al embalse El criterio más usado es el de Brune (Gracia, 1986), y está basado en un estudio a 44 embalses normalmente que se encuentran normalmente llenos, se determina la relación entre eficiencia de atrape y capacidad total. Depende de las características del sedimento, el tiempo de permanencia y el tipo de obra de toma. También existe el método de Brown (Gracia, 1986), que calcula la eficiencia utilizando el área de la cuenca y la capacidad total del embalse.

- Análisis del material que entra al embalse

Conocer características fisicoquímicas del material porque ellas determinan el comportamiento dentro del embalse. También es importante determinar la cantidad de material grueso y fino que entrará al embalse, se define como material fino el que su diámetro es menor a 2 mm.

- Determinación del delta

Se requieren métodos empíricos para su aproximación. Si el material grueso es el principal problema se requieren métodos analíticos para determinar su evolución en el

vaso. Además, es necesario disponer de características topográficas del vaso, y algún criterio de hidráulica fluvial, que asocie transporte de sedimentos con las características hidráulicas de la corriente. (Gracia, 1986)

- Ubicación del sedimento dentro del vaso

Permite definir donde habrá disminución de velocidad y prever la magnitud del daño que puede generar el depósito de sedimentos. En general para pendientes más suaves, los sedimentos se depositan en la entrada del vaso. En cambio, para pendientes más fuertes, ocurre cerca de la presa.

Los principales criterios son empíricos:

1. **Método de reducción área de Borland y Miller:** Se clasifica el embalse en cuatro tipos según la pendiente de la recta que arroja el gráfico escala log de la elevación versus capacidad. Es un método empírico que requiere de pocos datos, se calcula la nueva elevación del fondo (Gracia, 1986).
2. **Método de incremento de área:** Consiste en simular la pérdida de área según la elevación de los niveles de agua (Gracia, 1986).

- Compactación del material dentro del embalse

Esta compactación hace disminuir el volumen depositado. Depende del tamaño de sedimento principalmente. Existen métodos como el de Miller que consiste en determinar la compactación de una cantidad de años. El método más común es el de Lara y Pemberton (Gracia, 1986).

- Tasa de erosión

Existen dos métodos principales: la tabla promedio de E.E.U.U. que muestra el aporte de sedimentos en función del tamaño de la cuenca. También el método de la USBR que propone una ecuación con el área de la cuenca.

## 2.4. Análisis embalses en Chile

Para esquematizar la distribución de alturas en un embalse, se presenta la Figura 2.4-1, junto a la descripción de cada altura presente.

**Hmuerto (m):** Altura desde la cota del cauce natural, hasta la cota del umbral de la torre de toma o cota de captación de las aguas que entrega el embalse.

**Hútil (m):** Altura entre la cota del umbral de la torre de toma y la cota de aguas máximas normales o máxima de operación del embalse, lo cual define el volumen útil del embalse, esto es, el volumen que se contabiliza para la operación.

**Hrevanchas:** Altura entre la cota de aguas máximas normales y la cota de coronamiento del embalse.

**Htotal:** Es la altura entre cota del cauce natural y la cota de coronamiento del embalse, que corresponde a:

$$H_{total} = H_{muerto} (m) + H_{útil} (m) + H_{revanchas}$$

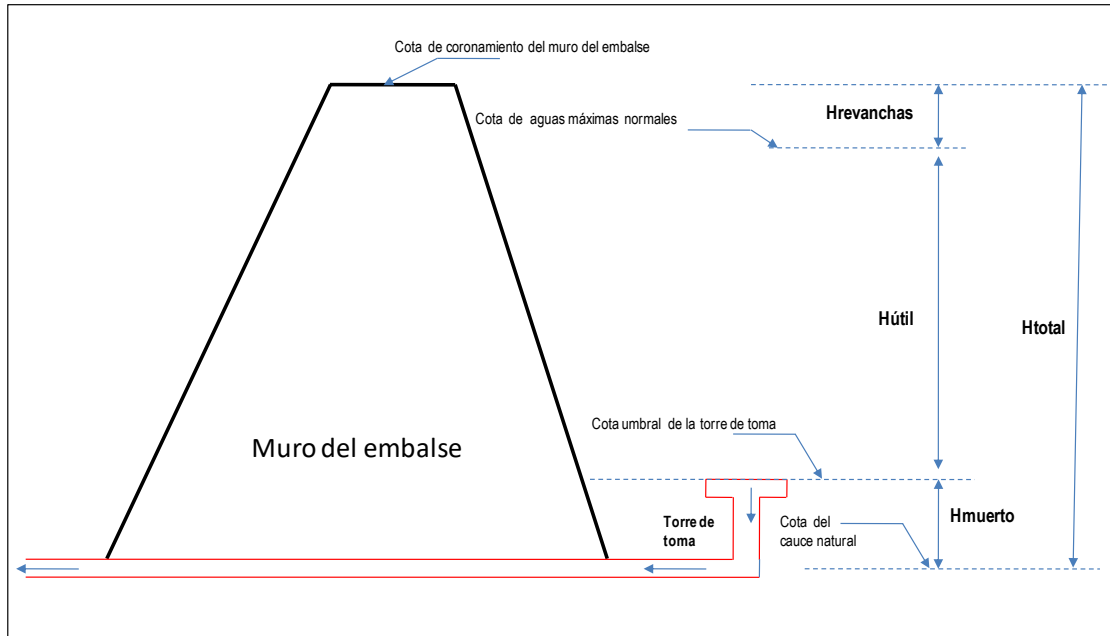


Figura 2.4-1: Esquema de la disposición de las alturas relevantes en un embalse.

Fuente: Elaboración propia.

Se evaluará la incidencia de la variable altura de volumen muerto sobre la altura total y el volumen muerto para varios casos en Chile con embalses ya construidos.

En la Tabla 2.4-1 se detallan las alturas relevantes y volúmenes de embalses en Chile, donde se observa la relación entre  $H_{muerto} / H_{total}$  de cada uno.

Tabla 2.4-1: Alturas relevantes y volúmenes de embalses en Chile.

| EMBALSE             | Hm   | Hútil | Hrev | Ht    | Vm   | Vutil | Vt  | Hm / Ht | Hm/ Vm | Vm/ Vt | Fuente   |
|---------------------|------|-------|------|-------|------|-------|-----|---------|--------|--------|----------|
| Puclaro             | 9,2  | 64,6  | 4,2  | 78,0  | 23,2 | 176,8 | 200 | 0,12    | 0,39   | 0,12   | DOH SEA  |
| La Paloma           | 9,8  | 53,8  | 4,0  | 68,0  | 11,0 | 739,5 | 750 | 0,14    | 1,50   | 0,01   | DOH, SEA |
| La Punilla,         | 54,0 | 78,1  | 4,4  | 136,5 | 25,0 | 600,0 | 625 | 0,40    | 2,16   | 0,04   | DOH, SEA |
| Cogotí              | -    | -     | 7,4  | 82,7  | 14,0 | 119,0 | 142 | -       | -      | 0,09   | DOH, SEA |
| Corrales            | 18,5 | 45,5  | 6,0  | 70,0  | 1,6  | 48,4  | 50  | 0,26    | 11,50  | 0,03   | DOH, SEA |
| Chacrillas          | 3,1  | 92,9  | 6,5  | 102,5 | 4,0  | 27,0  | 31  | 0,03    | 0,78   | 0,13   | DOH, SEA |
| Ancoa               | 32,  | 82,25 | 2,75 | 122,0 | 2,0  | 80,0  | 82  | 0,26    | 16,00  | 0,02   | DOH, SEA |
| Chironta            | 8,3  | 64,2  | 3,5  | 76,0  | 7,5  | 9,5   | 17  | 0,11    | 1,11   | 0,44   | DOH, SEA |
| Chalinga*           | 30,4 | 49,6  | 6,0  | 86,0  | 1,75 | 14,3  | 16  | 0,35    | 17,37  | 0,11   | DOH, SEA |
| Puntilla del Viento | 19,7 | 81,8  | 2,0  | 104,5 | 42,0 | 85,0  | 128 | 0,19    | 0,46   | 0,33   | DOH, SEA |

Fuente: (1) MOP, 2012  
 (2) MOP, 2013  
 (3) MOP, 2015  
 (4) Arrau Ingenieria, 2015  
 (5) EDIC ingenieros, 2002

Hm: Altura del volumen muerto [m].  
 Hútil: Altura del volumen útil de agua [m].  
 Hrev: Altura de la revancha [m].  
 Ht: Altura total del muro [hm<sup>3</sup>].  
 Vm: Volumen muerto [hm<sup>3</sup>].  
 Vutil: Volumen útil [hm<sup>3</sup>].  
 Vt: Volumen total del embalse [hm<sup>3</sup>].

Tabla 2.4-2: Coeficientes de altura de volumen muerto para distintos embalses.

| EMBALSE             | Etapas          | Región | Hmuerto / Htotal<br>(%) | Hmuerto/ Vmuerto<br>(m/hm <sup>3</sup> ) |
|---------------------|-----------------|--------|-------------------------|--|
| Puclaro             | Construido      | IV     | 0,12                    | 0,39                                     |
| La Paloma           | Construido      | IV     | 0,14                    | 1,5                                      |
| La Punilla          | En Construcción | VIII   | 0,40                    | 2,16                                     |
| Cogotí              | Construido      | IV     | -                       | -  |
| Corrales            | Construido      | IV     | 0,26                    | 11,5                                     |
| Chacrillas          | Construido      | V      | 0,03                    | 0,78                                     |
| Ancoa               | Construido      | VII    | 0,26                    | 16                                       |
| Chironta            | En Construcción | XV     | 0,11                    | 1,11                                     |
| Chalinga*           | Prefactibilidad | IV     | 0,35                    | 17,37                                    |
| Puntilla del Viento | EIA aprobado    | V      | 0,19                    | 0,46                                     |

Fuente: (1) Estudios de diseño de embalse, Ministerio de Obras Públicas, Dirección de Obras Hidráulicas.  
 (2) Estudios de impacto ambiental, Servicio de Evaluación Ambiental (SEA).



De la Tabla 2.4-2 se puede observar en cuáles embalses es más importante la altura del volumen muerto, respecto de la altura total ( $H_m/H_t$ ). Dicha relación, permite visualizar si, para un embalse sería relevante analizar la disminución del volumen muerto, por su implicancia en la altura total del embalse.

A partir de lo anterior podemos concluir que el volumen de sedimentación varía mucho dependiendo el lugar, tipo y características de la cuenca donde se emplaza, por lo que es difícil predecir alguna relación a priori. Con respecto a la relación de altura de volumen muerto y altura total, ésta varía entre un valor cercano a cero y 0,5. Lo anterior significa que a mayor sea la relación, mayor es la incidencia del volumen en la altura del muro que se necesita.

Finalmente, la proporción de altura de volumen muerto en volumen de sedimentación indica que cuanta altura de muro necesita  $1 \text{ hm}^3$  de volumen muerto, mientras mayor es, más es necesaria la implementación de alguna alternativa para reducir la sedimentación, convirtiéndose en un problema que incide con mayor proporción en los costos totales de la obra.

Lo anterior, muestra que el volumen de sedimentación en los embalses en Chile varía mucho de una cuenca a otra, por el que es vital realizar caso a caso.

# Capítulo 3. Metodologías de alternativas de reducción de sedimentación

Las técnicas para disminuir los sedimentos se clasifican en los tres grandes grupos siguientes:

1. **Reducción de aportes:** Reducir la producción de sedimentos antes que llegue al embalse: Esto es emplear distintas metodologías para disminuir los sedimentos que lleguen al embalse y /o reteniéndolos.
2. **Pasar sedimentos:** Conducir los sedimentos a través de la presa, reduciendo el nivel del embalse durante crecidas, descargando corrientes de turbiedad o pasarlos alrededor del embalse mediante un canal de crecidas o un túnel.
3. **Extracción de sedimentos:** Remover los sedimentos con excavación en seco o dragado, una vez que ya han sido depositados en el embalse.

El siguiente esquema muestra la distribución de las alternativas en el embalse desde que llega el sedimento hasta que ya se encuentra atrapado en el vaso y la forma de extraerlos.

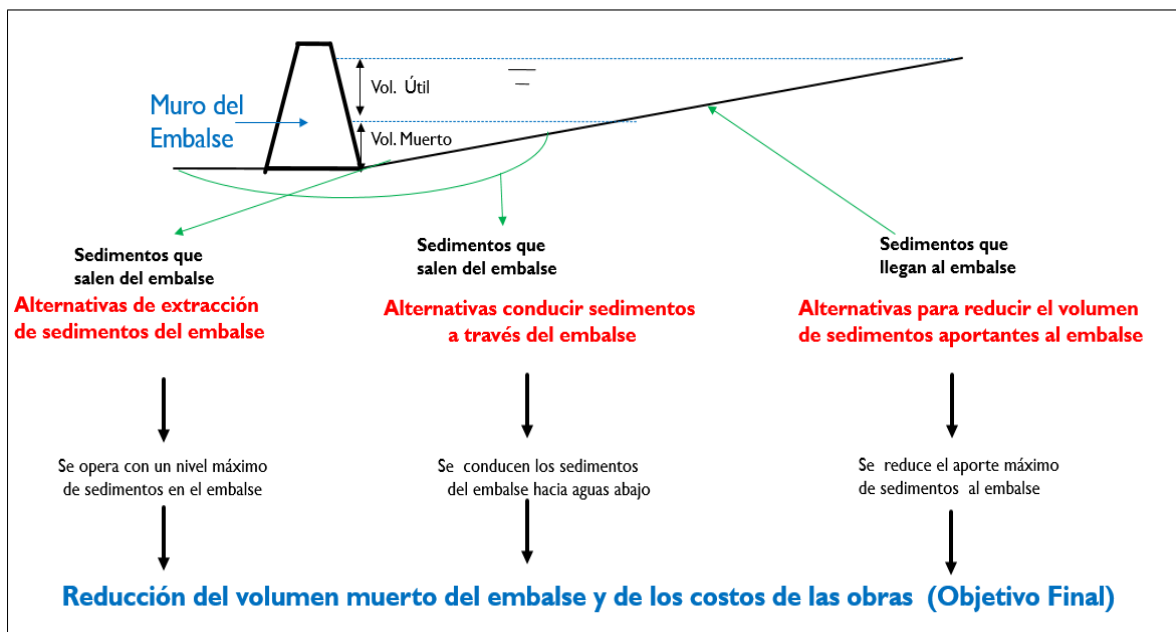


Figura 3-1: Esquema conceptual de las alternativas presentadas.

Fuente: Elaboración propia

## 3.1. Reducción de aportes

### 3.1.1. Control erosión del suelo

La pérdida de suelo en la cuenca se debe a procesos de remoción, transporte y depósito de sedimento. Esta pérdida, depende de los siguientes factores: hidrología del lugar, topografía, tipo de suelo y principalmente la cobertura vegetal del suelo, que incluye vegetación, raíces y residuos de plantas muertas. Aumentar la cobertura vegetal del suelo es el mejor procedimiento, ya que además impide que se pierda el suelo para otros fines (Gracia, 1986). El principal problema de establecerlo es su costo, ya que envuelve a muchos dueños de propiedades y es poco predecible (Morris et al, 2015).

Un ejemplo es el caso de China, en donde se comparó la transferencia de sedimentos para distintos casos de usos de suelo y se tiene que la sedimentación puede disminuir hasta en un 47,8% (X. Ma et al, 2014). Además, el estudio de una cuenca en Antioquia, determinó que la mejor opción es la reforestación con bosques nativos antes que el Pino y el Ciprés (Patiño et al, 2007).

Existen distintos métodos de calcular el aporte de sedimentos, de éstas la mayoría tiene como entrada la cobertura vegetal del suelo, entre estas están, Namba, Owen y Branson y la Fórmula Universal de pérdida de Suelo FUPS (Filosa,2017).

#### Namba

$$AS = 0,292 * P + 0,474 * H - 0,118 * F + 2,452$$

Dónde:

AS: Aporte de sedimento en [m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup>/año]

P: Precipitación media anual [mm]

H: Desnivel máximo de cotas en la cuenca [m]

F: Relación entre las áreas de suelo desnudo y las cubiertas con vegetación en porcentaje [%]

#### Owen y Branson

$$AS = 19465 * \left(\frac{H}{L}\right) + 14,29 * P_S - 604,8$$

Donde:

AS: Aporte de sedimento [m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup>/año]

H/L: Cociente entre el desnivel máximo de la cuenca [m] y longitud total del cauce principal [m]

P<sub>S</sub>: Porcentaje del suelo desnudo en la cuenca [%].

## Fórmula universal de pérdida de suelos FUPS

Originalmente propuesto por Wischmeier y Schmidt, basada en los suelos de EEUU, se encuentran en sistema métrico inglés, pero en Chile se ha calculado y usado con el sistema internacional (Mancilla, 2008). Entonces la pérdida de suelo (A) [ton/ha-año]

$$A = R \cdot K \cdot SL \cdot C \cdot P$$

**Factor R:** toma en cuenta el potencial erosivo de la lluvia [MJ cm/h-ha], difícil determinación, depende del producto de la energía cinética de la lluvia por la intensidad máxima en 30 minutos. En sistema métrico se determina como:

$$R = \frac{[\sum(1,213 + 0,89 \log I_j)(I_j T_j)] I_{30}}{173,6}$$

Dónde:

$I_j$ : Índice de erosividad por precipitación pluvial.

$T_j$ : Intensidad de la precipitación pluvial para un incremento específico seleccionado de la intensidad [mm/h].

$I_{30}$ : Intensidad máxima de la tormenta durante 30 minutos [mm/h].

Una forma alternativa es el cálculo con el índice modificado de Fournier IMF el cual se puede relacionar con R de diferentes formas.

$$IMF = \sum_1^{12} \frac{p_i^2}{P}$$

Dónde  $p_i$  es la precipitación del mes  $i$  y  $P$  el total anual de agua caída en mm.

$$R = a + b * IMF$$

En donde ha usado  $a=0$  y  $b=1$  en la región de Coquimbo, también en la misma región se usó  $b=1.6881$  (Valenzuela y Morales, 2004)

**Factor K:** toma en cuenta el tipo de suelo. Considera las propiedades del suelo como textura, materia orgánica, estructura del suelo y permeabilidad del suelo. Se determina con la Tabla 3.1.1-1:

Tabla 3.1.1-1: Factor K según textura de suelo y contenido de materia orgánica.

| Textura/ Cont. materia orgánica | 0,5% | 2%        | 4%   |
|---------------------------------|------|-----------|------|
| Arena                           | 0,05 | 0,03      | 0,02 |
| Arena fina                      | 0,16 | 0,14      | 0,10 |
| Arena muy fina                  | 0,42 | 0,36      | 0,28 |
| Arena migajosa                  | 0,12 | 0,10      | 0,08 |
| Arena fina migajosa             | 0,24 | 0,20      | 0,16 |
| Arena muy fina muy migajosa     | 0,44 | 0,38      | 0,30 |
| Migajón arenoso                 | 0,27 | 0,24      | 0,19 |
| Migajón arenoso fino            | 0,35 | 0,30      | 0,24 |
| Migajón arenoso muy fino        | 0,47 | 0,41      | 0,33 |
| Migajón                         | 0,38 | 0,34      | 0,29 |
| Migajón limoso                  | 0,48 | 0,42      | 0,33 |
| Limo                            | 0,60 | 0,52      | 0,42 |
| Migajón arcilloso arenoso       | 0,27 | 0,25      | 0,21 |
| Migajón arcilloso               | 0,28 | 0,25      | 0,21 |
| Migajón arcilloso limoso        | 0,37 | 0,32      | 0,26 |
| Arcilla arenosa                 | 0,14 | 0,13      | 0,12 |
| Arcilla limosa                  | 0,25 | 0,23      | 0,19 |
| Arcilla                         |      | 0,13-0,29 |      |

Fuente: Mancilla, 2008.

**Factor SL:** depende de la longitud, esto es, desde el punto del origen del flujo hasta donde disminuye la pendiente provocando depositación y de la pendiente del terreno.

$$SL = \left[ \frac{X}{22,13} \right]^m (0,06 + 0,045 S + 0,0065 S^2)$$

Dónde:

X: Longitud del tramo de pendiente S [m].

S: Pendiente [%]

m: Constante que depende del terreno.

Tabla 3.1.1-2: Factor m según pendiente.

|             |       |
|-------------|-------|
| S ≥ 5%      | m=0,5 |
| 5% > S > 3% | m=0,4 |
| 3% > S > 1% | m=0,3 |
| S < 1%      | m=0,2 |

Fuente: Mancilla, 2008.

**Factor C:** factor de cobertura vegetal que protege al suelo. Se divide en tablas para terrenos boscosos si han sido alterados o no. (Tablas 3.1.1-3 a 3.1.1-5)

Valores para terrenos boscosos

Tabla 3.1.1-3: Valores para C (Mancilla, 2008).

| Porcentaje de cobertura de árboles y sotobosque | Porcentaje de cobertura de la hojarasca | Factor C       |
|---|---|----------------|
| 100 - 75  | 100 – 90                                | 0,0001 – 0,001 |
| 70 - 45   | 85 – 75                                 | 0,002 – 0,004  |
| 40 - 20   | 70 – 40                                 | 0,003 – 0,009  |

Fuente: Mancilla, 2008.

Para terrenos pastoreados, quemados o con cosecha se recomienda usar la Tabla 3.1.1-4

Tabla 3.1.1-4: Valores del Factor C.

| Cobertura aérea  | Cobertura aérea % | Cubierta superficial en contacto con el terreno<br>% de suelo cubierto |      |      |      |       |       |       |
|--|-------------------|--|------|------|------|-------|-------|-------|
|  |                   | Tipo   | 0    | 20   | 40   | 60    | 80    | 95+   |
| Tipo y altura  |                   |  |      |      |      |       |       |       |
| No apreciable  |                   | G  | 0,45 | 0,2  | 0,1  | 0,042 | 0,012 | 0,003 |
|  |                   | W  | 0,45 | 0,24 | 0,15 | 0,091 | 0,043 | 0,011 |
| Herbácea, pastos largos o matorral con altura media de caída de gotas menos a 0.9 metros                   | 25                | G  | 0,36 | 0,17 | 0,09 | 0,038 | 0,013 | 0,003 |
|  |                   | W  | 0,36 | 0,20 | 0,13 | 0,083 | 0,041 | 0,011 |
|  | 50                | G  | 0,26 | 0,13 | 0,07 | 0,035 | 0,012 | 0,003 |
|  |                   | W  | 0,26 | 0,16 | 0,11 | 0,076 | 0,039 | 0,011 |
|  | 75                | G  | 0,17 | 0,10 | 0,06 | 0,032 | 0,011 | 0,003 |
|  |                   | W  | 0,17 | 0,12 | 0,09 | 0,068 | 0,038 | 0,011 |
| Arbustos o matorrales, con altura media de caída   | 25                | G  | 0,40 | 0,18 | 0,09 | 0,04  | 0,013 | 0,003 |
|  |                   | W  | 0,40 | 0,22 | 0,14 | 0,087 | 0,042 | 0,011 |
|  | 50                | G  | 0,34 | 0,16 | 0,08 | 0,038 | 0,012 | 0,003 |
|  |                   | W  | 0,34 | 0,19 | 0,13 | 0,082 | 0,041 | 0,011 |
|  | 75                | G  | 0,28 | 0,14 | 0,08 | 0,036 | 0,012 | 0,003 |
|  |                   | W  | 0,28 | 0,17 | 0,12 | 0,078 | 0,040 | 0,011 |
| Árboles, pero sin apreciable cubierta arbustiva o de matorral. Altura media de caída de gotas de 4 metros. | 25                | G  | 0,42 | 0,19 | 0,10 | 0,041 | 0,013 | 0,003 |
|  |                   | W  | 0,42 | 0,23 | 0,14 | 0,089 | 0,042 | 0,011 |
|  | 50                | G  | 0,39 | 0,18 | 0,09 | 0,040 | 0,013 | 0,003 |
|  |                   | W  | 0,39 | 0,21 | 0,14 | 0,087 | 0,042 | 0,011 |
|  | 75                | G  | 0,36 | 0,17 | 0,09 | 0,039 | 0,013 | 0,003 |
|  |                   | W  | 0,36 | 0,20 | 0,13 | 0,084 | 0,042 | 0,011 |

G= Cubierta superficial compuesta por pasto o material en descomposición. W= la cubierta superficial está compuesta de herbácea con poca cobertura radicular.

Fuente: Mancilla, 2008.

Tabla 3.1.1-5: Factor C para áreas de bosques alterados.

| Preparación del sitio                          | Cobertura de mulch | Condición del suelo y cobertura de malezas |      |       |       |         |      |       |      |
|--|--------------------|--|------|-------|-------|---------|------|-------|------|
|  |                    | Excelente                                  |      | Buena |       | Regular |      | Pobre |      |
|  |                    | NC   | WC   | NC    | WC    | NC      | WC   | NC    | WC   |
| Discado, rastrillado o preparado para semillas | 0                  | 0,52                                       | 0,2  | 0,72  | 0,27  | 0,85    | 0,32 | 0,94  | 0,36 |
|  | 10                 | 0,33                                       | 0,15 | 0,46  | 0,20  | 0,54    | 0,24 | 0,60  | 0,26 |
|  | 20                 | 0,24                                       | 0,12 | 0,34  | 0,17  | 0,40    | 0,20 | 0,44  | 0,22 |
|  | 40                 | 0,17                                       | 0,11 | 0,23  | 0,14  | 0,37    | 0,17 | 0,30  | 0,19 |
|  | 60                 | 0,11                                       | 0,08 | 0,15  | 0,11  | 0,18    | 0,14 | 0,20  | 0,15 |
|  | 80                 | 0,05                                       | 0,04 | 0,07  | 0,06  | 0,09    | 0,08 | 0,10  | 0,09 |
| Quemas   | 0                  | 0,25                                       | 0,10 | 0,26  | 0,10  | 0,31    | 0,12 | 0,45  | 0,17 |
|  | 10                 | 0,23                                       | 0,10 | 0,24  | 0,10  | 0,26    | 0,11 | 0,36  | 0,16 |
|  | 20                 | 0,19                                       | 0,10 | 0,19  | 0,10  | 0,21    | 0,11 | 0,27  | 0,14 |
|  | 40                 | 0,14                                       | 0,09 | 0,14  | 0,09  | 0,15    | 0,09 | 0,17  | 0,11 |
|  | 60                 | 0,08                                       | 0,06 | 0,09  | 0,07  | 0,10    | 0,08 | 0,11  | 0,08 |
|  | 80                 | 0,04                                       | 0,04 | 0,05  | 0,040 | 0,05    | 0,04 | 0,06  | 0,05 |
| Trituración de residuos                        | 0                  | 0,16                                       | 0,07 | 0,17  | 0,07  | 0,20    | 0,08 | 0,29  | 0,11 |
|  | 10                 | 0,15                                       | 0,07 | 0,16  | 0,07  | 0,17    | 0,08 | 0,23  | 0,10 |
|  | 20                 | 0,12                                       | 0,06 | 0,12  | 0,06  | 0,14    | 0,07 | 0,18  | 0,09 |
|  | 40                 | 0,09                                       | 0,06 | 0,09  | 0,06  | 0,10    | 0,06 | 0,11  | 0,07 |
|  | 60                 | 0,06                                       | 0,05 | 0,06  | 0,05  | 0,07    | 0,05 | 0,07  | 0,05 |
|  | 80                 | 0,03                                       | 0,03 | 0,03  | 0,03  | 0,03    | 0,03 | 0,04  | 0,04 |

NC= Sin vegetación viva WC= Con un pasto 75% de pasto y maleza, implicando una altura media de goteo 1,27 m.

Fuente: Mancilla, 2008.

**Factor P:** de prácticas de cultivo y conservación de suelos.

Tabla 3.1.1-6: Valores del Factor P.

| Pendiente en % | P Contorno o curvas de nivel | Longitud máxima de la ladera (m) | P Terrazas y contorno |
|----------------|------------------------------|----------------------------------|-----------------------|
| 1-2            | 0,6                          | 122                              | 0,12                  |
| 3-5            | 0,5                          | 91                               | 0,10                  |
| 6-8            | 0,5                          | 61                               | 0,10                  |
| 9-12           | 0,6                          | 37                               | 0,12                  |
| 13-16          | 0,7                          | 24                               | 0,14                  |
| 17-20          | 0,8                          | 18                               | 0,16                  |
| 21-25          | 0,9                          | 15                               | 0,18                  |

Fuente: Mancilla, 2008.

## **Descripción de control con vegetación:**

Esta alternativa consiste en aumentar la cobertura vegetal de la cuenca, reforestando lugares sin vegetación y/o erosionados, si es necesario expropiar terrenos para poder realizar, para así disminuir el aporte de sedimento total que genera la cuenca y finalmente disminuir el volumen muerto.

## **Se propone para aplicar esta metodología:**

- Calcular el aporte de sedimentos sin aplicar cobertura vegetal extra, con las fórmulas mencionadas anteriormente. Usar un factor C (de cobertura) apropiado para la cuenca en cuestión luego multiplicar por el área de la cuenca y la vida útil en 50 años.
- Calcular el aporte de sedimento aplicando la máxima cobertura vegetal posible en la zona de estudio, esto es variando el factor C para una cuenca con máxima cobertura vegetal luego multiplicar por el área de la cuenca y la vida útil en 50 años.
- Realizar los cálculos con los dos métodos planteados, y evaluar cuál de los dos puede ser más preciso.
- A partir de lo anterior, calcular la disminución del aporte de sedimentos al aumentar la cobertura vegetal.
- Para los costos de reforestar es necesario considerar, el costo de la expropiación en la zona de estudio. Y estudiar los costos de la reforestación con distintas especies ya sea nativa o exótica, esta información está disponible en la página web de la Corporación Nacional Forestal.
- Con respecto a la eficiencia de retención de sedimentos según la especie de árbol usada es difícil su cálculo, pero existen estudios realizados a cuencas en donde se concluye que un suelo tiene mejor comportamiento al control de sedimentación cuando se reforesta con especies nativas de la zona o autóctonas, a diferencia de reforestar con especies exóticas comunes como Pino Radiata o Eucalyptus (Patiño et al, 2007).
- Determinar el costo de cubrir con vegetación apropiada el área determinada.
- Determinar el nuevo volumen muerto del embalse para la vida útil del embalse, considerando la retención de sedimento de la cobertura vegetal, y con es la altura del volumen muerto que será disminuida.
- Además, calcular el nuevo volumen del vertedero, según la altura disminuida, y al área de la zona de inundación que ya no se inundará.
- Finalmente, calcular el beneficio total considerando los costos de reforestación y la reducción de costo en el proyecto.



## Impactos ambientales

- Alteración del paisaje, impacto positivo y permanente por la implementación de vegetación.
- Disminución de impactos negativos por disminución de área de inundación y tamaño de presa.

### 3.1.2. Tranque de retención o Sabo Dam

Para atrapar sedimentos aguas arriba con pequeñas obras, es relevante las “*sabo check dams*”, (Chanson, 2004), es una técnica japonesa que consiste en pequeñas construcciones aguas arriba del embalse, y están diseñadas para retener sedimentos para rangos de tamaño distintos. Esto se debe a que Japón tiene zonas montañosas y volcánicas, tal como el caso chileno. Tales estructuras pueden ser muros verticales, muros permeables o estructuras tubulares para tamaños más grandes. Serían de utilidad en Chile por la similitud de la geografía, ya que la mayoría de los embalses se emplazan en la precordillera y cordillera

Para esta metodología se tiene que, para cada quebrada que aporta sedimento se tendrá un volumen aportante que inicialmente se incluye en el volumen muerto y después de la instalación de una sabo dam, este volumen queda retenido.

**Vs** = Volumen de sedimentación total anual en el embalse = volumen muerto o esperado probable anual

**Vsd** = suma de los volúmenes de retención de las sabo dam consideradas, que corresponde al volumen anual de sedimentos esperado de todas las sabo dam. Hay que considerar que todos los años se debe retirar el sedimento acumulado de las sabo dam, lo cual significa, además, un costo anual de mantención de estas obras.

**Vmuerto reducido = Vs - Vsd**= nuevo volumen muerto del embalse, considerando todas las sabodam.

#### Descripción de la alternativa sabo dam

Consiste en construir pequeños muros en los cauces afluentes del embalse para que la velocidad de flujo de los afluentes disminuya y los sedimentos se acumulen aguas arriba de estos pequeños muros. Para esto se necesita una etapa de construcción y en la etapa de operación se debe realizar mantención de los muros extrayendo los sedimentos acumulados. Se debe tener la salvedad de no considerar tamaño de muro mayor a 5 metros, ya que embalses con alturas mayores a este valor tendrían que entrar al sistema de evaluación ambiental. (SEA, 2013).

## Metodología propuesta para la sabo dam

- Obtener información hidrológica de la cuenca o en este caso del diseño del embalse. Para disponer de caudales y curva de duración.
- Obtener la topografía del cauce mediante coordenadas SRTM para generar las curvas de nivel y usar Google Earth, para ver las posibles ubicaciones de los muros a construir, para una mejor aproximación, realizar mediciones de topografía en el sector.
- Buscar granulometría y calcular el coeficiente de Manning con las relaciones de Strikler y Cowan o usar valores obtenidos de estudios anteriores, en el caso de que existan, para simular el flujo mediante un software como Hec Ras, y finalmente obtener el radio hidráulico de dal caudal que se utiliza como dato de entrada.
- Calcular el gasto sólido de fondo, una de las relaciones más utilizadas en Chile, y en los estudios mencionados es Meyer Peter & Müller, que asocia el gasto sólido a el esfuerzo de corte. Se calcula el gasto sólido para cada perfil topográfico y luego graficar el gasto sólido en los perfiles, finalmente obtener un volumen de sedimentación, como el área bajo la curva del gráfico construido.

$$q_s^* = 8(\tau^* - 0,047)^{3/2}$$

$$q_s^* = \frac{q_s}{\sqrt{Rgd_{50}^3}}$$

$$\tau^* = \frac{\tau}{\rho g R d}$$

$$\tau = \rho g R_h S_f$$

Dónde:

$q_s^*$ : Gasto sólido adimensional [-].

$\tau^*$ : Esfuerzo de corte crítico adimensional [-].

$d$ : Diámetro medio [m]

$R$ : Relación relativa entra las densidades

$\rho$ : Densidad del fluido

$R_h$ : Radio hidráulico [m]

$S_f$ : Pendiente de la línea de energía

$b_i$ : Ancho de la sección i [m]

Finalmente, el gasto sólido

$$Q_s = \sum q_{si}^* \sqrt{Rgd_{50}^3 b_i}$$

- Para calcular el gasto total, se calcula el gasto para cada caudal de excedencia y se multiplica por la probabilidad de excedencia (Pbb) hasta llegar a un valor por perfil, luego realizar esto para cada perfil.
- Puede que los estudios calculen el gasto sólido de fondo con otros métodos, ya sean fórmulas empíricas o como se he realizado en Chile, correlaciones del gasto sólido

de fondo como un porcentaje del gasto sólido en suspensión, dependiendo la cuenca en estudio y la comparación de estudios anteriores.

- Para el gasto sólido en suspensión calcular con información sedimentológica de la estación más cercana y obtener regresión potencial con los caudales (Benítez, 1984).

$$Q_s = aQ^b$$

- El resultado anterior del gasto sólido se encuentra con unidades de masa, y para transformar a volumen es necesario utilizar un peso específico del suelo, buscar la estación más cercana y comparar con características de la cuenca en estudio.
- Calcular el volumen acumulado por año en una zona. (Donde se emplaza el muro) Usando las curvas de nivel en Autocad y diferencias de volumen. Realizando una curva de embalse (volumen acumulado por cota).
- Determinar volumen necesario para retener el sedimento esperado anual y dimensiones del muro de hormigón, Posee en el centro una abertura vertedora (alcantarilla para caudales bajos).
- Asociar volumen retenido a periodo de excedencia y calcular el costo de construcción (considerar instalación de faena y camino de acceso) y mantención por cada alternativa.
- El material del muro puede ser de distintos materiales, tierra, enrocado u hormigón. Los muros de tierra tienen un mal comportamiento con el agua ya que una crecida lo puede erosionar y/o colapsar. Los muros de enrocados han sido ampliamente usados en Chile porque los cauces presentan alta producción de material enrocado de diferentes tamaños, presentan un buen comportamiento ante la erosión y son más económicos que por ejemplo un muro de hormigón, porque no requiere mano de obra especializada por sus facilidades constructivas.
- Determinar costo del muro y número de muros, según la ubicación pueden ser de enrocado y/ hormigón.
- Ver factibilidad y volumen óptimo de cada sabo dam.
- Determinar frecuencia de limpieza de sedimentos con excavadora y camiones según rendimiento.

## **Impactos ambientales**

- Calidad de aire ruido y vibraciones en etapa de construcción.
- Degradación de la calidad del agua en etapa de operación.
- Disminución de impactos negativos por disminución de área de inundación y tamaño de presa.

## **3.2. Pasar sedimentos**

Existen tres alternativas para pasar los sedimentos a través del embalse, sluicing, flushing y descargar la corriente de turbidez.

El sluicing consiste en bajar el nivel de embalse antes de una crecida, y al momento de venir la crecida se desagua, con el objetivo de transportar la mayor cantidad de sedimento aguas abajo. Ha sido utilizado en China en la represa Tres Gargantas.

El flushing consiste en bajar el nivel del embalse al nivel donde estaba al río naturalmente antes de su construcción y luego descargar la crecida a través de compuertas hacia aguas abajo del embalse, esto fomenta la erosión y resuspensión de sedimentos ubicados en el vaso del embalse. Esta técnica ha sido utilizada en otros países como China, Japón y Costa Rica y se aplicará por primera vez en Chile en el Embalse Chironta.

Descarga corriente de turbidez: consiste en descargar la corriente de densidad producida y descrita anteriormente. Puede descargarse a través de la turbina o compuertas inferiores. Se ha comprobado que al descargar grandes flujos de sedimentos aguas abajo se libera además gran cantidad de nutrientes que provoca un gran crecimiento de hierbas (Asaeda y Rashid ,2010).

Como de los tres anteriores, el método con mayor eficiencia con respecto al porcentaje de sedimentos que disminuye (Mao, 2016), se escoge el flushing como método de estudio para este trabajo.

### **3.2.1. Flushing**

La alternativa consiste en disponer de un túnel que atraviesa el muro del embalse, puede ser utilizado el túnel de desvío y/o entrega, y disponer de compuertas en la entrada. Primero se debe vaciar el embalse y luego al venir una crecida, el agua pase a alta velocidad por el túnel, y remueva los sedimentos que se encuentran acumulado aguas arriba del muro de embalse. Para esto, se debe analizar la cuenca en estudio con el fin de determinar la regla de operación del flushing, esto depende del mes que existe mayor disponibilidad de agua y crecidas para realizar la descarga y además poder recargar el embalse para riego finalizada la descarga, la operación puede durar un par de días y se debe realizar una vez al año o cada cierta cantidad de años, según la cuenca.

Para determinar el sedimento total que se puede descargar del embalse se puede calcular con un modelo de transporte de sedimento, o estimarlo como un porcentaje del total gasto producido en un año.

Para establecer la metodología se tiene experiencia de la implementación del flushing en otros países. A continuación, se presenta un resumen de distintas presas en el

mundo en donde se ha aplicado el flushing, con los respectivos resultados y eficiencia del método (MN Ingenieros, 2014).

- **Presa Shuicaozi (China):** Capacidad de 9,58 hm<sup>3</sup>

El Flushing se realiza a través de vertedero, para realizarlo se esperaba la crecida luego de vaciar el embalse. El flushing duraba 1 día efectivo y el cono de efecto llegaba hasta 4 km aguas arriba del muro. El procedimiento para maximizar la eficiencia, era que debía implementarse cuando el embalse estuviera lo más vacío y que la crecida tuviese su descarga máxima al comienzo y al final del flushing.

- **Presa Hengshan (China, 1966):** Capacidad 13,3 Mm<sup>3</sup>.

Luego de 8 años luego de construido el embalse, se le han realizado cuatro flushing, y en los dos primeros con diferencia de 5 años se han descargado 1,9 Mm<sup>3</sup> de sedimentos. Y se concluye que no es necesario realizarlo todos los años, sino cada cierta cantidad de años es adecuado.

- **Presa Gebidem (Suiza, 1968):** Capacidad 9 Mm<sup>3</sup>

Se ha realizado flushing cada año en donde en promedio por año se descargan 0,19 Mm<sup>3</sup> de sedimentos por año casi la mitad de lo que se produce, ya que posee una producción de sedimentos de 0,4 Mm<sup>3</sup>/año

- **Presa Palignedra (Suiza, 1952):** Capacidad 5,5 Mm<sup>3</sup>

Se realizó un flushing de 4 meses, en donde en total se removieron 2,4 Mm<sup>3</sup> de sedimentos.

- **Presa Gmund (Austria, 1945):** Capacidad 0,93 Mm<sup>3</sup>

En cada operación de flushing se descargan en promedio 20.000 m<sup>3</sup> con el siguiente procedimiento: Se vacía el embalse una semana antes, se abre el desagüe de fondo y se realiza en un día durante una crecida.

También, a modo de ejemplo en Chile se tienen los resultados del modelo de sistema de flushing realizado para el Embalse Chironta (MN Ingenieros, 2014), el funcionamiento de este diseño aún no puede comprobarse ya que el embalse Chironta se encuentra en construcción.

Se puede extraer lo siguiente, considerando la gran cantidad de sedimentos y volumen muerto del embalse, y la baja vida útil se considera necesario evaluar la implementación del flushing para disminuir los sedimentos, para esto se desarrolla un modelo hidrológico, y se tiene lo siguiente:

- Se utilizan las estaciones pluviométricas Lluta, Villa Industrial y Putre para el modelo hidrológico.
- Se emplea modelo de transporte de sedimentos SRH versión 2D del Bureau of Reclamation, para efectos de flushing, se requiere topografía, condiciones hidráulicas y de sedimentos como entradas del modelo.

- Una vez obtenidos los resultados del modelo se concluye que el método del flushing para disminuir sedimentación se aplicará una vez cada tres años, de preferencia en febrero por los mayores caudales promedio que permiten el llenado rápido del embalse luego de su implementación. Se estimó que la mejor es construir un túnel independiente para purga por ribera derecha ya que permite un trazo recto para facilitar arrastre, con 4 compuertas y un dique para los sedimentos gruesos junto un camino de acceso para realizar limpieza una vez al año de la piscina de sedimentos

Se disminuyen alrededor del 50% de los sedimentos generados en la vida útil del proyecto, utilizando en mes de febrero, cada tres años para la realización del flushing.

Finalmente, los costos totales de la obra aumentaron en un 11% con respecto al proyecto sin sistema de flushing, esto se debe a que se consideró la construcción de un túnel exclusivamente para este método.

A partir de todo lo mencionado, de la experiencia en otros embalses y del estudio al embalse Chironta se llega a la propuesta de metodología para implementar el flushing y calcular el costo disminuido.

### **Metodología propuesta para el flushing**

- Verificar si es factible utilizar el túnel de desagüe de fondo para la implementación de flushing.
- Realizar la construcción de una obra en la etapa de construcción del embalse en el muro del tipo tubería y /o compuerta. En lo posible con pendiente para que genera el transporte de sedimento. Y si es que se utiliza el mismo túnel de desagüe de fondo incorporarle una compuerta para poder controlar la abertura y cierre.
- Operación:
  - Para el procedimiento primero de debe vaciar el embalse antes de una crecida, ojalá en el mes de mayor cantidad de crecidas (para que el vaciar el embalse no afecte a los regantes, ya que la mayoría de los embalses en Chile son embalses de riego), esto por un par de días hasta que se vacíe.
  - Luego, con la compuerta abierta, dejar que la crecida transporte el sedimento, aguas abajo, por alrededor de un día.
  - Cerrar las compuertas, cuando haya finalizado la crecida, y luego esperar hasta el llenado del embalse.
- Como es muy importante la predicción de las lluvias en el mes de realización, es importante y buen y constante pronóstico de las crecidas, para tener una máxima eficiencia del Flushing. Además, establecer el periodo de tiempo ideal para su realización
- Calcular el costo extra de las obras que se requieren para su implementación, estas son compuertas especiales para el procedimiento y un nuevo túnel si es que el túnel de desagüe no es apto por tamaño o forma.
- Para estimar la cantidad de sedimentos que se extraerán por cada vez que se realice, se utilizarán experiencias anteriores aplicadas a los valores del ejemplo en estudio.

- Para calcular la disminución de costos en el embalse, dada la implementación del Flushing, si lo que se vaciara en el flushing, es igual a lo generado, se diseña el embalse con el sedimento entre dos flushing, y si es menor a lo generado, se calcularan los sedimentos acumulados en la vida útil para el diseño de la presa y el vertedero.
- Para los costos se consideran la disminución de costos dado el volumen de la presa, el volumen del vertedero y el área de expropiación dada la disminución del área de inundación.

### **Impactos ambientales**

- A corto plazo degradación de la calidad de agua y biota aguas abajo de la liberación de sedimentos.
- A largo plazo, disminución de la erosión aguas abajo para restablecer equilibrio natural de sedimento en el lecho.
- Disminución de impactos negativos por disminución de área de inundación y tamaño de presa.

## **3.3. Extracción de sedimentos**

### **3.3.1. Dragado**

Existen tres tipos de dragado el mecánico, el hidráulico y el combinado. El dragado mecánico extrae el sedimento sin diluir el agua mediante cucharas o palas. El dragado hidráulico es el más eficiente y el más parecido a los que se utilizan en los puertos. Este dragado consiste en una bomba de succión que puede extraer sedimentos con agua, y resulta útil para sedimentos sueltos, arenas gravas o arcillas. Existen dragas estacionarias que operan ancladas y en marcha que son autopropulsadas.

La Figura 3.3.1-1 muestra la vista en planta y longitudinal de una draga hidráulica tipo.

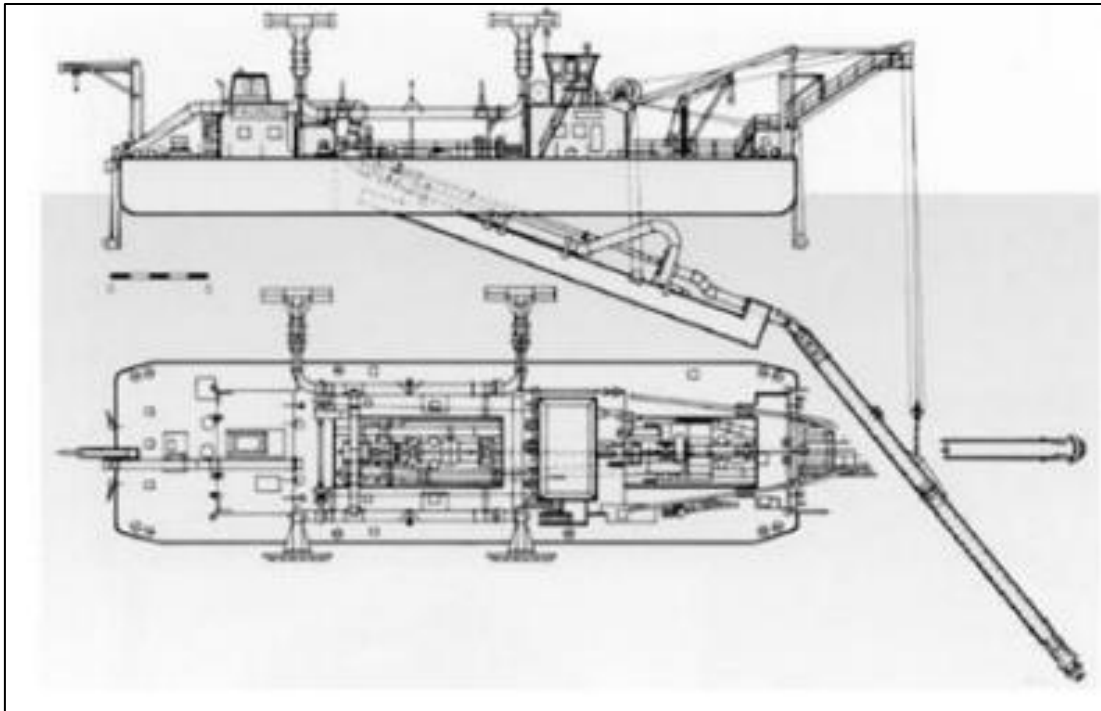


Figura 3.3.1-1: Draga hidráulica.

Fuente: (Barrena ,2013)

Se debe realizar cuando la altura de agua sea menor a una cota de referencia previamente establecida que permita la correcta extracción.

### Metodología propuesta para el dragado

- A partir del aporte de sedimentos en el vaso del embalse, determinar un volumen anual ideal a extraer, ojalá lo máximo posible para generar una disminución de la altura de la presa.
- Extracción preferente en verano con bajos niveles de agua
- Determinar equipo de dragado y recurrencia de extracción anual y total de sedimentos a extraer, determinar costo anual de dragado y traslado de sedimento.
- La metodología a aplicar cuando se realice es la siguiente: primero se extraen los sedimentos mediante la draga, luego se deposita a camiones y finalmente los camiones lo trasladan a un vertedero cercano para su depositación.
- Para los costos de dragado se tienen distintos valores, de estudios recientes:
  - El precio de dragado mecánico e hidráulico ronda los 11 US / m<sup>3</sup> de material extraído, además pasar dos veces por el mismo lugar puede ser más caro. (Puerto de San Antonio, 2018).
  - Según Informe Embalse Chironta es 7,29 UF/m<sup>3</sup> (“Diseño del Embalse Chironta, Región de Arica y Parinacota 2012. Ministerio de obras públicas”).



- Finalmente, el costo 5,14 UF/m<sup>3</sup> (“Estudio de sedimentos, Río San José. Región de Arica y Parinacota, para el proyecto Embalse Livilcar” Informe Final 2017).
- Para el traslado del material al botadero, se consideran camiones de capacidad 12 m<sup>3</sup>. Luego de realizar el dragado se debe determinar reducción de costos de muro de embalse con curva de embalse.
- Limitación: Longitud de alcance y profundidad de las máquinas de dragado.

### Impactos ambientales

- Alteración calidad de agua mientras se realiza.
- Cambios de subsuelo inundado.
- Calidad de aire y ruido cuando se esté operando y transportando el material.
- Disminución de impactos negativos por disminución de área de inundación y tamaño de presa.

## 3.3.2. Extracción mecánica

### Descripción de la extracción mecánica

Consiste en la extracción y transporte del material sedimentado en el vaso del embalse, cuando el embalse este vacío o de la parte de aguas arriba que no está inundada. La maquinaria necesaria para implementar esta alternativa consta de excavadoras, y camiones para transportar el material extraído.

Existen excavadoras con cucharas y retroexcavadoras, la diferencia principal es que las primeras están fijas y su brazo puede moverse en 360°, se usan para proyectos más grandes, y las retroexcavadoras tienen más facilidad de movimiento al desplazarse con neumáticos.



Figura 3.3.2-1: A la izquierda Excavadora, a la derecha retroexcavadora.

Fuente: [www.logismarket.cl](http://www.logismarket.cl)

Para este caso se considera el uso de una excavadora, para obtener el rendimiento se debe determinar el tamaño del cucharón, en la Figura 3.3.2-2 se muestran los distintos rendimientos de excavadores según la capacidad del cucharón.

| MODELO                 | POTENCIA | TIPO DE TRABAJO        | CAPACIDAD CUCHARON | RENDIMIENTO            |           |
|------------------------|----------|------------------------|--------------------|------------------------|-----------|
| CAT 215                | 90 HP    | Excavación en tierra   | 0,7 m3             | 90 m3/hr               |           |
|                        |          | Exc. Mat. Heterogéneo  |                    | 50 m3/hr               |           |
|                        |          | Exc. Roca con voladura |                    | 30 m3/hr               |           |
|                        |          | Excavación en tierra   | 0,9 m3             | 100 m3/hr              |           |
|                        |          |                        |                    | Exc. Mat. Heterogéneo  | 60 m3/hr  |
|                        |          |                        |                    | Exc. Roca con voladura | 40 m3/hr  |
| CAT 225                | 125 HP   | Excavación en tierra   | 1,1 m3             | 130 m3/hr              |           |
|                        |          | Exc. Mat. Heterogéneo  |                    | 70 m3/hr               |           |
|                        |          | Exc. Roca con voladura |                    | 50 m3/hr               |           |
| CAT 235                | 195 HP   | Excavación en tierra   | 1,3 m3             | 150 m3/hr              |           |
|                        |          | Exc. Mat. Heterogéneo  |                    | 90 m3/hr               |           |
|                        |          | Exc. Roca con voladura |                    | 60 m3/hr               |           |
|                        |          | Excavación en tierra   | 1,5 m3             | 170 m3/hr              |           |
|                        |          |                        |                    | Exc. Mat. Heterogéneo  | 100 m3/hr |
|                        |          | Exc. Roca con voladura | 70 m3/hr           |                        |           |
|                        |          | Excavación en tierra   | 17 m3              | 200 m3/hr              |           |
|                        |          |                        |                    | Exc. Mat. Heterogéneo  | 110 m3/hr |
| Exc. Roca con voladura | 80 m3/hr |                        |                    |                        |           |

Figura 3.3.2-2: Rendimiento excavadoras hidráulicas.

Fuente: [es.slideshare.net/CorporacionesAmcSac/material-tablasrendimientoconsumocombustiblecostomaquinariapesada](https://es.slideshare.net/CorporacionesAmcSac/material-tablasrendimientoconsumocombustiblecostomaquinariapesada)

Las excavadoras más comúnmente utilizadas para estos casos y con mayor disponibilidad son de volumen de cuchara, esto implica un rendimiento de

Un factor a considerar es la periodicidad de extracción, el cual depende mayoritariamente de los periodos de sequía por lo que se sugiere que sea antes de la temporada de lluvia, una vez al año o cada dos años. Calcular tiempo que se tarde según el volumen necesario de sedimentos.

Luego es necesario transportar el material mediante camiones hacia un vertedero cercano en la zona de extracción, para finalmente ser depositado.

Existen casos, como el Embalse Paloma, cuando el nivel del embalse baja, ingresan camiones de particulares a extraer sedimentos, ya que sirve como material de construcción. Esto se puede evaluar como un ingreso económico y una oportunidad para reducir los costos.

Los camiones tienen distintas capacidades, dada la cantidad de sedimentos, se utiliza camiones de gran capacidad para el transporte.

Finalmente, para que sea factible económicamente, es necesario disponer de un vertedero cercano a la zona de extracción para depositar el material extraído.

## **Costos:**

- Extracción mecánica mediante excavadoras: 0,22 UF/m<sup>3</sup> (“Estudio de sedimentos, río San José, Región de Arica y Parinacota, para el proyecto Embalse” Informe Final 2017).
- Camión con capacidad de 8 m<sup>3</sup> tiene un costo de \$ 100.000 incluyendo conductor y combustible. [http://transportevym ltda.cl/servicios\\_valores.html](http://transportevym ltda.cl/servicios_valores.html)
- Costo botadero en Chile: también se tiene que en la Región de Valparaíso el costo por m<sup>3</sup> de traslado y depósito en botadero es de \$2500.

## **Impactos ambientales**

- Ruido y disminución calidad de aire por el polvo en el transporte del sedimento por los camiones.
- Disminución de impactos negativos por disminución de área de inundación y tamaño de presa.

Realizar varios escenarios con el de caso base y alternativas de manejo, calculando los siguientes costos que se pueden disminuir en el proyecto de embalse:

- Costos por la disminución del volumen de la presa.
- Costos por la disminución del volumen de la presa.
- Costos de expropiación del área de inundación.

Podemos concluir que existen muchas formas de estimar la sedimentación en los embalses, desde modelos empíricos, cálculos usando topografía y fórmulas, simulaciones o directamente realizar una comparación de batimetrías, la sedimentación se puede disminuir mediante métodos que se realizan en la construcción de diseño o cuando ya está construido, que básicamente puede ser desviando o sacando literalmente el volumen de sedimentos.

Para la estimación de costos en todas las alternativas se realiza un flujo de caja considerando el año cero como periodo de construcción y los siguientes 50 de vida útil del embalse. Los beneficios o costos totales de cada alternativa que se muestran corresponden al VAN total considerando costos y ganancias. La tasa de descuento utilizada es de 10%, valor que se utiliza para grandes proyectos en Chile hidroeléctricos (Cartes et al, 2005).

## Capítulo 4. Resultados y análisis

### 4.1. Elección de Embalse para desarrollar alternativas

Para la evaluación de las metodologías descritas anteriormente es necesario escoger un ejemplo de un embalse de riego en Chile que cumpla con los requisitos de embalse mayor y contenga la información necesaria, para calcular numéricamente las variaciones de aporte de sedimentos y evaluar económicamente las alternativas.

Se recopiló en la Dirección de Obras Hidráulicas del MOP los informes finales de diseño, factibilidad o construcción de los siguientes embalses de riego:

- Embalse Ancoa
- Embalse Chalinga
- Embalse Chironta
- Embalse Chacrillas
- Embalse Empedrado

Se realizó un cuadro comparativo con la información más importante que tienen los estudios (Ver Tabla 4.1-1).

#### 1. Embalse Ancoa

El Embalse Ancoa se ubica en la región del Maule, situado en el río Ancoa, funciona desde el año 2013. Tiene una capacidad de 60 hm<sup>3</sup> y un muro de 32 m. En el estudio de factibilidad del embalse fue posible obtener la siguiente información.

Se obtuvo del MOP el “Estudio de factibilidad final del embalse Ancoa”, del año 2002 completo, incluyendo anexos y planos. Además, se cuenta con el Estudio de impacto ambiental presentado al SEA.

Estaciones meteorológicas utilizadas: Estación Hornillos y Ancoa antes túnel Melado, Estaciones fluviométricas y pluviométrica “Hornillos” “Embalse Ancoa” y “Ancoa” en el Morro.

#### Información disponible

- Precipitaciones Máximas de 24, 48 y 72 h en la estación Hornillos (1961-2000)
- Caudales máximos instantáneos en la estación Ancoa Antes Túnel Canal Melado (1952-1985)
- Estudio de crecidas: hidrograma unitario 1 hora.
- Longitud de las curvas de nivel ( $\sum Li$ ) (km) y área de la cuenca.

- Longitud del cauce principal (Lcp) (km), distancia del centro de gravedad de la cuenca a la sección de salida (Lcg) (km) y pendiente media de la cuenca (S).
- Caudales máximos instantáneos por periodo de retorno.

### **Estudio de sedimentación**

No posee estaciones sedimentométricas, cauce similar Río Teno estaciones Río Claro en los Queñes y Río después de Junta con Claro, poseen estadística de concentraciones integradas

Se cuenta con información de los yacimientos de material, calicata y granulometrías.

Datos de caudales medios mensuales

Tasas medias de sedimentación de arrastre de fondo y suspensión se obtienen de estadística de concentraciones de estación a cuenca similar. Para el gasto sólido de fondo se calcula como el 25% del gasto sólido en suspensión.

Se utiliza el método de Brune para determinar porcentaje retenido, para el volumen retenido se utiliza Lara y Pemberton y finalmente, para calcular la compactación de los sedimentos en la vida útil del proyecto se utiliza el método de Miller

### **Diseño obras y planos**

Se encuentra la curva de embalse, y el diseño de todas las obras que forman el embalse, también existen planos de todas las obras por separado y en conjunto.

Además, se dispone de todo un sistema de información geográfica para el programa Arc-Gis con toda la información referenciada en capas.

### **Evaluación económica**

También está disponible la evaluación económica del embalse, comparación VAN y TIR de varias alternativas de capacidad de embalse. La cantidad de expropiaciones realizadas con el monto de cada una. Se encuentra el estudio agronómico y el programa de construcción con los precios.

## **2. Embalse Chacrillas**

El Embalse Chacrillas se ubica en la región de Valparaíso, en el río Rocín. Empezó a funcionar este año 2018. Tiene una capacidad de 31 hm<sup>3</sup> y una altura de muro de 102,5 m.

Se obtuvo del MOP el “Diseño del Embalse Chacrillas”, del año 2002 completo, incluyendo anexos y planos. Además, se cuenta con el Estudio de impacto ambiental presentado al SEA.

## **Estudio hidrológico**

Estaciones pluviométricas: solo existen estaciones en las cuencas de Putaendo y Aconcagua (Chacrillas es aportante a Aconcagua), Estaciones San Felipe, San Estebán Retén. Los Andes, Riecillos, Resguardo Los Patos, cuenta con precipitaciones mensuales y máximas.

Estaciones fluviométricas: no existen en la cuenca, se cuenta con la estación Putaendo, Resguardo en los Patos aguas abajo del muro, una estación en el río La Ligua "Alicahue en Colliguay" y en la cuenca del río Petorca "Sobrante en Piñadero".

## **Estudio de sedimentación**

Se cuenta con caudales medios mensuales de la estación río Putaendo en Resguardo.

La información sedimentométrica se obtiene de la estación Putaendo en Resguardo Los Patos, se hizo un análisis de los datos de la estación, rellenando datos y ponderando en área nival y pluvial con la relación de áreas de la cuenca del embalse y de la estación, con esto se obtiene la estadística para el cálculo del gasto sólido en suspensión. Para el gasto de fondo se adoptó como un porcentaje del gasto en suspensión, 17% de este.

Luego con el método de Brune se estimó el sedimento que queda retenido en el embalse. Para estimar el peso específico del sedimento se estimó con Lara y Pemberton, y para calcular la compactación se calculó con Miller en 50 años.

La distribución del sedimento en el embalse método de Borland y Miller se clasificó Tipo II.

## **Diseño de obras y planos**

Se cuenta con las características geomorfológicas de la cuenca, la fórmula para el cálculo del volumen del muro, la curva de embalse con aerofotometría escala 1:2000. También se encuentra toda la geometría y dimensiones del muro.

Planos de la zona de inundación con curva de nivel, planos de las obras del embalse.

## **Evaluación económica**

Costos de relleno y muro y costos de expropiaciones realizadas, presupuesto total de la obra.

### **3. Embalse Chironta**

El Embalse Chironta se ubica en la región de Arica y Parinacota, en el río Lluta. Aún se encuentra en construcción. Tiene una capacidad de 17 hm<sup>3</sup> y una altura de muro de 76 m. Del estudio de diseño del embalse se obtuvo la siguiente información.

Se obtuvo del MOP el "Diseño Embalse Chironta", del año 2012 completo, incluyendo anexos y planos, también "Diseño de sistema de purga del Embalse Chironta". Además, se cuenta con el Estudio de impacto ambiental presentado al SEA.

## **Estudio hidrológico**

Estaciones Fluviométricas: estaciones Alcérreca, Tocontasi y Panamericana con estadística de caudales máximos instantáneos.

Pluviometría: estaciones Villa Industrial, Alcerreca, Putre, Central Chapiquiña, Belen y Tignamar; con estadísticas de precipitaciones máximas mensuales.

## **Estudio de sedimentación**

Información sedimentométrica: estadísticas de muestreo rutinario diario de estación DGA Lluta en Toconasi.

Granulometría: calicata de zona alta de la cuenca que aporta sedimentos. Se realizó una campaña de medición de sedimentos por un año. Se realizan granulometrías, y con la información de caudales de excedencia junto al modelo hidráulico en Hec-Ras con 70 perfiles topográficos transversales, cada 50 m, en total 3500 m.

Para el cálculo del gasto sólido de fondo, se utiliza la guía del USBR calculándose el gasto sólido de fondo para cada perfil transversal de la topografía, con los métodos de Meyer Peter y Müller, Smart Jaeggi, Ackers y White y Yang. Para el cálculo final se determinó el promedio del resultado de los cuatro métodos anteriores.

Para el cálculo del gasto sólido en suspensión se disponía de la regresión datos de sedimentos con caudales y también se determinó con la metodología de Djorovic, finalmente los resultados de la última fueron más conservadores, y se escogen, además el primer método tenía falta de datos por lo que no se consideró tan precisa.

Se construye curva de distribución de sedimentos con elevación, y además se tiene anexos cálculos Hec-ras, gasto sólido y correlación precipitaciones estaciones.

## **Diseño de obras y planos**

Se cuenta con todo el diseño de las obras del embalse y sus planos correspondientes.

## **Evaluación económica**

Se encuentra la evaluación económica del embalse y la evaluación económica del sistema de purga de sedimentos.

#### **4. Embalse Empedrado**

El Embalse Empedrado se ubica en la región del Maule, en el río. Su construcción culminó este año 2018. Tiene una capacidad de 2,7 hm<sup>3</sup> y una altura de muro 21 m.

Se obtuvo del MOP el “Estudio complementario al diseño del embalse Empedrado”, completo, incluyendo anexos y planos. Además, se cuenta con el Estudio de impacto ambiental presentado al SEA.

Dadas las dimensiones del embalse no cumple con la definición de embalse mayor.

#### **5. Embalse Chalinga**

El Embalse Chalinga se ubica en la región de Coquimbo, en el río Chalinga. Aún no comienza su construcción. Tiene una capacidad 16 hm<sup>3</sup> de y una altura de muro de 86 m. Del estudio de diseño del embalse se obtuvo la siguiente información.

Se obtuvo del MOP el Proyecto construcción del embalse de riego en el Río Chalinga, del año 2013, completo, incluyendo anexos y planos. Además, se cuenta con el Estudio de impacto ambiental presentado al SEA.

##### **Estudio hidrológico**

Estaciones fluviométricas utilizadas: La Palmilla y San Agustín. Las estaciones pluviométricas en Cuncumen, Coiron, Salamanca, San Agustín, Mal Paso, Limahuida, además existe una estación meteorológica en La Tranquila.

La serie de caudales se obtuvo con el modelo hidrológico WEAP, en donde los caudales máximos se calcularon con el “Manual de cálculo de crecidas y caudales mínimos en cuencas sin información fluviométrica”, y las características geomorfológicas de la cuenca se obtuvieron con los DEM de la zona. Se estimó también la precipitación mensual.

##### **Estudio de sedimentación**

Para el cálculo del gasto sólido en suspensión se utilizaron las propuestas de Denny Bolton, USBR y regresión de tasas regionales de sedimentación calculadas anteriormente en la cuenca del Choapa (relacionando a este caso con proporción del área de la cuenca en estudio). El gasto sólido de fondo se obtuvo como 15% del gasto en suspensión.

##### **Diseño de obras y planos**

Se dispone del modelo de simulación operacional del embalse, los diseños de cada una de las obras y los planos de estas en Autocad. Además, se dispone de planos de la campaña de topografía en la zona de inundación del embalse.

##### **Evaluación económica**

Evaluación económica de la obra completa y expropiaciones realizadas con costos.

A continuación, se presenta un cuadro resumen de la información disponible para cada caso.



Tabla 4.1-1: Cuadro resumen elección de alternativa de embalse.

|                                | <b>Dato</b>   | <b>Embalse Chironta</b> | <b>Embalse Chalinga</b> | <b>Embalse Chacrillas</b> | <b>Embalse Ancoa</b> |
|--------------------------------|---|-------------------------|-------------------------|---------------------------|----------------------|
|                                | Estaciones Fluvio y pluviales                       | 5                       | 10                      | No adyacentes             | 6                    |
|                                | Volumen sedimentos [Hm3]                            | 7,5                     | 1,75                    | 4,0                       | 2                    |
|                                | Altura del volumen de sedimento [m]                 | 8,3                     | 30,4                    | 3,1                       | 32                   |
| <b>Vegetación</b>              | Precipitación media                                 | Si                      | Si                      | Si                        | Si                   |
|                                | Área de cuenca                                      | Si                      | Si                      | Si                        | Si                   |
|                                | Desnivel cuenca                                     | Si                      | Si                      | Si                        | Si                   |
|                                | Suelo desnudo o cobertura de suelo                  | No                      | No                      | Si                        | Si                   |
|                                | Longitud cauce principal                            | Si                      | Si                      | Si                        | Si                   |
|                                | Granulometría                                       | Si                      | No                      | No                        | No                   |
| <b>Sabodam</b>                 | Topografía cauces                                   | Si, incompleta          | Si, completa            | Solo área de inundación   | Si                   |
|                                | Granulometría diámetros                             | Si                      | No                      | No                        | No                   |
|                                | Manning   | Si                      | No                      | No                        | No                   |
|                                | Datos sedimentos                                    | Si                      | No                      | Si                        | Si                   |
|                                | Caudales medios diarios                             | Si completa             | Si completa             | Si completa               | Si completa          |
|                                | Caudales medios con curva de duración               | Si completa             | Si completa             | Si completa               | Si completa          |
|                                | Eje hidráulico para altura de agua y ancho de       | Si completa             | No                      | No                        | No                   |
|                                | Eje hidráulico para altura de agua y ancho de cauce | Si completa             | No                      | No                        | No                   |
|                                | Distribución sedimento                              | Si                      | No                      | Si                        | No                   |
|                                | Gasto en suspensión                                 | Si                      | Si                      | Si                        | Si                   |
|                                | Gasto sólido fondo                                  | Si                      | Como % de GSS           | Como % de GSS             | Como % de GSS        |
| Diseño muro y Obra de descarga | Si completo   | Si completo             | Si completo             | Si completo               |                      |
| <b>Flushing</b>                | Total de sedimentos                                 | Si completo             | Si completo             | Si completo               | Si completo          |
|                                | Distribución de sedimentos en cota                  | Si                      | No                      | Si                        | No                   |
|                                | Mes con menos caudal                                | Si                      | Si                      | Si                        | Si                   |
| <b>Extracción y dragado</b>    | Información botaderos cercanos                      | No                      | No                      | No                        | No                   |
|                                | Costos de obras                                     | Si, completa            | Si, completa            | Si, completa              | Si, completa         |
|                                | Flujo vida útil                                     | Si, completa            | Si, completa,           | Si, completa              | Si, completa,        |

A partir del cuadro anterior, podemos concluir que el embalse con la información más completa para poder realizar el análisis es el embalse Chironta porque posee la siguiente información por sobre los otros embalses:

- Posee muestras de granulometría del área de inundación y cauces aguas arriba, con el coeficiente de Manning estimado, que es dato de entrada para el cálculo del gasto sólido de fondo, específicamente en el radio hidráulico. Contiene un eje hidráulico de los cauces aguas arriba con altura de agua, velocidad, caudal, número de Froude por perfil transversal.
- Desarrollo y cálculo del gasto sólido de fondo con las relaciones de Peter Meyer y Müller, además cálculo del gasto sólido en suspensión con datos de una estación sedimentométrica.
- Desarrollo de modelo para evaluar implementación de Flushing en el embalse para reducir la sedimentación del embalse.
- La cuenca posee un gran porcentaje de suelo desnudo, con las crecidas del invierno altiplánico genera mayor cantidad de sedimentos.
- El embalse posee un alto volumen de sedimentos estimado en su vida útil, la relación de volumen muerto sobre volumen total es 0,44, lo que justifica totalmente un manejo de sedimentación.
- Para el embalse se produce 7,5 Mm<sup>3</sup> de sedimentos en 26 años sino se aplica la técnica del Flushing en el mes de más crecidas (Febrero), pero al aplicarla la vida útil se aumenta a 59 años.
- La zona en estudio posee escasez hídrica, las precipitaciones sólo llegan en la temporada estival del invierno altiplánico, por lo que maximizar el almacenamiento de agua para fines de riego y/o agua potable es de vital importancia hoy en día.

Dado lo anterior este embalse posee la suficiente información para aplicar las alternativas mencionadas en este informe, además presenta problemas de sedimentación, ya que como se mencionó anteriormente casi la mitad del volumen del embalse se destinó a sedimentos.

Dada la implementación del Flushing en el cálculo del volumen no tiene sentido usar este ejemplo para calcular las técnicas para reducir los sedimentos, ya que se debe notar el cambio entre un diseño sin medidas para disminuir la sedimentación y al momento de aplicarlas. Se descarta la implementación del manejo de sedimentos en el Embalse Chironta. Por lo que, finalmente se decidió evaluar otro embalse adecuado para el análisis de los ejemplos presentados anteriormente.

Ante lo descrito anteriormente, y considerando las dos alternativas restantes para emplear se concluye que:

- El Embalse Chacrillas posee mayor volumen muerto que el Embalse Ancoa, aunque la altura que ocupa el volumen muerto en el Embalse Ancoa es mayor, por esto, al disminuir los sedimentos genera cambios más notorios en cantidad de sedimentos.
- La cuenca del Embalse Chacrillas al ubicarse más al norte, posee menos vegetación que la cuenca del Embalse Ancoa; por lo que un control de la vegetación puede ser más favorable para disminuir los sedimentos.

La cantidad de datos proporcionados de cada diseño para poder realizar los cálculos es similar.

Por todo lo anterior mencionado, dada la cantidad de información disponible, la ubicación y la cantidad de sedimentos acumulados, se decidió que la mejor opción para estudiar la factibilidad económica de las alternativas de disminución de la sedimentación es el Embalse Chacrillas.

## 4.2. Descripción de la zona de estudio

El Embalse Chacrillas se encuentra ubicado a 26 km de la comuna de Putaendo, provincia de San Felipe, región de Valparaíso. Su eje se encuentra en las coordenadas UTM Huso 19 sur, 6403115,53 N 354221,77 E

Se emplaza en el Río Rocín, afluente del Río Aconcagua, 2,4 km aguas arriba de la confluencia con el Estero Chalaco.

La presa tiene una capacidad útil de 27 hm<sup>3</sup> y permite el riego de 7100 ha con seguridad de 85 %. La superficie de inundación es de 92 ha. El muro tiene una altura de 102,5 m y es del tipo CFRD, construida con rellenos provenientes de las excavaciones realizadas para la misma obra.

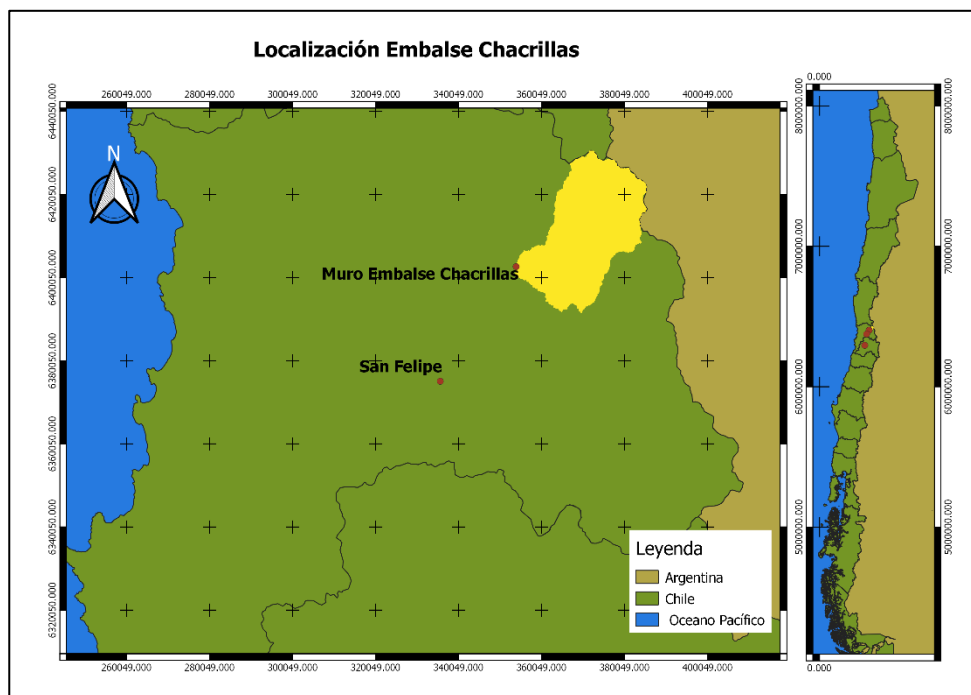


Figura 4.2-1: Localización Embalse Chacrillas.

Fuente: Elaboración propia.

El río Rocín tiene un régimen hidrológico determinado por el periodo de deshielo en primavera que es la fuente más importante de alimentación junto con la lluvia invernal. El caudal mensual promedio más alto es 18,97 m<sup>3</sup>/s en diciembre, y el más bajo 2,98 m<sup>3</sup>/s en mayo.

A partir de la morfología del río se puede deducir que su cauce está determinado por la topografía de montaña, en donde se distinguen zonas trenzadas, con barras alternadas que indican riveras fácilmente erosionables y permite el ensanchamiento con las crecidas, esta morfología es característica de los ríos en Chile, por la gran diferencia de altura en poca distancia horizontal, característica de nuestro país (Niño, 2010).

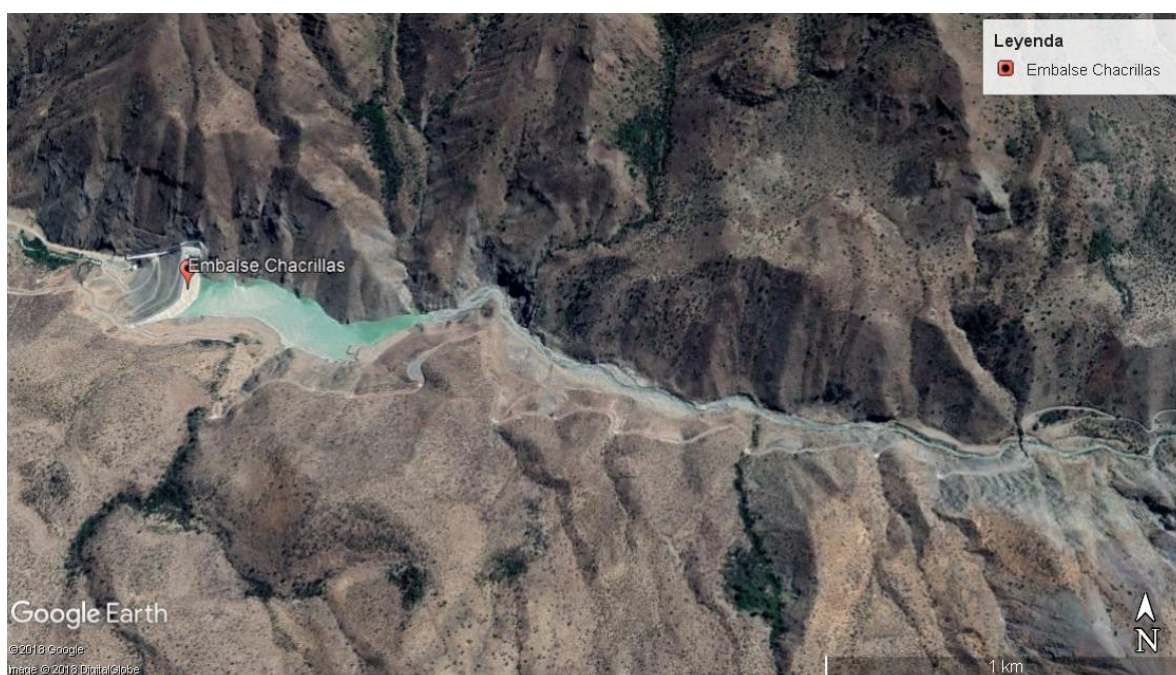


Figura 4.2-2: Ubicación Embalse Chacillas y afluente Río Rocín.

Fuente: Google Maps.

En la zona se distinguen los climas templado-mediterráneo con estación seca prolongada el cual se caracteriza por tener una estación seca prolongada y un invierno bien marcado con temperaturas extremas. La precipitación media anual es aproximadamente 395 mm/año y temperaturas de 14.5 °C. Sobre los 3000 m de altura domina el clima frío de altura y se caracteriza por bajas temperaturas, nieve y campos de hielo permanentes.

El muro encierra una cuenca de 638 km<sup>2</sup>, y se posa en la angostura del valle del río Rocín, esto es entre su junta o confluencia con el río Hidalgo, hacia el oriente, hasta la junta con el río Chalaco, hacia el oeste, los procesos de actividad volcánica, procesos tectónicos, glaciaciones, procesos de remoción en masa y erosión fluvial han determinado el desarrollo de un relieve montañoso, donde las rocas afloran parcialmente cubiertas por diversos tipos de depósitos no consolidados o suelos.

En el sector antes señalado, el río Rocín escurre encajonado en un valle de fondo estrecho, ligeramente meándrico, flanqueado por remanentes de terrazas aluviales del mismo río y depósitos aluviales de conos de deyección de quebradas laterales afluentes.

La vegetación predominante en la región de Valparaíso en orden de abundancia según la CONAF es matorrales y praderas, bosque nativo y plantaciones forestales. En los árboles nativos predomina en el bosque esclerófilo (propio de la zona central del país), la palma chilena y el roble. Especies reforestadas predominantes son el Eucalyptus sp. y el pinus radiata.

La flora predominante es matorral de espino (*Acacia caven*), quisco (*Echinopsis chiloensis*) y quillay (*Quillaja saponaria*). Aguas arriba del embalse se tiene pendientes de hasta 72% y 60% de cobertura vegetal. Aguas arriba de lo anterior se tienen pendientes hasta 100% y cobertura vegetal 25 a 45% en la cuenca del estero Chalaco se tienen pendientes de 33 % a 61% y cobertura vegetal de 30 a 55%.

### Estudio de sedimentación

El estudio de sedimentación realizado por EDIC ingenieros, para el diseño del embalse, se resume en lo siguiente.

El gasto sólido en suspensión se consideró como una tasa de sedimentación media a partir de los datos de concentraciones diarias de estación sedimentométrica.

El gasto sólido de fondo, en base a otros casos similares en Chile, se establece como 17% de GSS. Luego, considerando la capacidad máxima del embalse con el caudal medio afluente El sedimento en suspensión que quedará retenido según el método de Brune es el 90%.

Con todo lo anterior en la Tabla 4.2-1 se tienen los siguientes resultados.

Tabla 4.2-1: Resumen sedimentos retenidos por embalse.

|  |                  |
|--|------------------|
| Sedimento en suspensión que quedará en el embalse anualmente (m <sup>3</sup> )                         | 69.231           |
| Volumen de gasto sólido de fondo que quedará en el embalse en la vida útil (50 años) (m <sup>3</sup> ) | 9.986            |
| <b>Sedimento total retenido por al embalse anual (m<sup>3</sup>)</b>                                   | <b>79.217</b>    |
| Sedimento en suspensión que quedará en el embalse (m <sup>3</sup> )                                    | 3.461.550        |
| Volumen de gasto sólido de fondo que quedará en el embalse en la vida útil (50 años) (m <sup>3</sup> ) | 499.300          |
| <b>Sedimento total retenido por al embalse vida útil (m<sup>3</sup>)</b>                               | <b>3.960.850</b> |

Fuente: Sedimentología Embalse Chacillas EDIC ingenieros, 2002.

### 4.3. Control de erosión con vegetación

Se obtuvo del sitio IDE (www.ide.cl) la capa con la cobertura vegetal de la Región de Valparaíso, de la cual se clasificó el tipo de cobertura en la cuenca del Embalse. A continuación, se presenta la clasificación en la Figura 4.3-1

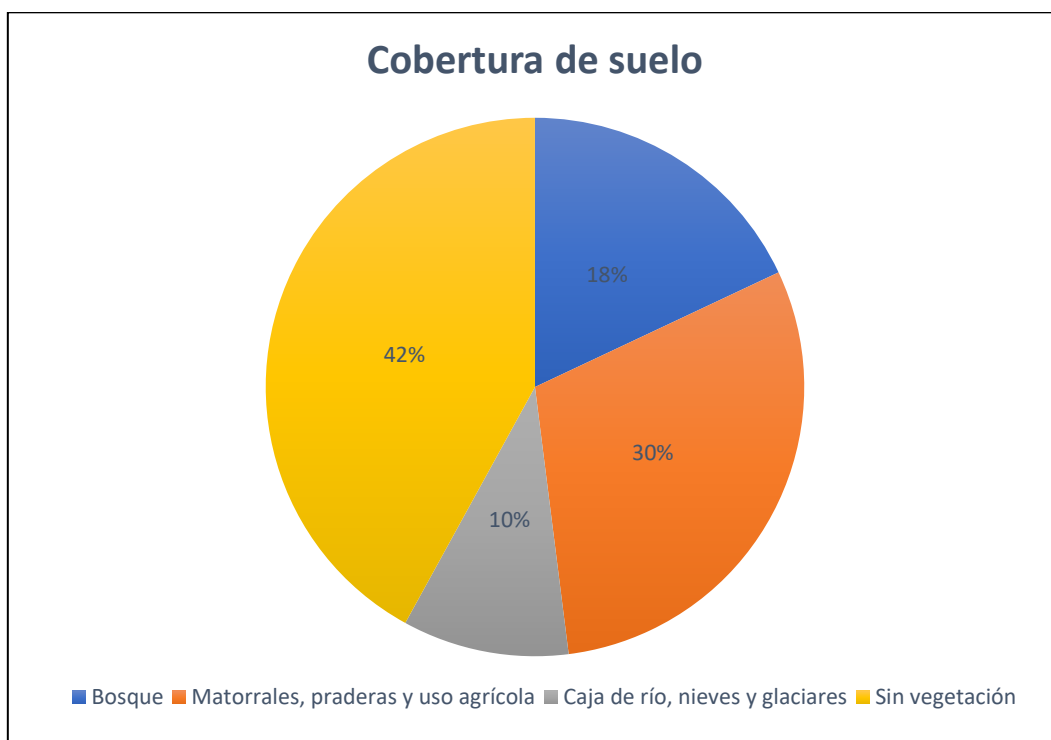


Figura 4.3-1: Cobertura de suelo cuenca del Embalse Chacrillas.

Notamos que alrededor de la mitad de la cuenca no posee vegetación, y la mayoría, de la vegetación existente son matorrales praderas y uso agrícola.

#### Resultados Método de Owen y Branson

Aplicando la fórmula de Owen y Branson para los siguientes datos de entrada que fueron obtenidos del diseño del Embalse Chacrillas.

- Desnivel máximo: 2500 m
- Longitud del cauce principal: 54 km
- Porcentaje de suelo desnudo: 42 %
- Aporte anual del volumen de gasto sólido por unidad de área:  $896 \text{ m}^3 / \text{km}^2 / \text{año}$

El total de aporte de sedimentos es de  $571.000 \text{ m}^3 / \text{año}$ . A partir de resultado notamos que el valor es mucho mayor al estimado para el diseño del embalse, aun así, se usara la diferencia

Luego, al área sin vegetación que corresponde al 42 % de la cuenca es  $268 \text{ km}^2$  de los cuales para la opción más optimista se redujo el 40 % del área para convertirlo en zona

con vegetación, también se calculó para un 30 % y 20 % de suelo sin vegetación. Los resultados se presentan en la Tabla 4.3-1.

Tabla 4.3-1: Resumen resultados método Owen y Branson.

| Suelo desnudo forestado [%] | Sedimento disminuido [%] | Aporte [m <sup>3</sup> /km <sup>2</sup> /año] | Sedimento cuenca [m <sup>3</sup> ] | Sedimento embalse [m <sup>3</sup> ] | Área a reforestar [km <sup>2</sup> ] |
|-----------------------------|--------------------------|---|------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|
| 0                           | 0                        | 896   | 4.160.206                          | 3.952.196                           | 0                                    |
| 40                          | 67                       | 324   | 1.375.189                          | 1.306.429                           | 255                                  |
| 30                          | 51                       | 439   | 2.038.288                          | 1.936.374                           | 191                                  |
| 20                          | 35                       | 582   | 2.701.388                          | 2.566.318                           | 127                                  |

A partir de resultado notamos que el valor es mucho mayor al estimado para el diseño del embalse, aun así, la finalidad de este cálculo es usar el porcentaje de disminución de sedimentos.

### Resultados FUPS

Los factores de la fórmula se presentan a continuación

- Factor R con el método IMF en donde las constantes a y b se obtuvieron de cálculos anteriores de la región de Coquimbo (a=1 y b=0) además las precipitaciones medias mensuales de obtienen de la DGA, estación pluviométrica Resguardo en los Patos.
- Factor K: Se determinó a partir del estudio de sedimentación en donde se establece el supuesto de igual cantidad de limo, arena fina y arcilla.
- Factor SL: a partir de la pendiente media de la cuenca y la longitud del cauce principal.
- S: 0,4 [%]
- L: 54 [km]
- Factor C: Este factor se determina en proporción al uso de suelo dado en la cuenca, ponderando cada uso con el porcentaje de área que usa.
- Factor P: Como se refiere a las técnicas de riego se mantuvo constante como 1 para no afectar a los cálculos.

Los factores utilizados en el cálculo se presentan en la Tabla 4.3-2

Tabla 4.3-2: Valores utilizados para el cálculo de FUPS.

|           | Valor utilizado |
|-----------|-----------------|
| Factor R  | 0,250           |
| Factor K  | 0,032           |
| Factor SL | 0,830           |
| Factor C  | 0,315           |
| Factor P  | 1,000           |

Realizando el mismo procedimiento anterior para FUPS se tienen los resultados en la Tabla 4.3-3

Tabla 4.3-3: Resumen resultados FUPS.

| Suelo desnudo forestado [%] | Sedimento disminuido [%] | Aporte [m <sup>3</sup> /km <sup>2</sup> /año] | Sedimento cuenca [m <sup>3</sup> ] | Sedimento embalse [m <sup>3</sup> ] | Área a reforestar [km <sup>2</sup> ] |
|-----------------------------|--------------------------|---|------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|
| 0%                          | 0%                       | 36  | 4.160.206                          | 3.952.196                           | 0                                    |
| 40%                         | 47%                      | 19  | 2.218.777                          | 2.107.838                           | 255                                  |
| 30%                         | 36%                      | 23  | 2.681.022                          | 2.546.971                           | 191                                  |
| 20%                         | 24%                      | 27  | 3.143.267                          | 2.986.104                           | 128                                  |

Según los resultados de los dos métodos utilizados, el porcentaje de reducción no es tan difieren entre un método y otro. Pero se considera más precisa la FUPS, porque los resultados de sedimentación que arroja son más semejantes a los usados en el diseño del embalse, además utiliza más información de la cuenca en estudio.

No se utilizaron los resultados del método de Namba, ya que arrojó resultados poco coherentes al correlacionar con la vegetación, además de valores alejados de los otros métodos seleccionados.

Para las dos formas de evaluar la disminución de la sedimentación con la vegetación es necesario evaluar qué especies se usarán para reforestar, los costos de la expropiación y mantención en la vida útil del proyecto.

El área a expropiar como parte de la presa, el área de inundación es 182,3 [ha] (como lo establece el Estudio de Impacto Ambiental), y el total de costos para la expropiación fue de 518 millones de pesos. Así, el costo promedio por hectárea es de 2,8 millones de pesos.

Tabla 4.3-4: Costo expropiación.

| Área a expropiar [ha] | Costo [\$]  |
|-----------------------|-------------|
| 204                   | 580.281.542 |

Fuente: DOH,2012.



Tabla 4.3-5: Resumen escenarios de área a reforestar.

| Porcentaje de suelo desnudo [%] | Aporte [m <sup>3</sup> /km <sup>2</sup> /año] | Aporte [m <sup>3</sup> /año] | Área a reforestar [km <sup>2</sup> ] |
|---------------------------------|---|------------------------------|--------------------------------------|
| 42                              | 1040  | 663.000                      | 0                                    |
| 40                              | 867   | 537.560                      | 13                                   |
| 30                              | 725   | 462.590                      | 77                                   |
| 20                              | 582   | 371.420                      | 140                                  |
| 10                              | 439   | 280.000                      | 204                                  |
| 5                               | 367   | 234.660                      | 236                                  |
| 2                               | 324   | 207.310                      | 255                                  |

Para establecer los costos, primero en la CONAF se encuentra el catastro de viveros por región actualizado al 2018. Para la región de Valparaíso se filtró las especies de interés con su disponibilidad y costo por unidad.

Según la CONAF la especie Pino Radiata es la más abundante en Chile, siendo un 69% de las plantaciones forestales, le sigue el eucalipto y el atriplex.

Se dispone del boletín N° 149 del Instituto Forestal perteneciente a CONAF, en donde se detalla los costos de diferentes especies de árboles por región. Además, en la “Tabla de costos vigentes”, también perteneciente a CONAF, se detalla el costo de una hectárea de forestación de ciertas especies de árboles según región en Chile. Considerando 700 plantas por hectárea.

De lo anterior se obtiene lo siguiente:

Tabla 4.3-6: Costos de especies nativas y exóticas.

|                                   |                 |         |                |
|-----------------------------------|-----------------|---------|----------------|
| Costos Boletín Inst. Forestal     | Espino Blanco   | 298     | \$/planta      |
|                                   | Pino radiata    | 50.000  | \$/1000 planta |
|                                   | Quillay         | 140     | \$/planta      |
| Costos Según Tabla de costo CONAF | Especie exótica | 350.000 | \$/ha          |
|                                   | Especie nativa  | 391.000 | \$/ha          |

Fuente: CONAF, 2014)

Finalmente, juntando todo lo anterior, y calculando los costos que se disminuyen en la presa, el vertedero y el área de expropiación de la zona de inundación se tienen los siguientes resultados que se muestran en la Tabla 4.3-7

El escenario 1 representa la alternativa de reforestar un 40% de la cuenca, que es el total del área que actualmente se encuentra sin vegetación. Luego el escenario 2 representa reforestar un 30 % del área de la cuenca y finalmente el escenario 3 representa reforestar un 20%.

Tabla 4.3-7: Resumen costos de implementar vegetación exótica y nativa.

|   |   | <b>Escenario 1</b>               | <b>Escenario</b> | <b>Escenario 3</b> |
|---|---|----------------------------------|------------------|--------------------|
| <b>Especie exótica</b>                          | Porcentaje área a reforestar [%]                | 40                               | 30               | 20                 |
|   | Área expropiar [km <sup>2</sup> ]               | 255                              | 191              | 127                |
|   | Costo expropiación [millones \$]                | 725,92                           | 544,44           | 362,96             |
|   | Costo reforestación [millones \$]               | 89,32                            | 66,99            | 44,66              |
|   | Costo mantención [millones \$]                  | 8,93                             | 6,699            | 4,46               |
|   | Costo total alternativa [millones \$]           | 824,17                           | 618,13           | 412,09             |
|   | Nueva altura muro [m]                           | 100,05                           | 100,68           | 102,27             |
|   | Volumen presa [hm <sup>3</sup> ]                | 4.541                            | 4.582            | 4.622              |
|   | Costo presa nuevo [millones \$]                 | 998,84                           | 957,39           | 917,91             |
|   | Costo vertedero nuevo [millones \$]             | 15,11                            | 11,24            | 7,58               |
|   | Costo área reducida [millones \$]               | 43347384                         | 39956355         | 31992720           |
|   | Costos totales disminuidos [millones \$]        | 1.057,31                         | 1.008,60         | 957,49             |
|   | <b>Beneficio final en 50 años [millones \$]</b> | <b>233</b>                       | <b>390</b>       | <b>545</b>         |
|   | <b>Especie nativa</b>                           | Porcentaje área a reforestar [%] | 40               | 30                 |
| Área expropiar [km <sup>2</sup> ]               |   | 255                              | 191              | 127                |
| Costo expropiación [millones \$]                |   | 725,92                           | 544,44           | 362,96             |
| Costo reforestación [millones \$]               |   | 99,78                            | 74,83            | 49,89              |
| Costo mantención [millones \$]                  |   | 9,97                             | 7,48             | 4,98               |
| Costo total alternativa [millones \$]           |   | 826,98                           | 624,98           | 416,65             |
| Nueva altura muro [m]                           |   | 100,05                           | 100,68           | 102,27             |
| Volumen presa [hm <sup>3</sup> ]                |   | 4541,16                          | 4582,61          | 4622,09            |
| Costo presa nuevo [millones \$]                 |   | 998,84                           | 957,39           | 917,91             |
| Costo vertedero nuevo [millones \$]             |   | 15,11                            | 11,24            | 7,58               |
| Costo área reducida [millones \$]               |   | 43,34                            | 39,95            | 31,99              |
| Costos totales disminuidos [millones \$]        |   | 1057,30                          | 1008,60          | 957,49             |
| <b>Beneficio final en 50 años [millones \$]</b> |   | <b>230</b>                       | <b>383</b>       | <b>540</b>         |

En los Anexos II al VII se presentan los flujos de caja de cada escenario para especie exótica y nativa.

El área a reforestar será con vegetación nativa de la zona, no se incluye en los cálculos como varía la producción de sedimentos según la especie de árbol que se tiene, pero según lo mencionado e la metodología las especies nativas tienen un mejor comportamiento al control de erosión, además la externalidad positiva que genera plantar especies nativas.

### Impactos ambientales

- Como impacto ambiental negativo, se tiene los perjuicios o problemas con la comunidad por las expropiaciones de terreno, ya que, según el reglamento ambiental, cuando el proyecto pertenece al gobierno, los propietarios tienen la obligación de realizar expropiación al estado.

- Además, el periodo de siembra, y las maquinarias de traslado pueden generar ruidos molestos por los traslados y levantamiento de polvo.
- El principal impacto positivo es el valor paisajístico de la zona, la vegetación aporta el paisaje y bienestar de la comunidad, además de toda la biota que conlleva un lugar con vegetación.
- A su vez, el impacto positivo también aporta a los recursos hídricos como el río Rocín y sus afluentes, que al transportar menos sedimentos sus aguas presentarían menos turbiedad, y puede desarrollarse más vida marina.
- Otro impacto positivo, son los beneficios de la reducción del muro del embalse y lo que conlleva con una menor área de inundación y menores expropiaciones en esa zona.

#### **4.4. Sabo Dam**

Con las imágenes satelitales DEM Aster con resolución 30m x 30m de la cuenca en estudio se generaron las curvas de nivel cada 30 metros en la cuenca. A partir de la topografía se escogieron los lugares más adecuados para construir los muros, justo en quebradas aguas arriba de la zona de inundación y aguas abajo de la zona de glaciales permanentes. Se escogieron un total de 5 ubicaciones posibles para la construcción de sabo dam. como se muestra en la Figura 4.4-1. Luego se realizaron las curvas de embalse para cada punto escogido.

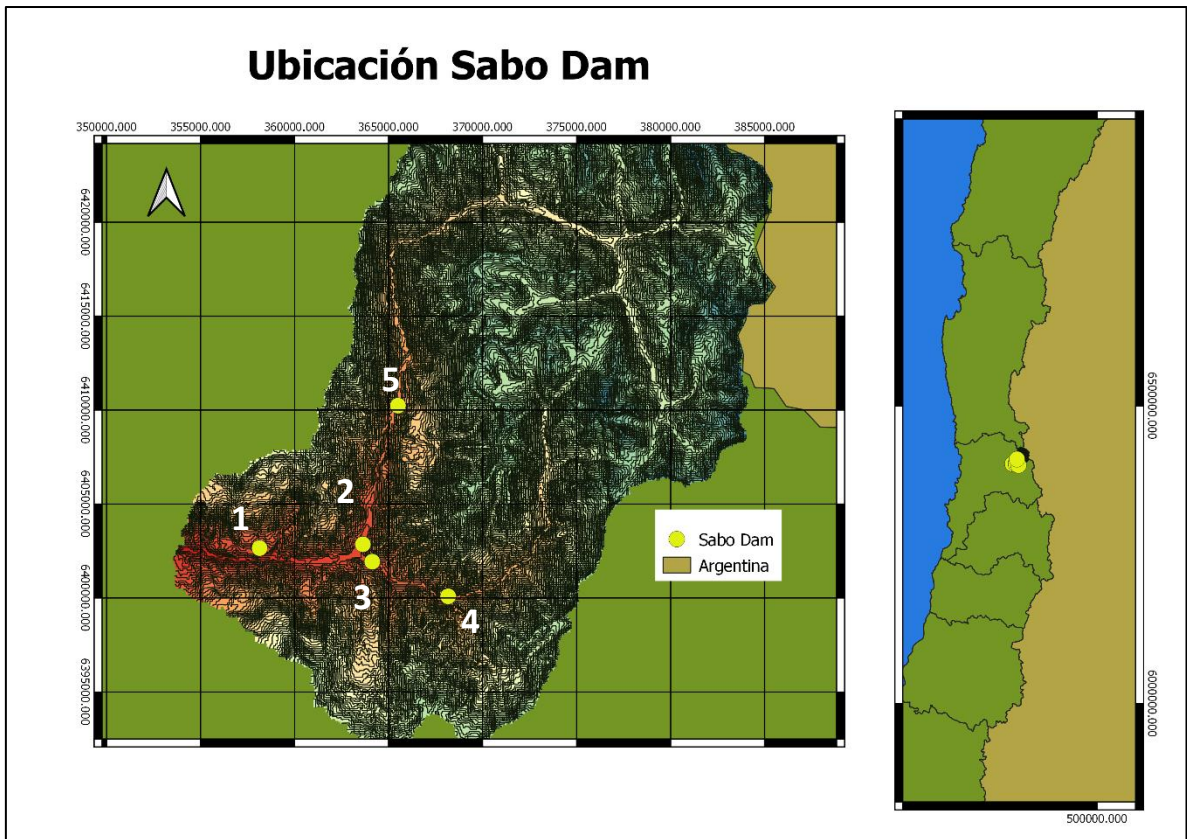


Figura 4.4-1: Ubicación adecuadas para construir Sabo Dam.

Fuente: Elaboración propia.

Las siguientes figuras representan las curvas cota/volumen para cada punto de ubicación de sabo dam, además en cada curva tiene el ajuste cuadrático que se representa como una línea punteada y que permite el cálculo del volumen acumulado a distinta cota.

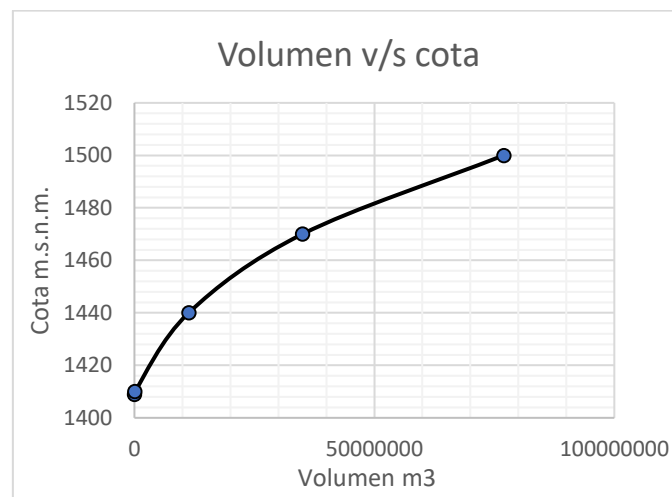


Figura 4.4-2: Curva volumen/Cota Sabo Dam 1.

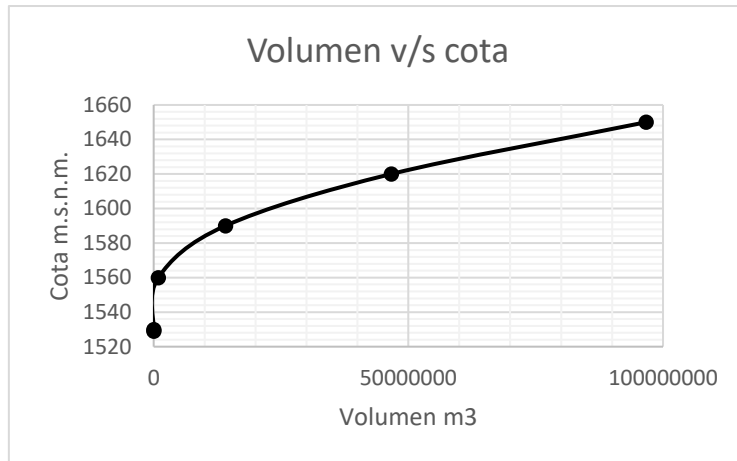


Figura 4.4-3: Curva volumen/Cota Sabo Dam 2.

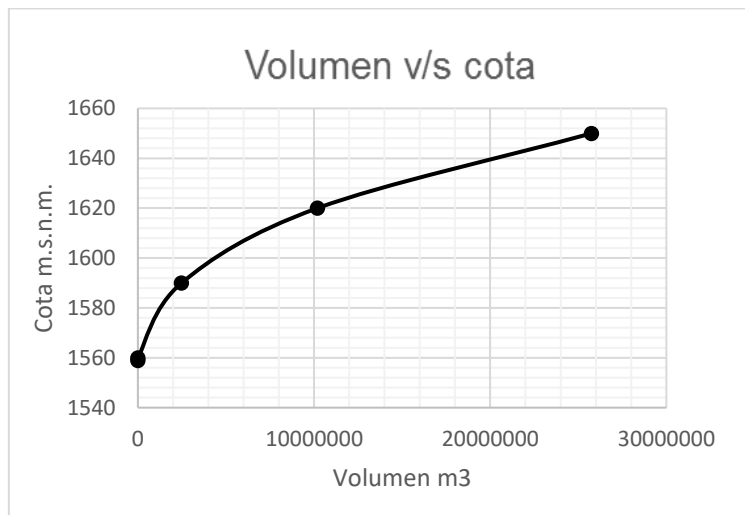


Figura 4.4-4: Curva volumen/Cota Sabo Dam 3.

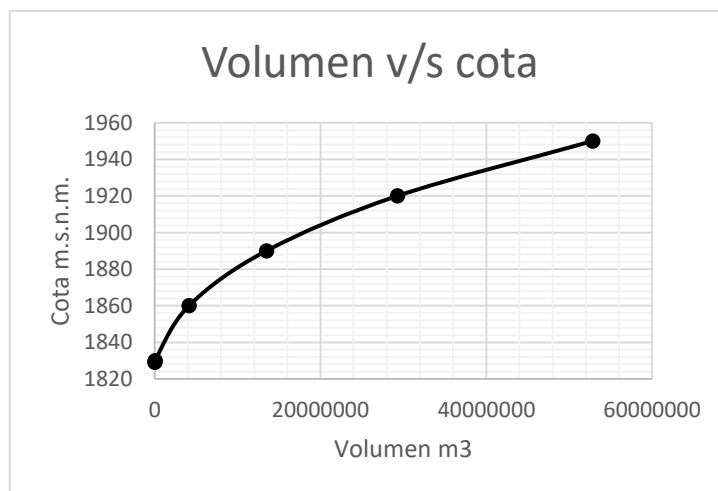


Figura 4.4-5: Curva volumen/Cota Sabo Dam 4.

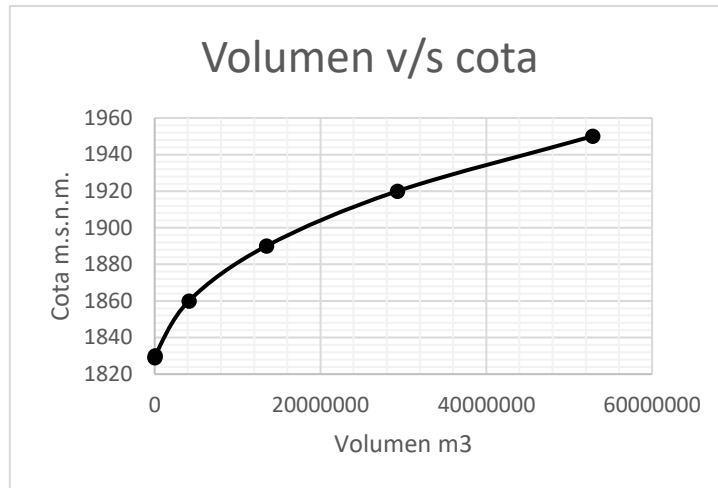


Figura 4.4-6: Curva volumen/Cota Sabo Dam 5.

La Tabla 4.4-1 muestra el volumen acumulado de cada quebrada para un muro con alturas que varían desde 1 a 4 metros de altura.

Tabla 4.4-1: Volumen acumulado según altura muro.

| Altura muro [m] | Volumen [m <sup>3</sup> ] |            |            |            |            |
|-----------------|---------------------------|------------|------------|------------|------------|
|                 | Quebrada 1                | Quebrada 2 | Quebrada 3 | Quebrada 4 | Quebrada 5 |
| 1               | 83.567                    | 5.755      | 9.113      | 290.17     | 794        |
| 2               | 11.680.035                | 11.510     | 126.907    | 217.496    | 107.864    |
| 3               | 12.049.429                | 17.264     | 208.080    | 352.244    | 179.124    |
| 4               | 12.418.823                | 23.019     | 289.253    | 486.991    | 250.384    |

El volumen de gasto sólido de fondo anual producido por la cuenca, en 1, 2, 3, 5 y 50 años (vida útil) se muestra en la Tabla 4.4-2.

Tabla 4.4-2: Gasto sólido de fondo, Embalse Chacrillas.

|         | Vol de GFF [m <sup>3</sup> /año] |
|---------|----------------------------------|
| 1 año   | 10.511                           |
| 2 años  | 21.023                           |
| 3 años  | 31.534                           |
| 5 años  | 52.557                           |
| 50 años | 525.578                          |

A partir de los resultados anteriores se concluye que la mejor ubicación para la ubicación de los muros es la Quebrada 1 ya que abarcan la mayor área posible para retener sus sedimentos y sus curvas de embalse muestran que almacenan gran volumen con poca altura.

Para el diseño del muro se ha considerado con una geometría como se ve en la Figura 4.4-9 se utiliza esta geometría por que ha sido utilizada en diseños para el mismo fin. Para sus dimensiones también se utilizó la topografía obtenido de Google Maps. Como se muestra en la Figura 4.4-7.



Figura 4.4-7: Ubicación Sabo Dam's.

El material para construir el muro puede ser de hormigón, de enrocado o tierra.

La tierra se descarta como material porque no tiene un buen comportamiento con las crecidas ya que pueden provocar erosión y posible colapso.

El enrocado puede ser adecuado si existe disponibilidad de material en la cercanía, se llama barreras vertedoras de enrocado y son al igual que el muro construido transversalmente en la dirección cauce, este tipo de obra posee varias ventajas y facilidades constructivas descritas anteriormente. En Chile se construyó una barrera vertedora en el Canal Teno Chimbarongo. Esta barrera consta de una barrera fija de 272 m de longitud con una altura de 3,72 m, aguas arriba tiene una pendiente de 3:1 (H:V) con un enrocado de 300 kg, y aguas abajo 10:1 (H:V) con un enrocado de 1000 kg. Se tiene un control de la obra y con el tiempo la estructura sólo ha sufrido pequeñas acomodaciones y socavaciones en el diente terminal. El diseño de esta barrera vertedora se usará como base para establecer las dimensiones de una barrera para este trabajo.

Para los costos se obtuvieron datos de precio de enrocados en el proyecto de escolleras del Puerto de San Antonio 2016, ubicado en la misma región que el Embalse a estudiar, como los precios de enrocado dependen mucho de la ubicación y existencia de canteras cerca, se consideró que los costos obtenidos son una buena referencia.

Tabla 4.4-3: Costos enrocado.

| Tipo de enrocado                    | UNIDAD         | Precio unitario[\$] |
|-------------------------------------|----------------|---------------------|
| Filtro roca 50 a 80 kg              | m <sup>3</sup> | 35.025              |
| Coraza roca de 500 a 800 kg         | m <sup>3</sup> | 36.820              |
| Escollera natural de 200 a 400 kg   | m <sup>3</sup> | 43.270              |
| Escollera piedra natural de 4000 kg | m <sup>3</sup> | 52.585              |
| Roca de 6000 a 8000 kg              | m <sup>3</sup> | 39.982              |

Fuente: Proyecto reparación de protección costera 2016, Puerto de San Antonio (EPSA).

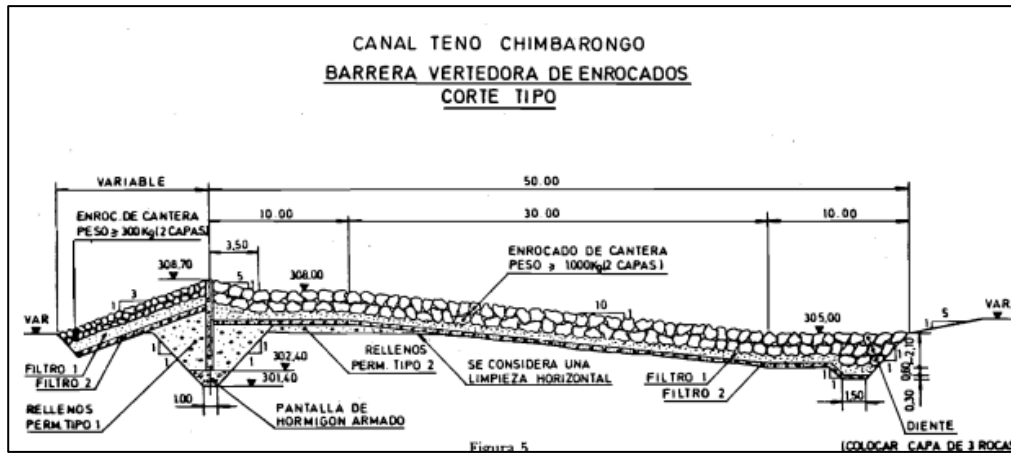


Figura 4.4-8: Vista longitudinal Canal Teno Chimbarongo.

Fuente: Alvarado, 1985.

También se ha considerado para muros de baja altura, el diseño de gaviones, que consisten en armazones hechas con mallas y rellenas de rocas de un cierto tamaño.

Para el tamaño del enrocado se usan las dimensiones del muro de hormigón pero con los taludes de enrocado usado en el diseño del Canal Teno Chimbarongo. Para aguas arriba se considera enrocado de 0 a 80 kg, en cambio para el talud agua abajo se considera coraza de 500 a 800 kg.

La Tabla 4.4-4 muestra las dimensiones, taludes del muro de enrocado, como también el volumen de enrocado necesario.

Tabla 4.4-4: Resumen dimensiones enrocado.

| Altura h [m] | Talud aguas arriba [-] | Talud aguas abajo [-] | Largo [m] | Volumen n [m <sup>3</sup> ] | Volumen enrocado 0 a 80 kg | Volumen enrocado 500 a 800 kg |
|--------------|------------------------|-----------------------|-----------|-----------------------------|----------------------------|-------------------------------|
| 1            | 3                      | 10                    | 20        | 260                         | 60                         | 200                           |
| 2            | 3                      | 10                    | 20        | 1040                        | 240                        | 800                           |

Para el muro de hormigón se consideró el diseño de una obra para el río Las Minas, Ubicado en Punta Arenas en la Región de Magallanes. Se elabora un muro para retener sedimentos con las siguientes dimensiones, se consideraron taludes similares a los de



diseño de otros muros de embalse construidos en Chile 1.5:1 H:V aguas arriba como en el embalse Puclaro y Santa Juana, y 2:1 H:V aguas abajo para el ancho de la cara superior se consideró 1 metro.

Tabla 4.4-5: Resumen dimensiones Muro de hormigón.

| Altura h [m] | Talud aguas arriba [-] | Talud aguas abajo [-] | Largo [m] | Volumen [m <sup>3</sup> ] |
|--------------|------------------------|-----------------------|-----------|---------------------------|
| 1            | 5                      | 6                     | 20        | 920                       |
| 2            | 5                      | 6                     | 20        | 1.040                     |

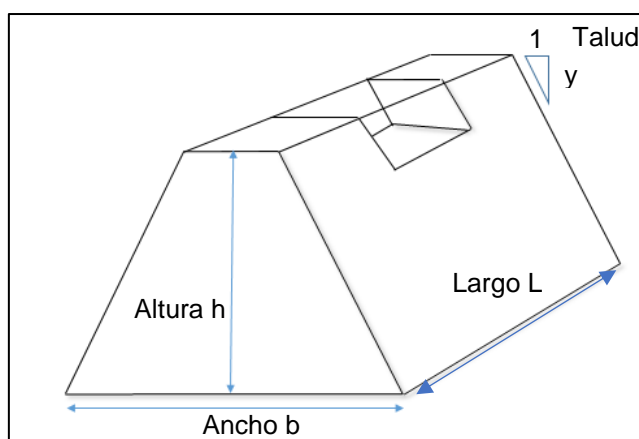


Figura 4.4-9: Ilustración diseño del muro de hormigón.

Los costos se obtienen con el volumen necesario de relleno de hormigón H30, más un porcentaje de gastos generales que incluye camino y limpieza. Además, se incluye un costo de mantenimiento por año que se incluye en el flujo de caja. En la siguiente tabla se detallan los costos de la sabo dam, considerando valores unitarios de materiales usados en el Embalse Chacrillas y los costos del enrocado.

Se consideró el escenario 1 como la construcción en la sabo dam 1 de altura 2 metros y el escenario 2 para dos muros, uno en la sabo dam 2 y otro en la sabo dam 3.

Para el escenario 1 no es necesario realizar limpieza para alcanzar a retener los sedimentos, ya que al volumen que encierra el muro es mucho mayor a los sedimentos del GSF producido, aun así, se considera que no se retiene el 100%.

En cambio, para el escenario 2, se debe realizar limpieza una vez cada 5, o una vez cada a 10 años, además como se encuentran un poco aguas arriba, no es capaz de retener todos los sedimentos, solo los ubicados aguas arriba.

Para calcular el volumen de gasto sólido de fondo que se disminuye para el embalse se siguió el siguiente procedimiento:

- Con las curvas de volumen versus cota de las sabo dam, se calcula el volumen encerrado en la cota de la altura del muro dada.

- Se compara este volumen con el GSF dado por el diseño del embalse, como el último es muy inferior, se asume que se retiene el 95% del gasto ya que según el método de Brune, esto es lo que se retiene en el embalse.
- Se resta el volumen disminuido a la curva de embalse del Embalse Chacrillas (la curva de embalse se encuentra en el Anexo I), y con esto se calcula cuanto disminuye la altura del muro.

Los costos del embalse que disminuyen se fijaron en 3 más importantes, disminución del tamaño de la presa, disminución del tamaño del vertedero y menor área a expropiar de la zona de inundación, según la siguiente metodología:

- Calcular volumen de presa con nueva altura y costo nuevo de la presa, según precios unitarios dados.
- Calcular volumen nuevo de relleno del vertedero según precios unitarios dados.
- Calcular área de zona de inundación que se reduce desde la curva de embalse, y costo menos de expropiación, según valores del sector por hectárea.

Finalmente, para la vida útil del embalse en la Tabla 4.4-6 se obtiene los siguientes resultados de costos para enrocado, muro, además el GSF y costos disminuidos por la implementación de Sabo Dam, para los dos escenarios.

La inversión de la construcción de los muros se encuentra en el Año 0 del flujo de caja.

En los Anexos VIII, IX, X y XI se incluyen el detalle de los flujos de caja para cada escenario.

El escenario 1 representa la construcción de un muro en la Quebrada 1, y el escenario 2 representa la construcción de dos muros, en la Quebrada 2 y 3.

Tabla 4.4-6: Resumen costos de implementar Sabo Dam de hormigón y enrocado.

| <b>Muro hormigón</b>                                | <b>Escenario 1</b> | <b>Escenario 2</b> |
|---|--------------------|--------------------|
| Costo muro [millones \$]                            | 76,45              | 152,90             |
| Sedimento retenido vida útil [m <sup>3</sup> ]      | 11.680.035         | 138.417            |
| Volumen de gasto de fondo embalse [m <sup>3</sup> ] | 24.965             | 124.825            |
| Volumen de gasto Total [m <sup>3</sup> ]            | 3.486.515          | 3.586.375          |
| Nueva Altura de embalse [m]                         | 101,5              | 101,5              |
| Nuevo volumen [m <sup>3</sup> ]                     | 2.221.873          | 2.221.873          |
| Costo Presa [millones \$]                           | 4637,30            | 4637,30            |
| Costo vertedero [millones \$]                       | 818,18             | 818,18             |
| Área expropiación menos [m <sup>2</sup> ]           | 89977              | 89977              |
| Costo expropiación disminuido [millones \$]         | 25,59              | 25,59              |
| Costo Sabo dam total [millones \$]                  | 84,09              | 168,19             |
| Costo Disminuido Embalse [millones \$]              | 96,77              | 96,77              |
| <b>Beneficio final vida útil [millones \$]</b>      | <b>6,68</b>        | <b>-59,15</b>      |

| <b>Muro enrocado</b>                                | <b>Escenario 1</b> | <b>Escenario 2</b> |
|---|--------------------|--------------------|
| Costo muro [millones \$]                            | 37,86              | 75,72              |
| Sedimento retenido vida útil [m <sup>3</sup> ]      | 11.680.035         | 138.417            |
| Volumen de gasto de fondo embalse [m <sup>3</sup> ] | 24.965             | 124.825            |
| Volumen de gasto Total [m <sup>3</sup> ]            | 3.486.515          | 3.586.375          |
| Nueva Altura de embalse [m]                         | 101,5              | 101,5              |
| Nuevo volumen [m <sup>3</sup> ]                     | 2.221.873          | 2.221.873          |
| Costo Presa [millones \$]                           | 463,730            | 463,730            |
| Costo vertedero [millones \$]                       | 818,18             | 818,18             |
| Área expropiación menos [m <sup>2</sup> ]           | 89.977             | 89.977             |
| Costo expropiación disminuido [millones \$]         | 25,59              | 25,59              |
| Costo Sabo dam total [millones \$]                  | 37,86              | 75,72              |
| Costo Disminuido Embalse [millones \$]              | 96,77              | 96,77              |
| <b>Beneficio final [millones \$]</b>                | <b>58,16</b>       | <b>19,55</b>       |

A partir de los resultados se tiene que el escenario con mayor beneficio neto es la construcción de un muro de enrocado con un VAN \$58 millones usando una tasa de descuento de 10 %. Ya que es más económico el muro de enrocado que de hormigón, aun cuando necesita más mantención.

### **Impactos ambientales**

- Impacto negativo en la etapa de construcción de la obra, ya sea el muro o enrocado, la calidad del aire por las emisiones generadas por máquinas y camiones, el ruido de la construcción, máquinas y depositación de materiales.
- Impacto positivo por la disminución de expropiaciones en el área de inundación, y menor altura del muro de embalse.

## **4.5. Flushing**

Para Primero se tienen el diseño del túnel de desvío del Embalse Chacrillas, está totalmente revestido de hormigón armado, las dimensiones se muestran en la Figura 4.5-1 y tiene una longitud de 202 m. El túnel ha sido diseñado para evacuar una crecida de 25 años de período de retorno que tiene una caudal máximo instantáneo de 113 m<sup>3</sup>/s. La pendiente del túnel es 2,3 %.

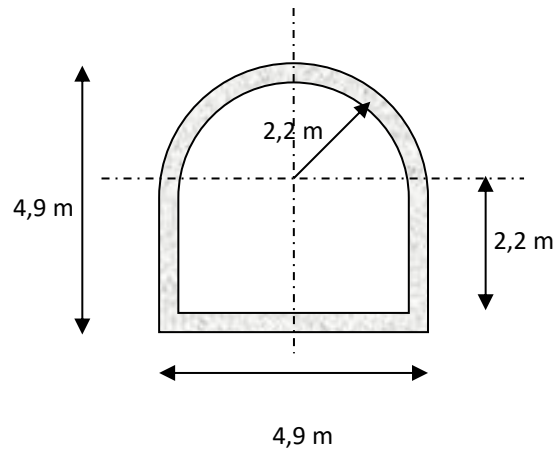


Figura 4.5-1: Sección Túnel de desvío.

Fuente: Informe Diseño de obras anexas Embalse Chacrillas, EDIC Ingenieros, 2002.

Según la metodología se recomienda que la pendiente no sea mayor a 2,4 %, por lo tanto, se emplea el túnel de desagüe como túnel de descarga del Flushing.

Es por esto que se le agregarán compuertas, además de las compuertas de emergencia que tiene en diseño. El costo de las compuertas según el diseño es de \$ 54 millones de pesos.

Con respecto al procedimiento del Flushing se tiene lo siguiente:

- Considerando las experiencias anteriores, la eficiencia de remoción de sedimentos es muy alta, pudiéndose llegar al 100%, pero para esto es necesario realizar extracciones todos los años, y por varios días hasta meses. Dado el fin de los embalses en estudio (de riego), no se considera factible realizarlo para un 100%, pero a partir del estudio realizado para el embalse Chironta, se considerará, realizar Flushing cada tres años, y que en promedio en la vida útil se descarga el 50% de los sedimentos, esto implica 118.000 m<sup>3</sup> de sedimento por cada periodo de descarga, considerando que la producción de la cuenca es de alrededor de 79.000 m<sup>3</sup> al año.
- Para escoger el mes de vertido, se debe tener en cuenta que hay entrega de riego en el periodo de abril a agosto, aunque se debe tener en cuenta que el embalse debe llenarse para el verano.
- El mes de mayor caudal en la cuenca del embalse es julio, entonces el embalse debe vaciarse los primeros días de julio y/o antes de una crecida.
- Posteriormente, al venir la crecida se abren las compuertas por un día.

#### Costos:

Los costos a considerar serán las compuertas que se deben instalar, además se deben controlar el pronóstico de crecidas y la operación del sistema.

Los costos que se disminuirán son considerando un volumen muerto de 1.980.425 m<sup>3</sup>, con esto se tiene una nueva altura de muro de la presa de 100,6 m, disminuyendo el tamaño del vertedero y el área de inundación.

En la Tabla 4.5-1 se muestra un resumen de costos de la alternativa.

Tabla 4.5-1: Resumen costos Flushing.

|  |               |
|--|---------------|
| Costo Flushing [millones \$]                     | 300           |
| Nueva altura muro [m]                            | 100,6         |
| Volumen presa [m <sup>3</sup> ]                  | 4.582.611.511 |
| Costo presa nuevo [millones \$]                  | 957,39        |
| Costo vertedero nuevo [millones \$]              | 11,24         |
| Costo área reducida [millones \$]                | 39,95         |
| Costos totales disminuidos [millones \$]         | 1.008,60      |
| <b>Beneficios totales Flushing [millones \$]</b> | <b>729</b>    |

A partir de los resultados, la aplicación de esta alternativa, considerando el uso del túnel de desvío, es económicamente factible, ya que se disminuyen los costos del embalse.

En el Anexo XII se presenta el flujo de caja del flushing.

### Impactos ambientales

- La construcción no genera impactos sobre los impactos ya generados en la construcción del embalse.
- Puede ser un impacto negativo para los regantes la operación del flushing ya que si bien en los meses que se implementa no se demanda cauda de riego, se genera una desconfianza de tener caudal asegurado para la temporada al vaciar el embalse.
- El vertido de sedimentos aguas abajo puede tener un sin fin de impactos negativos por la degradación de la calidad de agua, la flora y fauna aguas abajo.
- Además, considerando que la zona se ha declarado en sequía. El impacto del flushing en el agua superficial, destinada para el agua potable es un problema a considerar. También dependiendo la cantidad de sedimentos se pueden inundar o perjudicar posible construcción como pequeñas bocatomas aguas abajo.
- Sin embargo, se considera un impacto positivo el equilibrio de sedimentos en el lecho ya que una presa altera el equilibrio degradando el lecho aguas abajo y cambiando su morfología. Se espera que a largo plazo el cauce no sufra tantos cambios comparando con no realizar el Flushing y alterar de tal forma el equilibrio natural del lecho del río y el transporte de sedimentos.

## 4.6. Dragado

Para esta alternativa se considera solo la disminución de sedimentos finos en el dragado, ya que la bomba de succión extrae sedimento disuelto en agua.

La producción anual de sedimento fino es  $69.231 \text{ m}^3$  /año. Como el dragado no necesita que el embalse esté seco, pero si con poca altura de agua. La periodicidad de dragado será cada 3 años en el mes de menor caudal que es mayo. Siendo un total en 3 años de  $210.000 \text{ m}^3$  de sedimentos.

### Dragado:

El material a extraer por periodo será  $210.000 \text{ m}^3$  de sedimentos, esto es considerando un costo de  $5,14 \text{ Uf/m}^3$  dragado resulta un costo de \$ 4 mil millones de pesos, el cual es una cifra muy grande con respecto a los costos de la presa.

Como el costo de dragar todo el volumen generado de sedimentos es demasiado elevado, no se considera factible ya que la disminución de la altura del muro no supera los 2 a 3 metros. Se analizaron distintos volúmenes y se llegó a que la extracción de  $5000 \text{ m}^3$ , iguala los costos. Pero no es factible ya que, al extraer esa cantidad tan pequeña de sedimento, no generarían ninguna disminución considerable de los costos del embalse.

### Traslado y camiones:

Para el traslado del material, se utilizan camiones de capacidad de  $12 \text{ m}^3$ , y el tiempo de trabajo considerando el funcionamiento las 24 horas del día. Cabe destacar que los precios mencionados de dragado incluyen el traslado y depósito.

### Disminución costos embalse

Considerando que todo el volumen de gasto sólido en suspensión se disminuye, en el caso más favorable, la disminución de costos se asemeja a la aplicada en la alternativa de reforestación, esto es un valor aproximado de \$1.000 millones de pesos entre el área de expropiación, costos de la presa y el vertedero.

### Costos totales:

Para la vida útil del proyecto, dragar cada 3 años, todo el sedimento producido, para toda la vida útil tiene un costo de \$100 mil millones de pesos. Y con los costos disminuidos de \$1000 millones, se tiene un beneficio negativo de \$-99 mil millones de pesos.

Finalmente, se concluye que a menos que bajen los costos de dragado en el país, la cantidad de sedimentos que es necesario extraer de un embalse mayor, no es económicamente factible, hacerlo mediante este procedimiento.

En el Anexo XIII se presenta el flujo de caja del dragado.

## **Impactos ambientales**

- Impacto negativo, al momento de realizar el dragado, aumento del ruido debido a la dragadora y los camiones; también disminución de la calidad del aire, aunque no de tan gran magnitud dado que los sedimentos estarán húmedos.
- El proceso de dragado genera un impacto en el agua, ya que al remover los sedimentos aumenta la turbiedad y puede impactar la flora y fauna del río.
- Puede variar el fondo del vaso del área de inundación, no se ha estudiado que impacto puede tener lo anterior en los flujos.
- Impacto positivo, disminuye las dimensiones de las obras del embalse, y el área de inundación, generando menos problemas con la comunidad.

## **4.7. Extracción mecánica**

La producción anual de sedimento total estimada para el embalse Chacrillas es de 70 mil m<sup>3</sup> de sedimentos por año aproximadamente. Luego, consideramos la extracción mecánica solo para la fracción gruesa, ya se operará cuando el embalse está seco, el GSF se estimó en un 17% del GSS, entonces anualmente la cuenca produce alrededor de 10 mil m<sup>3</sup> de sedimento grueso. En la vida útil son 500 mil m<sup>3</sup> de sedimentos.

Se extraen cada 3 a 5 años dependiendo la disponibilidad de embalse seco o no, en el mes de mínimo caudal antes de las lluvias que es en mayo para este caso. Pero para ser conservadores se considera el sedimento producido en 10 años, para considerar el diseño de la presa como parte del embalse. Se calcularán los costos utilizando un periodo de 3 años de extracción. Exactamente 29.900 m<sup>3</sup> de sedimento se extraerán por cada periodo de extracción.

Aplicando la metodología descrita, se tiene que:

### Máquina excavadora:

El material a extraer por periodo de extracción es 30 mil m<sup>3</sup>. Y el rendimiento de la excavadora con volumen de cuchara de 0,9 m<sup>3</sup> es 100 m<sup>3</sup> /hora. Entonces, se tarda 300 horas, para esto se consideran tres máquinas excavadoras que trabajen 12 horas diarias durante 9 días.

El costo de lo anterior es \$ 181 millones de pesos.

### Traslado y depósito de material:

Luego, para los camiones de capacidad 8 m<sup>3</sup>, considerando el funcionamiento todo el día. Se necesitan, además una cotización de depósito de material a un vertedero autorizado en la Región de Valparaíso es \$2500 por m<sup>3</sup> de material depositado. Así el costo de cada periodo de extracción del transporte de material es \$ 75.000.000-.

Finalmente, cada periodo de extracción tiene un costo de \$256 millones.

#### Costos reducidos del embalse:

Aplicando esta alternativa, se disminuye el 90% de los sedimentos gruesos (ya que, el 10% admisible, es el que se acumula entre cada periodo de extracción) dando un valor de 449.000 m<sup>3</sup>. Entonces, los sedimentos totales del embalse aplicando la extracción mecánica son 3.511.480 m<sup>3</sup>.

Llevando este resultado a la curva de embalse, se obtiene una nueva altura de muro de 11,5 m ya que la disminución de sedimentos es casi idéntica a la implementación de Sabo Dam, con el máximo de volumen disminuido. Por lo que los costos disminuidos son \$96.777.764

#### Costos totales:

Realizando el flujo de caja al año 50 se tiene un VAN de \$-318.971.775.

La alternativa, no es factible de implementar, ya que el porcentaje de sedimentos gruesos es pequeño con respecto al total, por lo tanto, la disminución de costos en el embalse no es tan grande como así los costos de extracción mecánica.

En el Anexo XIV se presenta el flujo de caja de la extracción mecánica.

### **Impactos ambientales**

- En cada periodo de extracción de sedimentos las excavadoras y camiones generan contaminación, de material particulado 2,5 y 10 µm (partículas de tamaño igual o menor a 10 u 2,5 micras) y de gases como los óxidos nitrosos, óxido de carbono. En el caso de los camiones por el levantamiento de sedimentos cuando están en funcionamiento.
- El impacto positivo es la disminución de dimensiones del embalse como presa y vertedero, también una menor área de inundación genera menos expropiaciones a la comunidad.

## **4.8. Resumen resultados finales**

A continuación, se presenta una tabla resumen con todos los beneficios totales de aplicar la alternativa, esto es, realizar un flujo de caja con los costos de cada alternativa y los costos disminuidos de las obras más influyentes en el embalse, que son la presa, el vertedero y las expropiaciones del área de inundación. El flujo de caja se realiza en toda la vida útil del embalse, y cada escenario estudiado.

Para la realización del flujo de caja se consideraron como costos, los costos de la implementación de la alternativa y como beneficio los costos disminuidos de las obras



consideradas en los cálculos. La tasa social de descuento utilizada es un 10% valor (Cartes y Contreras, 2015), considerado para grandes proyectos hidroeléctricos e hidráulicos en Chile, también se ha consultado la tasa social en el Ministerio de Desarrollo Social y equivale a 6%. Se consideró un horizonte de evaluación de 50 años. El Flujo de caja se realiza sin valor residual, ya que la vida útil es muy alta y usualmente los embalses siguen operando luego de su vida útil.

Como comparación, se presentan los costos que se consideraron en la evaluación (estos son los costos de la presa, del vertedero y las expropiaciones) que corresponden a \$6.900 millones de pesos y los costos totales del proyecto Embalse Chacillas \$42,2943 millones de dólares, que equivalen a \$30 mil millones de pesos (valor del dólar, 29 octubre 2018).

Analizando la Tabla 4.8-1 los costos disminuidos de las alternativas considerando los costos evaluados llegan al 11% al aplicar el flushing, considerando el uso del túnel de desvío como medio de descarga de sedimentos. A nivel del proyecto general se logra una disminución de 2,4% de los costos totales del embalse.

Luego, la siguiente opción más favorable, con 8% de costos disminuidos es reforestar con vegetación nativa o exótica con cobertura 20% del área de la cuenca. Para la finalidad del punto de vista ambiental se recomienda escoger las especies nativas. Lo anterior significa una disminución de un 1,8 % de los costos totales del proyecto.

La Tabla 4.8-1 presenta el costo y VAN de cada alternativa considerando las obras más importantes del embalse. Se presentan los costos en el diseño del embalse y los costos que tendrían aplicando la alternativa, y el porcentaje de costos que se disminuyen considerando el costo total sólo de las obras consideradas anteriormente. En la última columna se muestra el porcentaje de costos disminuido considerando el costo total del proyecto embalse.

Finalmente, la opción menos viable económicamente es el dragado, ya que para los costos que se utilizan actualmente en Chile, aún es muy costosa dada el nivel de magnitud de sedimentos de un embalse mayor.

Tabla 4.8-1: Resumen VAN alternativas.

|  | <b>Costo inicial<br/>[millones \$]<br/>[1]</b> | <b>Costo final<br/>[millones \$]<br/>[2]</b> | <b>VAN<br/>[millones \$]<br/>[3]</b> | <b>Reducción<br/>costo [%]<br/>[4]</b> | <b>Reducción<br/>costo total [%]<br/>[5]</b> |
|--|--|--|--------------------------------------|--|--|
| Control vegetación<br>Especie nativa<br>40%  | 6695,2   | 6465,6                                       | 229,6                                | 3%                                     | 0,8%   |
| Control vegetación<br>Especie nativa<br>30%  | 6695,2   | 6307,4                                       | 387,8                                | 6%                                     | 1,3%   |
| Control vegetación<br>Especie nativa<br>20%  | 6695,2   | 6151,5                                       | 543,7                                | 8%                                     | 1,8%   |
| Control vegetación<br>Especie exótica<br>40% | 6695,2   | 6454,9                                       | 240,3                                | 4%                                     | 0,8%   |
| Control vegetación<br>Especie exótica<br>30% | 6695,2   | 6299,4                                       | 395,8                                | 6%                                     | 1,3%   |
| Control vegetación<br>Especie exótica<br>20% | 6695,2   | 6146,2                                       | 549,0                                | 8%                                     | 1,8%   |
| Sabo Dam<br>Hormigón 1 muro                  | 6695,2   | 6688,5                                       | 6,7                                  | 0%                                     | 0,0%   |
| Sabo Dam<br>Hormigón 2 muro                  | 6695,2   | 6754,4                                       | -59,2                                | -1%                                    | -0,2%  |
| Sabo Dam<br>enrocado 1 muro                  | 6695,2   | 6637,0                                       | 58,2                                 | 1%                                     | 0,2%   |
| Sabo Dam<br>enrocado 2 muro                  | 6695,2   | 6675,6                                       | 19,6                                 | 0%                                     | 0,1%   |
| Flushing                                     | 6695,2   | 5965,5                                       | 729,7                                | 11%                                    | 2,4%   |
| Dragado                                      | 6695,2   | 130095,9                                     | -123400,0                            | -1843%                                 | -411%  |
| Extracción<br>mecánica                       | 6695,2   | 7014,2                                       | -319,0                               | -5%                                    | -1,1%  |

[1] Costo inicial de las obras sin considerar las alternativas [millones de \$]

[2] Costo de obras considerando, costo y beneficio de alternativa correspondiente [millones \$]

[3] VAN [millones \$] considerando costo de las obras, costos y beneficios de aplicar alternativa.

[4] Porcentaje de reducción de costos con respecto a los costos considerados en flujo de caja.  $((1)-[2])/[1] \times 100$

[5] Porcentaje de reducción de costos con respecto al costo total del proyecto \$30.000 millones (valor del Dólar: 29 de Octubre 2018)  $((1)-[2])/ \$30.000 \times 100$

### **Análisis de sensibilidad de los costos**

Como los cálculos de costos se realizan a nivel de perfil, es necesario considerar un análisis de sensibilidad, con respecto a los costos que va a tener realmente a nivel de factibilidad, se considera una variación del +/-30% de los costos utilizados y luego, se

evalúa el cambio del VAN del proyecto. Y se presenta en la Tabla 4.8-2 lo que varía el porcentaje de disminución de costos con respecto al proyecto total.

Tabla 4.8-2: Análisis de sensibilidad de los costos alternativas a nivel de perfil.

| Alternativa                            | Porcentaje<br>disminución<br>de costos | -30 % costos | - 20%<br>costos | +30%    | +20%    |
|--|--|--------------|-----------------|---------|---------|
| Control vegetación Especie nativa 40%  | 0,8%                                   | 1,0%         | 0,9%            | 0,5%    | 0,6%    |
| Control vegetación Especie nativa 30%  | 1,3%                                   | 1,7%         | 1,6%            | 0,9%    | 1,0%    |
| Control vegetación Especie nativa 20%  | 1,8%                                   | 2,4%         | 2,2%            | 1,3%    | 1,4%    |
| Control vegetación Especie exótica 40% | 0,8%                                   | 1,0%         | 1,0%            | 0,6%    | 0,6%    |
| Control vegetación Especie exótica 30% | 1,3%                                   | 1,7%         | 1,6%            | 0,9%    | 1,1%    |
| Control vegetación Especie exótica 20% | 1,8%                                   | 2,4%         | 2,2%            | 1,3%    | 1,5%    |
| Sabo Dam Hormigón 1 muro               | 0,0%                                   | 0,0%         | 0,0%            | 0,0%    | 0,0%    |
| Sabo Dam Hormigón 2 muros              | -0,2%                                  | -0,3%        | -0,2%           | -0,1%   | -0,2%   |
| Sabo Dam enrocado 1 muro               | 0,2%                                   | 0,3%         | 0,2%            | 0,1%    | 0,2%    |
| Sabo Dam enrocado 2 muros              | 0,1%                                   | 0,1%         | 0,1%            | 0,0%    | 0,1%    |
| Flushing                               | 2,4%                                   | 3,2%         | 2,9%            | 1,7%    | 1,9%    |
| Dragado                                | -411,3%                                | -534,7%      | -493,6%         | -287,9% | -329,1% |
| Extracción mecánica                    | -1,1%                                  | -1,4%        | -1,3%           | -0,7%   | -0,9%   |

Según la Tabla 4.8-2, es posible ver que el Flushing sigue siendo económicamente viable ya que, en el caso más desfavorable, aun aumentando los costos en un 30%, se logra una disminución de los costos totales del embalse en un 1,7 %. Y en el caso más favorable los costos se llegan a disminuir en un 3,2%.

También se tiene que la reforestación con vegetación nativa o exótica en el caso más desfavorable sigue disminuyendo los costos totales, al igual que la construcción de Sabo Dam con un muro.

Por otro lado, se refuerza la idea de que la extracción mecánica y dragado hasta en el caso más desfavorable no es factible económicamente.

La Tabla 4.8-3 presenta un resumen de los impactos ambientales positivos y negativos que generan cada alternativa aplicada, mencionando la actividad, el impacto y si es positivo o negativo.

Tabla 4.8-3: Resumen impactos ambientales producidos por las alternativas planteadas.

| Alternativa            | Actividad                          | Impacto   | Carácter del impacto |
|------------------------|------------------------------------|---|----------------------|
| Control con vegetación | Expropiación área cuenca           | Problemas con comunidad   | (-)                  |
|                        | Maquinaria                         | Ruido y polvo   | (-)                  |
|                        | Paisaje                            | Mayor área verde  | (+)                  |
|                        | Reducción dimensiones presa        | Menos área inundada   | (+)                  |
| Sabo Dam               | Construcción Muro                  | Calidad del aire y ruido  | (-)                  |
|                        | Limpieza muro                      | Calidad del aire y ruido  | (-)                  |
|                        | Reducción dimensiones presa        | Menos área inundada   | (+)                  |
| Flushing               | Vaciado embalse                    | Desconfianza, inseguridad regantes aguas abajo                                | (-)                  |
| Flushing               | Descarga sedimentos aguas abajo    | Posible degradación calidad de agua, y biota, problemas con obras aguas abajo | (-)                  |
|                        | Descarga de sedimentos aguas abajo | Restablecer equilibrio sedimentológico lecho                                  | (+)                  |
|                        | Reducción dimensiones presa        | Menos área inundada   | (+)                  |
|                        | Operación dragado                  | Degradación calidad del aire y ruido  | (-)                  |
| Dragado                | Operación maquinaria               | Degradación calidad del agua  | (-)                  |
|                        | Traslado a botadero                | Degradación calidad del aire y ruido  | (-)                  |
|                        | Reducción dimensiones presa        | Menos área inundada   | (+)                  |
|                        | Operación maquinaria               | Degradación calidad del aire y ruido  | (-)                  |
| Extracción Mecánica    | Operación maquinaria               | Degradación calidad del agua  | (-)                  |
|                        | Traslado a botadero                | Degradación calidad del aire y ruido  | (-)                  |
|                        | Reducción dimensiones presa        | Menos área inundada   | (+)                  |

## Capítulo 5. Conclusiones y recomendaciones

En general, cada alternativa va enfocada a retener sedimentos fino o grueso mayoritariamente. Por ejemplo, la vegetación ayuda a controlar todo el sedimento, al igual que el Flushing, en cambio, en la Sabo Dam, se evalúa sólo con el sedimento grueso. La extracción mecánica es eficaz para el sedimento grueso y el dragado para el fino mayoritariamente. Es por esto que, primero se debe estudiar la cuenca aportante, analizar qué tipo de sedimento se genera y luego plantear qué alternativa se acomoda más al problema.

La mejor alternativa del punto de vista económico es el Flushing ya que genera la mayor disminución en los costos del embalse un 2,4% esto se debe principalmente a que se evaluó utilizar el túnel de desagüe de fondo para su descarga, y que el Embalse Chacrillas genera mayoritariamente sedimentos finos. A pesar de ser una alternativa utilizada en otros países hace muchos años, en Chile nunca se ha utilizado en embalses. El Embalse Chironta sería el primero y aún no se sabe cómo funcionará en la práctica, pero resulta ser la alternativa más económica de implementar.

La reforestación de la cuenca para el control de la sedimentación es el método más adecuado, y ambientalmente correcto para disminuir la erosión en la cuenca. Se evaluó bosque nativo y exótico, pero suponiendo la misma eficiencia de control de erosión. Ante esto, como el costo de la especie exótica es menor, la segunda alternativa sería más factible según costos. Entre los tres escenarios evaluados, el mejor fue reforestar 20% área de la cuenca que no tiene vegetación (considerando que la cuenca tiene un 42% de área sin vegetación), esto es 128 km<sup>2</sup> de bosque. Se disminuye en promedio 1,8% de los costos totales, que si bien no es mucho, los impactos y externalidades positivas por la vegetación, menor erosión y disminución de dimensiones de las obras, lo sugieren como la mejor forma de control de erosión. El único factor de riesgo es la disponibilidad de los terrenos que debería ser expropiado o llegar a un acuerdo con sus dueños, y la relación con la comunidad.

La alternativa de Sabo Dam, también genera un balance positivo, sobre todo considerando un muro de enrocado ya que es más barato que el hormigón, teniendo la disponibilidad de roca cerca. Se disminuye alrededor de 1% de los costos, esto a pesar que el embalse según el diseño solo genera un 17% de sedimento grueso, es por esto que para un embalse que tenga mayor sedimento grueso que fino, es altamente recomendado la construcción de estos muros.

El dragado, es una técnica que funciona, pero los costos en Chile por lo menos todavía son muy altos para que sea factible su implementación. Sólo se realiza a menor escala en ríos y puertos.

Luego de la evaluación económica, se escoge utilizar el Flushing como técnica que más disminuye costos, y desde el punto de vista ambiental y de impactos positivos la vegetación con bosque nativo se perfila como la mejor.

El análisis de costos se realizó a nivel de perfil, por lo que los costos a nivel de factibilidad pueden variar alrededor de +/- 20 % a 30 %. Como los costos evaluados son mucho menor al costo total del embalse no se presentan grandes variaciones al aplicar esta desviación. Con respecto a los resultados considerando el caso más desfavorable de variación, se tiene que la implementación de Flushing y reforestación de la cuenca siguen siendo factible económicamente, esto se debe a que estas alternativas son las

mejores para el Embalse Chacrillas en particular, ya que presenta alto contenido de sedimento fino.

La mayor incerteza en los cálculos, es que las metodologías consideran cálculos no muy exactos porque no se pueden precisar más con la información disponible, y solamente acotarse información de estudios anteriores.

En general los impactos ambientales de las alternativas son mayormente positivos, en espacial en la vegetación, es necesario el análisis del impacto negativo mencionado anteriormente del Flushing y también si a largo plazo pudiese ser un impacto positivo restablecer el equilibrio de sedimentos en el lecho.

La sedimentación en los Embalses, es un tema que ha sido tratado y estudiado, pero en Chile no se le ha dado la importancia que merece. Esto se puede ver por la poca cantidad de estaciones sedimentométricas existentes en Chile, por ejemplo, y por los métodos utilizados para el cálculo del gasto sólido de fondo y en suspensión en los diseños de embalse en Chile. Por ejemplo, para el Embalse Chacrillas se escoge un Método empírico para el GSS, y en base a estudios anteriores se escoge que el GSF es el 17% del GSS. Son métodos basados mayormente en fórmulas empíricas de embalses en Estados Unidos por ejemplo, y comparación es de otras cuencas similares. Si bien al momento de escoger, se elige el más conservador, si se profundizaran un poco más los cálculos o se tuvieran más mediciones, podrían ahorrarse costos, prácticamente por el desconocimiento que existe.

Es fundamental, para el desarrollo de estas medidas, implementar en Chile una mejor red de medición de sedimentos, para poder realizar cálculos más precisos de aporte en las cuencas con metodologías que requieren de más información de entrada, y así posiblemente no ser tan conservador en los diseños. También estudiar la composición del sedimento obtenido de las estaciones de sedimentología para por ejemplo, poder estudiar sus propiedades químicas, y así evaluar si tienen un impacto negativo su acumulación o descarga.

Como el Flushing resulta ser el más económico, es necesario realizar estudios preferentemente un modelo físico del comportamiento de la corriente de turbidez al llegar al embalse y al descargarse aguas abajo, para poder calcular tangiblemente los costos y beneficios producidos y el impacto que tendría agua abajo. Se recomienda para estudios posteriores evaluar el comportamiento de la corriente de turbidez del Flushing mediante un modelo físico.

Dada el momento que se vive en Chile, de escasez hídrica es fundamental, la construcción de embalses para acumular el agua generada en las crecidas, y controlar los sedimentos de las cuencas para permitir que la vida útil pueda ser mayor, y no tener problemas a futuro con la capacidad útil de estos.

Los estudios pendientes del tema son la realización de un modelo físico del Flushing aplicado a nuestro país y la descarga aguas abajo del embalse. Junto con esto, un modelo matemático para poder comparar resultados. Otro estudio recomendado es analizar fórmulas y metodologías para determinar el efecto de la vegetación de una cuenca, en la producción de sedimento, aplicación a un caso en Chile.

## Capítulo 6. Bibliografía

- Alvarado Montero, Lincoln (1985). "Uso de enrocados en Obras Hidráulicas" Santiago, Chile.
- Arrau Ingeniería (2016). "Estudio topobatimétrico y análisis de prolongación de la vida útil del embalse Paloma, Región de Coquimbo" Informe Final.
- Asaeda, Takashi, Rashid, Mr. (2010). "Effect of hydrological changes on algal blooming in the reservoir and the required modification for treatments". Institute for Environmental Science & Technology, Saitama University, 255 Shimo-okubo, Sakura-ku, Saitama, Japan.
- Barrena Gana, José Ignacio (2013). "Propuesta de modernización para el monitoreo del sistema de dragado del buque Ernesto Pinto Lagarrigue" Proyecto para optar a título de: Ingeniero Naval. Valdivia, Chile.
- Benitez, A. (1984). "Estimación de la sedimentación en el embalse Central Rapel, Endesa".
- Cartes, Fernando, Contreras, Eduardo y Cruz, José Miguel (2005). "La Tasa social de Descuento en Chile". Centro de finanzas, Ingeniería Industrial Universidad de Chile.
- Chanson, H. (2004). Sabo Check Dams - Mountain Protection Systems in Japan JI River Basin & Manag., Vol. 2, No. 4, pp. 301-307 (ISSN 1571-5124). Recuperado de: <http://staff.civil.uq.edu.au/h.chanson/sabo.html>.
- CONAF 2014, Boletín N°149.
- Dirección de Obras Hidráulicas (DOH) "Construcción Embalse Ancoa, Estudio de Factibilidad, 2002", y "Construcción Diseños complementarios Proyecto Embalse Ancoa, 2005"
- EDIC Ingenieros "Diseño Embalse y Central Punilla". DOH, 2002.
- Empresa Nacional de Electricidad, ENDESA "Central Ralco Descripción de proyecto", Octubre 1997.
- Filosa Barría, Enzo (2017) "Estudio sedimentación en embalse La Paloma, Región de Coquimbo". Memoria de Título de Ingeniería Civil, Universidad Católica de Valparaíso.
- Gajardo, M. (2003). "Estudio del Manejo de Sedimentos en el Embalse Puntilla del Viento, Cuenca del Río Aconcagua, V Región, Mediante el Uso de dos Softwares." Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.
- González, J. (2006). "Sedimentación en embalses considerando el efecto de corrientes de turbidez: desarrollo e implementación de un modelo matemático y

- numérico”. Memoria de Magister en Ciencias de la Ingeniería. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.
- Gracia Sánchez, Jesús. (1986), “Sedimentación en embalses”. Capítulo 18 del Manual de Ingeniería de Ríos, UNAM.
  - Gracia Sánchez, Jesús. (1986), “Pérdida de suelo en la cuenca”. Capítulo 17 del Manual de Ingeniería de Ríos, UNAM.
  - Instituto forestal “Boletín de precios forestales N°149” Septiembre 2018, Santiago, Chile.
  - Lecaros Sánchez, Matías Hernán (2011) “Estudio de Sedimentación en el Embalse Rapel”. Memoria de Título de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.
  - López, A., Arrau, L. y Núñez, O. (1993). “Sedimentación en el embalse Cogotí.” XI Congreso de Ingeniería Hidráulica, Universidad de Concepción, Concepción, Chile.
  - Mao, Luca (2016). “Sedimentos, Hidráulica y Efectos Morfológicos”. Preparado para la Mesa de Hidroelectricidad Sustentable. Ministerio de Energía, Chile.
  - Mancilla Escobar, Gabriel (2008). “Uso de la ecuación universal de pérdidas de suelo en el campo forestal”. Apuntes docentes, 2008. Santiago de Chile, Universidad de Chile.
  - Ministerio de Obras Públicas (MOP), Dirección de Obras Hidráulicas (DOH) “Diseño Embalse Chironta, Valle del Lluta, 2012, Diseño del sistema de Purga”, Embalse Chironta, 2014. Informe Final.
  - Ministerio de Obras Públicas (MOP), Dirección de Obras Hidráulicas (DOH) “Proyecto construcción del embalse de riego en el Río Chalinga, 2013”. Estudio de prefactibilidad.
  - Ministerio de Obras Públicas de Chile (2015). Decreto Supremo MOP N° 50 “Aprueba Reglamento a que se refiere el artículo 295 inciso 2°, del Código de Aguas, estableciendo las condiciones técnicas que deberán cumplirse en el proyecto, construcción y operación de las obras hidráulicas identificadas en el artículo 294 del referido texto legal.”
  - Ministerio de Obras Públicas (MOP), Dirección de Obras Hidráulicas “Mejoramiento Sistema de riego embalse Cogotí, Informe Final”.
  - Ministerio de Obras Públicas, Dirección de Obras Hidráulicas “Diseño de embalse Chacrillas”. Informe final.
  - Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de aguas (DGA). “Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad Cuenca del río Aconcagua”, Diciembre 2004.
  - Ministerio de Obras Públicas (MOP) - Dirección de Obras Hidráulicas (2015) “Estudio Topo-Batimétrico y prolongación de la vida útil operacional del Embalse La Paloma”, Región de Coquimbo. Arrau Ingeniería E.I.R.L.



- MN Ingenieros “Diseño sistema de purga Embalse Chironta” Diciembre, 2014.
- Morris, Dr. Gregory y Portalatín, Juan (2015) “Manejo de la Sedimentación en Embalses Hidroeléctricas” 1r Taller Sobre Gestión de Sedimentos en Embalses en Colombia, Consejo Nacional de Operación, Bogotá. Niño, Yarko. (2010) “Mecánica del transporte de sedimentos”. Apuntes del curso CI6105: “Transporte hidráulico de sólidos”. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Universidad de Chile.
- Núñez E., Omar. (1992), “Sedimentación en el embalse Cogotí”, Memoria de Título de Ingeniería Civil, Universidad. de Chile.
- Patiño, J. F., León, J. D., León M. y Hernández, L. (2007). “Propuesta metodológica para comparar el efluente de diferentes coberturas vegetales en la regulación de caudales en cuencas hidrográficas. Aplicación en la microcuenca de la quebrada La Murciélago, Antioquia” Universidad Nacional de Colombia, Medellín.
- Meyer-Peter. E., & Müller, R. 1948. Formulas for Bedload Transport. Proceedings, 2nd Congress I.A.H.R., Stockholm.
- Sandoval Jeria, Julio (2003). “Historia del riego en Chile”, Santiago de Chile. Gobierno de Chile Ministerio de Obras Públicas, Dirección de Obras Hidráulicas.
- Servicio de evaluación ambiental, Gobierno de Chile “Reglamento del SEIA, artículo 3 a) y Código de Aguas, artículo 294°”.
- Valenzuela, B., Morales, L.S. (2004). “Estimación del factor de erosividad de las precipitaciones en la Región de Coquimbo”. XIV Simposio Chileno de Física, Antofagasta, Chile.
- Ma, X, Lu, X. van Noordwijk, L (2014). “Attribution of climate change, vegetation restoration, and engineering measures to the reduction of suspended sediment in the Kejie catchment, southwest China”. Recuperado de: <https://www.hydrol-earth-syst-sci.net/18/1979/2014/hess-18-1979-2014.pdf>
- Wischmeier, W. y Smith, D. (1958). Rainfall energy and its relationship to soil loss. Transactions of the American geophysical Union.

## Capítulo 7. Anexos

Anexo I: Curva de embalse Embalse Chacrillas.

| Cota     | Área           | Volumen        |
|----------|----------------|----------------|
| m s.n.m. | m <sup>2</sup> | m <sup>3</sup> |
| 1240     | 2131           | 1.776          |
| 1242,5   | 9.857          | 16.762         |
| 1245     | 14.766         | 48.716         |
| 1247,5   | 20.154         | 91.923         |
| 1250     | 29.133         | 151.530        |
| 1252,5   | 40.513         | 239.162        |
| 1255     | 50.023         | 353.596        |
| 1257,5   | 59.075         | 488.861        |
| 1260     | 75.144         | 654.433        |
| 1262,5   | 90.267         | 862.613        |
| 1265     | 103.248        | 1.106.261      |
| 1267,5   | 119.533        | 1.381.206      |
| 1270     | 139.731        | 1.704.809      |
| 1272,5   | 157.657        | 2.080.042      |
| 1275     | 176.756        | 2.495.384      |
| 1277,5   | 193.208        | 2.957.481      |
| 1280     | 211.892        | 3.467.022      |
| 1282,5   | 232.078        | 4.018.012      |
| 1285     | 255.030        | 4.626.372      |
| 1287,5   | 285.005        | 5.302.858      |
| 1290     | 310.177        | 6.045.230      |
| 1292,5   | 338.406        | 6.856.672      |
| 1295     | 367.238        | 7.738.479      |
| 1297,5   | 398.954        | 8.694.667      |
| 1300     | 430.620        | 9.732.554      |
| 1302,5   | 462.364        | 10.849.413     |
| 1305     | 496.210        | 12.045.406     |
| 1307,5   | 530.285        | 13.329.397     |
| 1310     | 567.174        | 14.701.627     |
| 1312,5   | 605.625        | 16.164.983     |
| 1315     | 641.858        | 17.726.780     |
| 1317,5   | 680.612        | 19.379.975     |
| 1320     | 719.604        | 21.126.835     |
| 1322,5   | 759.198        | 22.978.380     |
| 1325     | 802.238        | 24.929.280     |
| 1327,5   | 842.624        | 26.982.965     |
| 1330     | 887.517        | 29.148.352     |

| Cota   | Área      | Volumen    |
|--------|-----------|------------|
| 1332,5 | 933.589   | 31.422.642 |
| 1335   | 982.183   | 33.815.586 |
| 1337,5 | 1.028.034 | 36.332.293 |
| 1338   | 1.073.022 | 36.896.870 |
| 1339   | 1.163.000 | 38.026.026 |

Anexo II: Flujo de caja Alternativa control con vegetación especie nativa 40% (dólar observado \$691 el 29 octubre 2018).

| AÑO/\$ | Exprop. cuenca | Árbol nativo | Mantención | Expropiación  | Suma        | Flujo año i |
|--------|----------------|--------------|------------|---------------|-------------|-------------|
| Año 0  | -725.920.832   | -89.320.000  |            | 1.057.309.041 | 242.068.209 | 242.068.209 |
| Año1   |                |              | -178.640   |               | -178.640    | -162.400    |
| Año2   |                |              | -178.640   |               | -178.640    | -147.636    |
| Año3   |                |              | -178.640   |               | -178.640    | -134.214    |
| Año4   |                |              | -178.640   |               | -178.640    | -122.013    |
| Año5   |                |              | -178.640   |               | -178.640    | -110.921    |
| Año6   |                |              | -178.640   |               | -178.640    | -100.837    |
| Año7   |                |              | -178.640   |               | -178.640    | -91.670     |
| Año8   |                |              | -178.640   |               | -178.640    | -83.336     |
| Año9   |                |              | -178.640   |               | -178.640    | -75.760     |
| Año10  |                |              | -178.640   |               | -178.640    | -68.873     |
| Año11  |                |              | -178.640   |               | -178.640    | -62.612     |
| Año12  |                |              | -178.640   |               | -178.640    | -56.920     |
| Año13  |                |              | -178.640   |               | -178.640    | -51.745     |
| Año14  |                |              | -178.640   |               | -178.640    | -47.041     |
| Año15  |                |              | -178.640   |               | -178.640    | -42.764     |
| Año16  |                |              | -178.640   |               | -178.640    | -38.877     |
| Año17  |                |              | -178.640   |               | -178.640    | -35.342     |
| Año18  |                |              | -178.640   |               | -178.640    | -32.129     |
| Año19  |                |              | -178.640   |               | -178.640    | -29.209     |
| Año20  |                |              | -178.640   |               | -178.640    | -26.553     |
| Año21  |                |              | -178.640   |               | -178.640    | -24.139     |
| Año22  |                |              | -178.640   |               | -178.640    | -21.945     |
| Año23  |                |              | -178.640   |               | -178.640    | -19.950     |
| Año24  |                |              | -178.640   |               | -178.640    | -18.136     |
| Año25  |                |              | -178.640   |               | -178.640    | -16.487     |
| Año26  |                |              | -178.640   |               | -178.640    | -14.988     |
| Año27  |                |              | -178.640   |               | -178.640    | -13.626     |
| Año28  |                |              | -178.640   |               | -178.640    | -12.387     |
| Año29  |                |              | -178.640   |               | -178.640    | -11.261     |
| Año30  |                |              | -178.640   |               | -178.640    | -10.237     |
| Año31  |                |              | -178.640   |               | -178.640    | -9.306      |
| Año32  |                |              | -178.640   |               | -178.640    | -8.460      |

| AÑO/\$ | Exprop. cuenca | Árbol nativo | Mantención | Expropiación | Suma       | Flujo año i          |
|--------|----------------|--------------|------------|--------------|------------|----------------------|
| Año33  |                |              | -178.640   |              | -178.640   | -7691                |
| Año34  |                |              | -178.640   |              | -178.640   | -6992                |
| Año35  |                |              | -178.640   |              | -178.640   | -6356                |
| Año36  |                |              | -178.640   |              | -178.640   | -5778                |
| Año37  |                |              | -178.640   |              | -178.640   | -5255                |
| Año38  |                |              | -178.640   |              | -178.640   | -4775                |
| Año39  |                |              | -178.640   |              | -178.640   | -4341                |
| Año40  |                |              | -178.640   |              | -178.640   | -3947                |
| Año41  |                |              | -178.640   |              | -178.640   | -3588                |
| Año42  |                |              | -178640    |              | -178.640   | -3262                |
| Año43  |                |              | -178.640   |              | -178.640   | -2965                |
| Año44  |                |              | -178.640   |              | -178.640   | -2695                |
| Año45  |                |              | -178.640   |              | -178.640   | -2450                |
| Año46  |                |              | -178.640   |              | -178.640   | -2228                |
| Año47  |                |              | -178.640   |              | -178.640   | -2025                |
| Año48  |                |              | -178.640   |              | -178.640   | -1841                |
| Año49  |                |              | -178.640   |              | -178.640   | -1673                |
| Año50  |                |              | -178.640   |              | -178.640   | -1521                |
|        |                |              |            |              | <b>VAN</b> | <b>\$240.297.027</b> |

Anexo III: Flujo de caja Alternativa control con vegetación especie nativa 30% (dólar observado \$691 el 29 octubre 2018).

| AÑO/\$ | Exprop. cuenca | Árbol nativo | Mantención | Expropiación  | Suma        | Flujo año i |
|--------|----------------|--------------|------------|---------------|-------------|-------------|
| Año 0  | -544.440.624   | -66.990.000  |            | 1.008.602.233 | 397.171.609 | 39.717.1609 |
| Año1   |                |              | -133.980   |               | -133.980    | -121.800    |
| Año2   |                |              | -133.980   |               | -133.980    | -110.727    |
| Año3   |                |              | -133.980   |               | -133.980    | -100.661    |
| Año4   |                |              | -133.980   |               | -133.980    | -91.510     |
| Año5   |                |              | -133.980   |               | -133.980    | -83.191     |
| Año6   |                |              | -133.980   |               | -133.980    | -75.628     |
| Año7   |                |              | -133.980   |               | -133.980    | -68.752     |
| Año8   |                |              | -133.980   |               | -133.980    | -62.502     |
| Año9   |                |              | -133.980   |               | -133.980    | -56.820     |
| Año10  |                |              | -133.980   |               | -133.980    | -51.655     |
| Año11  |                |              | -133.980   |               | -133.980    | -46.959     |
| Año12  |                |              | -133.980   |               | -133.980    | -42.690     |
| Año13  |                |              | -133.980   |               | -133.980    | -38.809     |
| Año14  |                |              | -133.980   |               | -133.980    | -35.281     |
| Año15  |                |              | -133.980   |               | -133.980    | -32.073     |
| Año16  |                |              | -133.980   |               | -133.980    | -29.157     |
| Año17  |                |              | -133.980   |               | -133.980    | -26.507     |
| Año18  |                |              | -133.980   |               | -133.980    | -24.097     |
| Año19  |                |              | -133.980   |               | -133.980    | -21.906     |

| AÑO/\$ | Exprop. cuenca | Árbol nativo | Mantención | Expropiación | Suma       | Flujo año i          |
|--------|----------------|--------------|------------|--------------|------------|----------------------|
| Año20  |                |              | -133.980   |              | -133.980   | -19.915              |
| Año21  |                |              | -133.980   |              | -133.980   | -18.104              |
| Año22  |                |              | -133.980   |              | -133.980   | -16.458              |
| Año23  |                |              | -133.980   |              | -133.980   | -14.962              |
| Año24  |                |              | -133.980   |              | -133.980   | -13.602              |
| Año25  |                |              | -133.980   |              | -133.980   | -12.365              |
| Año26  |                |              | -133.980   |              | -133.980   | -11.241              |
| Año27  |                |              | -133.980   |              | -133.980   | -10.219              |
| Año28  |                |              | -133.980   |              | -133.980   | -9.290               |
| Año29  |                |              | -133.980   |              | -133.980   | -8.446               |
| Año30  |                |              | -133.980   |              | -133.980   | -7.678               |
| Año31  |                |              | -133.980   |              | -133.980   | -6.980               |
| Año32  |                |              | -133.980   |              | -133.980   | -6.345               |
| Año33  |                |              | -133.980   |              | -133.980   | -5.768               |
| Año34  |                |              | -133.980   |              | -133.980   | -5.244               |
| Año35  |                |              | -133.980   |              | -133.980   | -4.767               |
| Año36  |                |              | -133.980   |              | -133.980   | -4.334               |
| Año37  |                |              | -133.980   |              | -133.980   | -3.940               |
| Año38  |                |              | -133.980   |              | -133.980   | -3.581               |
| Año39  |                |              | -133.980   |              | -133.980   | -3.256               |
| Año40  |                |              | -133.980   |              | -133.980   | -2.960               |
| Año41  |                |              | -133.980   |              | -133.980   | -2.691               |
| Año42  |                |              | -133.980   |              | -133.980   | -2.446               |
| Año43  |                |              | -133.980   |              | -133.980   | -2.224               |
| Año44  |                |              | -133.980   |              | -133.980   | -2.021               |
| Año45  |                |              | -133.980   |              | -133.980   | -1.838               |
| Año46  |                |              | -133.980   |              | -133.980   | -1.671               |
| Año47  |                |              | -133.980   |              | -133.980   | -1.519               |
| Año48  |                |              | -133.980   |              | -133.980   | -1.380               |
| Año49  |                |              | -133.980   |              | -133.980   | -1.255               |
| Año50  |                |              | -133.980   |              | -133.980   | -1.141               |
|        |                |              |            |              | <b>VAN</b> | <b>\$395.843.222</b> |

Anexo IV: Flujo de caja Alternativa control con vegetación especie nativa 20% (dólar obs. \$691 el 29 octubre 2018).

| AÑO/\$ | Exprop. cuenca | Árbol nativo | Mantención | Expropiación | Suma        | Flujo año i |
|--------|----------------|--------------|------------|--------------|-------------|-------------|
| Año 0  | -362.960.416   | -44.660.000  |            | 957.494.028  | 549.873.612 | 549.873.612 |
| Año1   |                |              | -89.320    |              | -89.320     | -81200      |
| Año2   |                |              | -89.320    |              | -89.320     | -73818,1818 |
| Año3   |                |              | -89.320    |              | -89.320     | -67107,438  |
| Año4   |                |              | -89.320    |              | -89.320     | -61006,7618 |
| Año5   |                |              | -89.320    |              | -89.320     | -55460,6926 |
| Año6   |                |              | -89.320    |              | -89.320     | -50418,8114 |
| Año7   |                |              | -89.320    |              | -89.320     | -45835,2831 |
| Año8   |                |              | -89.320    |              | -89.320     | -41668,4392 |

| AÑO/\$ | Exprop. cuenca | Árbol nativo | Mantención | Expropiación | Suma       | Flujo año i          |
|--------|----------------|--------------|------------|--------------|------------|----------------------|
| Año9   |                |              | -89.320    |              | -89.320    | -37880               |
| Año10  |                |              | -89.320    |              | -89.320    | -34436               |
| Año11  |                |              | -89.320    |              | -89.320    | -31306               |
| Año12  |                |              | -89.320    |              | -89.320    | -28460               |
| Año13  |                |              | -89.320    |              | -89.320    | -25872               |
| Año14  |                |              | -89.320    |              | -89.320    | -23520               |
| Año15  |                |              | -89.320    |              | -89.320    | -21382               |
| Año16  |                |              | -89.320    |              | -89.320    | -19438               |
| Año17  |                |              | -89.320    |              | -89.320    | -17671               |
| Año18  |                |              | -89.320    |              | -89.320    | -16064               |
| Año19  |                |              | -89320     |              | -89.320    | -14604               |
| Año20  |                |              | -89.320    |              | -89.320    | -13276               |
| Año21  |                |              | -89.320    |              | -89.320    | -12069               |
| Año22  |                |              | -89.320    |              | -89.320    | -10972               |
| Año23  |                |              | -89.320    |              | -89.320    | -9975                |
| Año24  |                |              | -89.320    |              | -89.320    | -9068                |
| Año25  |                |              | -89.320    |              | -89.320    | -8243                |
| Año26  |                |              | -89.320    |              | -89.320    | -7494                |
| Año27  |                |              | -89.320    |              | -89.320    | -6813                |
| Año28  |                |              | -89.320    |              | -89.320    | -6193                |
| Año29  |                |              | -89.320    |              | -89.320    | -5630                |
| Año30  |                |              | -89.320    |              | -89.320    | -5118                |
| Año31  |                |              | -89.320    |              | -89.320    | -4653                |
| Año32  |                |              | -89.320    |              | -89.320    | -4230                |
| Año33  |                |              | -89.320    |              | -89.320    | -3845                |
| Año34  |                |              | -89.320    |              | -89.320    | -3496                |
| Año35  |                |              | -89.320    |              | -89.320    | -3178                |
| Año36  |                |              | -89.320    |              | -89.320    | -2889                |
| Año37  |                |              | -89.320    |              | -89.320    | -2626                |
| Año38  |                |              | -89.320    |              | -89.320    | -2387                |
| Año39  |                |              | -89.320    |              | -89.320    | -2170                |
| Año40  |                |              | -89.320    |              | -89.320    | -1973                |
| Año41  |                |              | -89.320    |              | -89.320    | -1794                |
| Año42  |                |              | -89.320    |              | -89.320    | -1631                |
| Año43  |                |              | -89.320    |              | -89.320    | -1482                |
| Año44  |                |              | -89.320    |              | -89.320    | -1347                |
| Año45  |                |              | -89.320    |              | -89.320    | -1225                |
| Año46  |                |              | -89.320    |              | -89.320    | -1114                |
| Año47  |                |              | -89.320    |              | -89.320    | -1012                |
| Año48  |                |              | -89.320    |              | -89.320    | -920                 |
| Año49  |                |              | -89.320    |              | -89.320    | -836                 |
| Año50  |                |              | -89.320    |              | -89.320    | -760                 |
|        |                |              |            |              | <b>VAN</b> | <b>\$548.988.021</b> |

Anexo V: Flujo de caja Alternativa control con vegetación especie nativa 40% (dólar observado \$691 el 29 octubre 2018).

| AÑO/\$ | Exprop cuenca | Árbol exótico | Mantenición | Expropiación y embalse | Suma        | Flujo año i |
|--------|---------------|---------------|-------------|------------------------|-------------|-------------|
| Año 0  | -544.440.624  | -66.990.000   |             | 1.008.602.233          | 39.717.1609 | 397.171.609 |
| Año1   |               |               | -133.980    |                        | -133.980    | -121.800    |
| Año2   |               |               | -133.980    |                        | -133.980    | -110.727    |
| Año3   |               |               | -133.980    |                        | -133.980    | -100.661    |
| Año4   |               |               | -133.980    |                        | -133.980    | -91.510     |
| Año5   |               |               | -133.980    |                        | -133.980    | -83.191     |
| Año6   |               |               | -133.980    |                        | -133.980    | -75.628     |
| Año7   |               |               | -133.980    |                        | -133.980    | -68.752     |
| Año8   |               |               | -133.980    |                        | -133.980    | -62.502     |
| Año9   |               |               | -133.980    |                        | -133.980    | -56.820     |
| Año10  |               |               | -133.980    |                        | -133.980    | -51.655     |
| Año11  |               |               | -133.980    |                        | -133.980    | -46.959     |
| Año12  |               |               | -133.980    |                        | -133.980    | -42.690     |
| Año13  |               |               | -133.980    |                        | -133.980    | -38.809     |
| Año14  |               |               | -133.980    |                        | -133.980    | -35.281     |
| Año15  |               |               | -133.980    |                        | -133.980    | -32.073     |
| Año16  |               |               | -133.980    |                        | -133.980    | -29.157     |
| Año17  |               |               | -133.980    |                        | -133.980    | -26.507     |
| Año18  |               |               | -133.980    |                        | -133.980    | -24.097     |
| Año19  |               |               | -133.980    |                        | -133.980    | -21.906     |
| Año20  |               |               | -133.980    |                        | -133.980    | -19.915     |
| Año21  |               |               | -133.980    |                        | -133.980    | -18.104     |
| Año22  |               |               | -133.980    |                        | -133.980    | -16.458     |
| Año23  |               |               | -133.980    |                        | -133.980    | -14.962     |
| Año24  |               |               | -133.980    |                        | -133.980    | -13.602     |
| Año25  |               |               | -133.980    |                        | -133.980    | -12.365     |
| Año26  |               |               | -133.980    |                        | -133.980    | -11.241     |
| Año27  |               |               | -133.980    |                        | -133.980    | -10.219     |
| Año28  |               |               | -133.980    |                        | -133.980    | -9.290      |
| Año29  |               |               | -133.980    |                        | -133.980    | -8.446      |
| Año30  |               |               | -133.980    |                        | -133.980    | -7.678      |
| Año31  |               |               | -133.980    |                        | -133.980    | -6.980      |
| Año32  |               |               | -133.980    |                        | -133.980    | -6.345      |
| Año33  |               |               | -133.980    |                        | -133.980    | -5.768      |
| Año34  |               |               | -133.980    |                        | -133.980    | -5.244      |
| Año35  |               |               | -133.980    |                        | -133.980    | -4.767      |
| Año36  |               |               | -133.980    |                        | -133.980    | -4.334      |
| Año37  |               |               | -133.980    |                        | -133.980    | -3.940      |

| AÑO/\$ | Exprop. cuenca | Árbol nativo | Mantenición | Expropiación | Suma       | Flujo año i          |
|--------|----------------|--------------|-------------|--------------|------------|----------------------|
| Año38  |                |              | -133.980    |              | -133.980   | -3.581               |
| Año39  |                |              | -133.980    |              | -133.980   | -3.256               |
| Año40  |                |              | -133.980    |              | -133.980   | -2.960               |
| Año41  |                |              | -133.980    |              | -133.980   | -2.691               |
| Año42  |                |              | -133.980    |              | -133.980   | -2.446               |
| Año43  |                |              | -133.980    |              | -133.980   | -2.224               |
| Año44  |                |              | -133.980    |              | -133.980   | -2.021               |
| Año45  |                |              | -133.980    |              | -133.980   | -1.838               |
| Año46  |                |              | -133.980    |              | -133.980   | -1.671               |
| Año47  |                |              | -133.980    |              | -133.980   | -1.519               |
| Año48  |                |              | -133.980    |              | -133.980   | -1.380               |
| Año49  |                |              | -133.980    |              | -133.980   | -1.255               |
| Año50  |                |              | -133.980    |              | -133.980   | -1.141               |
|        |                |              |             |              | <b>VAN</b> | <b>\$395.843.222</b> |

Anexo VI: Flujo de caja Alternativa control con vegetación especie nativa 30% (dólar observado \$691 el 29 octubre 2018).

| AÑO/\$ | Exprop. cuenca | Árbol nativo | Mantenición | Expropiación  | Suma        | Flujo año i |
|--------|----------------|--------------|-------------|---------------|-------------|-------------|
| Año 0  | -544.440.624   | -74.837.400  |             | 1.008.602.233 | 389.324.209 | 389.324.209 |
| Año1   |                |              | -149.674    |               | -149.674    | -136.068    |
| Año2   |                |              | -149.674    |               | -149.674    | -123.698    |
| Año3   |                |              | -149.674    |               | -149.674    | -112.452    |
| Año4   |                |              | -149.674    |               | -149.674    | -102.229    |
| Año5   |                |              | -149.674    |               | -149.674    | -92.936     |
| Año6   |                |              | -149.674    |               | -149.674    | -84.487     |
| Año7   |                |              | -149.674    |               | -149.674    | -76.806     |
| Año8   |                |              | -149.674    |               | -149.674    | -69.824     |
| Año9   |                |              | -149.674    |               | -149.674    | -63.476     |
| Año10  |                |              | -149.674    |               | -149.674    | -57.706     |
| Año11  |                |              | -149.674    |               | -149.674    | -52.460     |
| Año12  |                |              | -149.674    |               | -149.674    | -47.691     |
| Año13  |                |              | -149.674    |               | -149.674    | -43.355     |
| Año14  |                |              | -149.674    |               | -149.674    | -39.414     |
| Año15  |                |              | -149.674    |               | -149.674    | -35.830     |
| Año16  |                |              | -149.674    |               | -149.674    | -32.573     |
| Año17  |                |              | -149.674    |               | -149.674    | -29.612     |
| Año18  |                |              | -149.674    |               | -149.674    | -26.920     |
| Año19  |                |              | -149.674    |               | -149.674    | -24.473     |
| Año20  |                |              | -149.674    |               | -149.674    | -22.248     |
| Año21  |                |              | -149.674    |               | -149.674    | -20.225     |
| Año22  |                |              | -149.674    |               | -149.674    | -18.386     |
| Año23  |                |              | -149.674    |               | -149.674    | -16.715     |
| Año24  |                |              | -149.674    |               | -149.674    | -15.195     |



| AÑO/\$ | Exprop. cuenca | Árbol nativo | Mantenición | Expropiación | Suma       | Flujo año i          |
|--------|----------------|--------------|-------------|--------------|------------|----------------------|
| Año25  |                |              | -149.674    |              | -149.674   | -13.814              |
| Año26  |                |              | -149.674    |              | -149.674   | -12.558              |
| Año27  |                |              | -149.674    |              | -149.674   | -11.416              |
| Año28  |                |              | -149.674    |              | -149.674   | -10.378              |
| Año29  |                |              | -149.674    |              | -149.674   | -9.435               |
| Año30  |                |              | -149.674    |              | -149.674   | -8.577               |
| Año31  |                |              | -149.674    |              | -149.674   | -7.797               |
| Año32  |                |              | -149.674    |              | -149.674   | -7.088               |
| Año33  |                |              | -149.674    |              | -149.674   | -6.444               |
| Año34  |                |              | -149.674    |              | -149.674   | -5.858               |
| Año35  |                |              | -149.674    |              | -149.674   | -5.326               |
| Año36  |                |              | -149.674    |              | -149.674   | -4.841               |
| Año37  |                |              | -149.674    |              | -149.674   | -4.401               |
| Año38  |                |              | -149.674    |              | -149.674   | -4.001               |
| Año39  |                |              | -149.674    |              | -149.674   | -3.637               |
| Año40  |                |              | -149.674    |              | -149.674   | -3.307               |
| Año41  |                |              | -149.674    |              | -149.674   | -3.006               |
| Año42  |                |              | -149.674    |              | -149.674   | -2.733               |
| Año43  |                |              | -149.674    |              | -149.674   | -2.484               |
| Año44  |                |              | -149.674    |              | -149.674   | -2.258               |
| Año45  |                |              | -149.674    |              | -149.674   | -2.053               |
| Año46  |                |              | -149.674    |              | -149.674   | -1.866               |
| Año47  |                |              | -149.674    |              | -149.674   | -1.697               |
| Año48  |                |              | -149.674    |              | -149.674   | -1.542               |
| Año49  |                |              | -149.674    |              | -149.674   | -1.402               |
| Año50  |                |              | -149.674    |              | -149.674   | -1.275               |
|        |                |              |             |              | <b>VAN</b> | <b>\$387.840.211</b> |

Anexo VII: Flujo de caja Alternativa control con vegetación especie nativa 20% (dólar observado \$691 el 29 octubre 2018).

| AÑO/\$ | Exprop. cuenca | Árbol nativo | Mantenición | Expropiación | Suma        | Flujo año i |
|--------|----------------|--------------|-------------|--------------|-------------|-------------|
| Año 0  | -362.960.416   | -49.891.600  |             | 957.494.028  | 544.642.012 | 544.642.012 |
| Año1   |                |              | -99.783     |              | -99.783     | -90.712     |
| Año2   |                |              | -99.783     |              | -99.783     | -82465      |
| Año3   |                |              | -99.783     |              | -99.783     | -74968      |
| Año4   |                |              | -99.783     |              | -99.783     | -68153      |
| Año5   |                |              | -99.783     |              | -99.783     | -61957      |
| Año6   |                |              | -99.783     |              | -99.783     | -56325      |
| Año7   |                |              | -99.783     |              | -99.783     | -51204      |
| Año8   |                |              | -99.783     |              | -99.783     | -46549      |
| Año9   |                |              | -99.783     |              | -99.783     | -42317      |
| Año10  |                |              | -99.783     |              | -99.783     | -38470      |
| Año11  |                |              | -99.783     |              | -99.783     | -34973      |

| AÑO/\$ | Exprop. cuenca | Árbol nativo | Mantenición | Expropiación | Suma       | Flujo año i          |
|--------|----------------|--------------|-------------|--------------|------------|----------------------|
| Año12  |                |              | -99.783     |              | -99.783    | -31.794              |
| Año13  |                |              | -99.783     |              | -99.783    | -28.903              |
| Año14  |                |              | -99.783     |              | -99.783    | -26.276              |
| Año15  |                |              | -99.783     |              | -99.783    | -23.887              |
| Año16  |                |              | -99.783     |              | -99.783    | -21.715              |
| Año17  |                |              | -99.783     |              | -99.783    | -19.741              |
| Año18  |                |              | -99.783     |              | -99.783    | -17.946              |
| Año19  |                |              | -99.783     |              | -99.783    | -16.315              |
| Año20  |                |              | -99.783     |              | -99.783    | -14.832              |
| Año21  |                |              | -99.783     |              | -99.783    | -13.483              |
| Año22  |                |              | -99.783     |              | -99.783    | -12.257              |
| Año23  |                |              | -99.783     |              | -99.783    | -11.143              |
| Año24  |                |              | -99.783     |              | -99.783    | -10.130              |
| Año25  |                |              | -99.783     |              | -99.783    | -9.209               |
| Año26  |                |              | -99.783     |              | -99.783    | -8.372               |
| Año27  |                |              | -99.783     |              | -99.783    | -7.611               |
| Año28  |                |              | -99.783     |              | -99.783    | -6.919               |
| Año29  |                |              | -99.783     |              | -99.783    | -6.290               |
| Año30  |                |              | -99.783     |              | -99.783    | -5.718               |
| Año31  |                |              | -99.783     |              | -99.783    | -5.198               |
| Año32  |                |              | -99.783     |              | -99.783    | -4.725               |
| Año33  |                |              | -99.783     |              | -99.783    | -4.296               |
| Año34  |                |              | -99.783     |              | -99.783    | -3.905               |
| Año35  |                |              | -99.783     |              | -99.783    | -3.550               |
| Año36  |                |              | -99.783     |              | -99.783    | -3.227               |
| Año37  |                |              | -99.783     |              | -99.783    | -2.934               |
| Año38  |                |              | -99.783     |              | -99.783    | -2.667               |
| Año39  |                |              | -99.783     |              | -99.783    | -2.425               |
| Año40  |                |              | -99.783     |              | -99.783    | -2.204               |
| Año41  |                |              | -99.783     |              | -99.783    | -2.004               |
| Año42  |                |              | -99.783     |              | -99.783    | -1.822               |
| Año43  |                |              | -99.783     |              | -99.783    | -1.656               |
| Año44  |                |              | -99.783     |              | -99.783    | -1.505               |
| Año45  |                |              | -99.783     |              | -99.783    | -1.368               |
| Año46  |                |              | -99.783     |              | -99.783    | -1.244               |
| Año47  |                |              | -99.783     |              | -99.783    | -1.131               |
| Año48  |                |              | -99.783     |              | -99.783    | -1.028               |
| Año49  |                |              | -99.783     |              | -99.783    | -935                 |
| Año50  |                |              | -99.783     |              | -99.783    | -850                 |
|        |                |              |             |              | <b>VAN</b> | <b>\$543.652.680</b> |

Anexo VIII: Flujo de caja Sabo Dam muro de hormigón 1 muro (dólar observado \$691 el 29 octubre 2018).

| AÑO/\$ | Muro        | Mantención | Ahorro     | Limpieza | Suma       | Flujo año i |
|--------|-------------|------------|------------|----------|------------|-------------|
| Año0   | -76.451.080 |            | 96.777.764 |          | 20.326.684 | 20.326.684  |
| Año1   |             | -1.376.119 |            |          | -1.376.119 | -1.251.017  |
| Año2   |             | -1.376.119 |            |          | -1.376.119 | -1.137.288  |
| Año3   |             | -1.376.119 |            |          | -1.376.119 | -1.033.898  |
| Año4   |             | -1.376.119 |            |          | -1.376.119 | -939.908    |
| Año5   |             | -1.376.119 |            |          | -1.376.119 | -854.461    |
| Año6   |             | -1.376.119 |            |          | -1.376.119 | -776.783    |
| Año7   |             | -1.376.119 |            |          | -1.376.119 | -706.166    |
| Año8   |             | -1.376.119 |            |          | -1.376.119 | -641.969    |
| Año9   |             | -1.376.119 |            |          | -1.376.119 | -583.608    |
| Año10  |             | -1.376.119 |            |          | -1.376.119 | -530.553    |
| Año11  |             | -1.376.119 |            |          | -1.376.119 | -482.321    |
| Año12  |             | -1.376.119 |            |          | -1.376.119 | -438.474    |
| Año13  |             | -1.376.119 |            |          | -1.376.119 | -398.612    |
| Año14  |             | -1.376.119 |            |          | -1.376.119 | -362.375    |
| Año15  |             | -1.376.119 |            |          | -1.376.119 | -329.432    |
| Año16  |             | -1.376.119 |            |          | -1.376.119 | -299.483    |
| Año17  |             | -1.376.119 |            |          | -1.376.119 | -272.257    |
| Año18  |             | -1.376.119 |            |          | -1.376.119 | -247.507    |
| Año19  |             | -1.376.119 |            |          | -1.376.119 | -225.006    |
| Año20  |             | -1.376.119 |            |          | -1.376.119 | -204.551    |
| Año21  |             | -1.376.119 |            |          | -1.376.119 | -185.955    |
| Año22  |             | -1.376.119 |            |          | -1.376.119 | -169.050    |
| Año23  |             | -1.376.119 |            |          | -1.376.119 | -153.682    |
| Año24  |             | -1.376.119 |            |          | -1.376.119 | -139.711    |
| Año25  |             | -1.376.119 |            |          | -1.376.119 | -127.010    |
| Año26  |             | -1.376.119 |            |          | -1.376.119 | -115.463    |
| Año27  |             | -1.376.119 |            |          | -1.376.119 | -104.967    |
| Año28  |             | -1.376.119 |            |          | -1.376.119 | -95.424     |
| Año29  |             | -1.376.119 |            |          | -1.376.119 | -86.749     |
| Año30  |             | -1.376.119 |            |          | -1.376.119 | -78.863     |
| Año31  |             | -1.376.119 |            |          | -1.376.119 | -71.694     |
| Año32  |             | -1.376.119 |            |          | -1.376.119 | -65.176     |
| Año33  |             | -1.376.119 |            |          | -1.376.119 | -59.251     |
| Año34  |             | -1.376.119 |            |          | -1.376.119 | -53.864     |
| Año35  |             | -1.376.119 |            |          | -1.376.119 | -48.967     |
| Año36  |             | -1.376.119 |            |          | -1.376.119 | -44.516     |
| Año37  |             | -1.376.119 |            |          | -1.376.119 | -40.469     |
| Año38  |             | -1.376.119 |            |          | -1.376.119 | -36.790     |
| Año39  |             | -1.376.119 |            |          | -1.376.119 | -33.445     |
| Año40  |             | -1.376.119 |            |          | -1.376.119 | -30.405     |
| Año41  |             | -1.376.119 |            |          | -1.376.119 | -27.641     |

| AÑO/\$ | Muro | Mantenición | Ahorro | Limpieza | Suma       | Flujo año i        |
|--------|------|-------------|--------|----------|------------|--------------------|
| Año42  |      | -1.376.119  |        |          | -1.376.119 | -25.128            |
| Año43  |      | -1.376.119  |        |          | -1.376.119 | -22.843            |
| Año44  |      | -1.376.119  |        |          | -1.376.119 | -20.767            |
| Año45  |      | -1.376.119  |        |          | -1.376.119 | -18.879            |
| Año46  |      | -1.376.119  |        |          | -1.376.119 | -17.162            |
| Año47  |      | -1.376.119  |        |          | -1.376.119 | -15.602            |
| Año48  |      | -1.376.119  |        |          | -1.376.119 | -14.184            |
| Año49  |      | -1.376.119  |        |          | -1.376.119 | -12.894            |
| Año50  |      | -1.376.119  |        |          | -1.376.119 | -11.722            |
|        |      |             |        |          | <b>VAN</b> | <b>\$6.682.715</b> |

Anexo IX: Flujo de caja Sabo Dam muro de hormigón 2 muro (dólar observado \$691 el 29 octubre 2018).

| AÑO/\$ | Muro         | Mantenición | Ahorro     | Suma        | Flujo año i |
|--------|--------------|-------------|------------|-------------|-------------|
| Año 0  | -152.902.160 |             | 96.777.764 | -56.124.396 | -56.124.396 |
| Año1   |              | -305.804    |            | -305.804    | -278.003    |
| Año2   |              | -305.804    |            | -305.804    | -252.730    |
| Año3   |              | -305.804    |            | -305.804    | -229.755    |
| Año4   |              | -305.804    |            | -305.804    | -208.868    |
| Año5   |              | -305.804    |            | -305.804    | -189.880    |
| Año6   |              | -305.804    |            | -305.804    | -172.618    |
| Año7   |              | -305.804    |            | -305.804    | -156.925    |
| Año8   |              | -305.804    |            | -305.804    | -142.659    |
| Año9   |              | -305.804    |            | -305.804    | -129.690    |
| Año10  |              | -305.804    |            | -305.804    | -117.900    |
| Año11  |              | -305.804    |            | -305.804    | -107.182    |
| Año12  |              | -305.804    |            | -305.804    | -97.438     |
| Año13  |              | -305.804    |            | -305.804    | -88.580     |
| Año14  |              | -305.804    |            | -305.804    | -80.527     |
| Año15  |              | -305.804    |            | -305.804    | -73.207     |
| Año16  |              | -305.804    |            | -305.804    | -66.551     |
| Año17  |              | -305.804    |            | -305.804    | -60.501     |
| Año18  |              | -305.804    |            | -305.804    | -55.001     |
| Año19  |              | -305.804    |            | -305.804    | -50.001     |
| Año20  |              | -305.804    |            | -305.804    | -45.455     |
| Año21  |              | -305.804    |            | -305.804    | -41.323     |
| Año22  |              | -305.804    |            | -305.804    | -37.566     |
| Año23  |              | -305.804    |            | -305.804    | -34.151     |
| Año24  |              | -305.804    |            | -305.804    | -31.046     |
| Año25  |              | -305.804    |            | -305.804    | -28.224     |
| Año26  |              | -305.804    |            | -305.804    | -25.658     |
| Año27  |              | -305.804    |            | -305.804    | -23.326     |
| Año28  |              | -305.804    |            | -305.804    | -21.205     |
| Año29  |              | -305.804    |            | -305.804    | -19.277     |

| AÑO/\$ | Muro | Mantenición | Ahorro | Limpieza   | Suma                 |
|--------|------|-------------|--------|------------|----------------------|
| Año30  |      | -305.804    |        | -305.804   | -17.525              |
| Año31  |      | -305.804    |        | -305.804   | -15.932              |
| Año32  |      | -305.804    |        | -305.804   | -14.483              |
| Año33  |      | -305.804    |        | -305.804   | -13.166              |
| Año34  |      | -305.804    |        | -305.804   | -11.969              |
| Año35  |      | -305.804    |        | -305.804   | -10.881              |
| Año36  |      | -305.804    |        | -305.804   | -9.892               |
| Año37  |      | -305.804    |        | -305.804   | -8.993               |
| Año38  |      | -305.804    |        | -305.804   | -8.175               |
| Año39  |      | -305.804    |        | -305.804   | -7.432               |
| Año40  |      | -305.804    |        | -305.804   | -6.756               |
| Año41  |      | -305.804    |        | -305.804   | -6.142               |
| Año42  |      | -305.804    |        | -305.804   | -5.584               |
| Año43  |      | -305.804    |        | -305.804   | -5.076               |
| Año44  |      | -305.804    |        | -305.804   | -4.614               |
| Año45  |      | -305.804    |        | -305.804   | -4.195               |
| Año46  |      | -305.804    |        | -305.804   | -3.813               |
| Año47  |      | -305.804    |        | -305.804   | -3.467               |
| Año48  |      | -305.804    |        | -305.804   | -3.152               |
| Año49  |      | -305.804    |        | -305.804   | -2.865               |
| Año50  |      | -305.804    |        | -305.804   | -2.605               |
|        |      |             |        | <b>VAN</b> | <b>\$-59.156.389</b> |

Anexo X: Flujo de caja Sabo Dam muro de enrocado 1 muro (dólar observado \$691 el 29 octubre 2018).

| AÑO/\$ | Muro        | Mantenición | Ahorro     | Limpieza | Suma       | Flujo año i |
|--------|-------------|-------------|------------|----------|------------|-------------|
| Año0   | -37.862.000 |             | 96.777.764 |          | 58.915.764 | 58.915.764  |
| Año1   |             | -75.724     |            |          | -75.724    | -68.840     |
| Año2   |             | -75.724     |            |          | -75.724    | -62.581     |
| Año3   |             | -75.724     |            |          | -75.724    | -56.892     |
| Año4   |             | -75.724     |            |          | -75.724    | -51.720     |
| Año5   |             | -75.724     |            |          | -75.724    | -47.018     |
| Año6   |             | -75.724     |            |          | -75.724    | -42.744     |
| Año7   |             | -75.724     |            |          | -75.724    | -38.858     |
| Año8   |             | -75.724     |            |          | -75.724    | -35.325     |
| Año9   |             | -75.724     |            |          | -75.724    | -32.114     |
| Año10  |             | -75.724     |            |          | -75.724    | -29.194     |
| Año11  |             | -75.724     |            |          | -75.724    | -26.540     |
| Año12  |             | -75.724     |            |          | -75.724    | -24.128     |
| Año13  |             | -75.724     |            |          | -75.724    | -21.934     |
| Año14  |             | -75.724     |            |          | -75.724    | -19.940     |
| Año15  |             | -75.724     |            |          | -75.724    | -18.127     |
| Año16  |             | -75.724     |            |          | -75.724    | -16.479     |
| Año17  |             | -75.724     |            |          | -75.724    | -14.981     |

| AÑO/\$ | Muro | Mantenición | Ahorro | Limpieza | Suma       | Flujo año i         |
|--------|------|-------------|--------|----------|------------|---------------------|
| Año18  |      | -75.724     |        |          | -75.724    | -13.619             |
| Año19  |      | -75.724     |        |          | -75.724    | -12.381             |
| Año20  |      | -75.724     |        |          | -75.724    | -11.255             |
| Año21  |      | -75.724     |        |          | -75.724    | -10.232             |
| Año22  |      | -75.724     |        |          | -75.724    | -9.302              |
| Año23  |      | -75.724     |        |          | -75.724    | -8.456              |
| Año24  |      | -75.724     |        |          | -75.724    | -7.687              |
| Año25  |      | -75.724     |        |          | -75.724    | -6.989              |
| Año26  |      | -75.724     |        |          | -75.724    | -6.353              |
| Año27  |      | -75.724     |        |          | -75.724    | -5.776              |
| Año28  |      | -75.724     |        |          | -75.724    | -5.250              |
| Año29  |      | -75.724     |        |          | -75.724    | -4.773              |
| Año30  |      | -75.724     |        |          | -75.724    | -4.339              |
| Año31  |      | -75.724     |        |          | -75.724    | -3.945              |
| Año32  |      | -75.724     |        |          | -75.724    | -3.586              |
| Año33  |      | -75.724     |        |          | -75.724    | -3.260              |
| Año34  |      | -75.724     |        |          | -75.724    | -2.964              |
| Año35  |      | -75.724     |        |          | -75.724    | -2.694              |
| Año36  |      | -75.724     |        |          | -75.724    | -2.449              |
| Año37  |      | -75.724     |        |          | -75.724    | -2.226              |
| Año38  |      | -75.724     |        |          | -75.724    | -2.024              |
| Año39  |      | -75.724     |        |          | -75.724    | -1.840              |
| Año40  |      | -75.724     |        |          | -75.724    | -1.673              |
| Año41  |      | -75.724     |        |          | -75.724    | -1.521              |
| Año42  |      | -75.724     |        |          | -75.724    | -1.382              |
| Año43  |      | -75.724     |        |          | -75.724    | -1.257              |
| Año44  |      | -75.724     |        |          | -75.724    | -1.142              |
| Año45  |      | -75.724     |        |          | -75.724    | -1.038              |
| Año46  |      | -75.724     |        |          | -75.724    | -944                |
| Año47  |      | -75.724     |        |          | -75.724    | -858                |
| Año48  |      | -75.724     |        |          | -75.724    | -780                |
| Año49  |      | -75.724     |        |          | -75.724    | -709                |
| Año50  |      | -75.724     |        |          | -75.724    | -645                |
|        |      |             |        |          | <b>VAN</b> | <b>\$58.164.974</b> |

Anexo XI: Flujo de caja Sabo Dam muro de enrocado 1 muro (dólar observado \$691 el 29 octubre 2018).

| AÑO/\$ | Muro        | Mantenición | Ahorro     | Suma       | Flujo año i |
|--------|-------------|-------------|------------|------------|-------------|
| Año 0  | -75.724.000 |             | 96.777.764 | 21.053.764 | 21.053.764  |
| Año1   |             | -151.448    |            | -151.448   | -137.680    |
| Año2   |             | -151.448    |            | -151.448   | -125163     |
| Año3   |             | -151.448    |            | -151.448   | -113.785    |
| Año4   |             | -151.448    |            | -151.448   | -103.441    |
| Año5   |             | -151.448    |            | -151.448   | -94.037     |
| Año6   |             | -151.448    |            | -151.448   | -85.488     |
| Año7   |             | -151.448    |            | -151.448   | -77.716     |
| Año8   |             | -151.448    |            | -151.448   | -70.651     |
| Año9   |             | -151.448    |            | -151.448   | -64.228     |
| Año10  |             | -151.448    |            | -151.448   | -58.389     |
| Año11  |             | -151.448    |            | -151.448   | -53.081     |
| Año12  |             | -151.448    |            | -151.448   | -48.256     |
| Año13  |             | -151.448    |            | -151.448   | -43.869     |
| Año14  |             | -151.448    |            | -151.448   | -39.880     |
| Año15  |             | -151.448    |            | -151.448   | -36.255     |
| Año16  |             | -151.448    |            | -151.448   | -32.959     |
| Año17  |             | -151.448    |            | -151.448   | -29.963     |
| Año18  |             | -151.448    |            | -151.448   | -27.239     |
| Año19  |             | -151.448    |            | -151.448   | -24.762     |
| Año20  |             | -151.448    |            | -151.448   | -22.511     |
| Año21  |             | -151.448    |            | -151.448   | -20.465     |
| Año22  |             | -151.448    |            | -151.448   | -18.604     |
| Año23  |             | -151.448    |            | -151.448   | -16.913     |
| Año24  |             | -151.448    |            | -151.448   | -15.375     |
| Año25  |             | -151.448    |            | -151.448   | -13.978     |
| Año26  |             | -151.448    |            | -151.448   | -12.707     |
| Año27  |             | -151.448    |            | -151.448   | -11.552     |
| Año28  |             | -151.448    |            | -151.448   | -10.501     |
| Año29  |             | -151.448    |            | -151.448   | -9.547      |
| Año30  |             | -151.448    |            | -151.448   | -8.679      |
| Año31  |             | -151.448    |            | -151.448   | -7.890      |
| Año32  |             | -151.448    |            | -151.448   | -7.172      |
| Año33  |             | -151.448    |            | -151.448   | -6.520      |
| Año34  |             | -151.448    |            | -151.448   | -5.928      |
| Año35  |             | -151.448    |            | -151.448   | -5.389      |
| Año36  |             | -151.448    |            | -151.448   | -4.899      |
| Año37  |             | -151.448    |            | -151.448   | -4.453      |
| Año38  |             | -151.448    |            | -151.448   | -4.048      |
| Año39  |             | -151.448    |            | -151.448   | -3.680      |
| Año40  |             | -151.448    |            | -151.448   | -3.346      |
| Año41  |             | -151.448    |            | -151.448   | -3.042      |
| Año42  |             | -151.448    |            | -151.448   | -2.765      |

| AÑO/\$ | Muro | Mantenición | Ahorro | Suma       | Flujo año i         |
|--------|------|-------------|--------|------------|---------------------|
| Año43  |      | -151.448    |        | -151.448   | -2.514              |
| Año44  |      | -151.448    |        | -151.448   | -2.285              |
| Año45  |      | -151.448    |        | -151.448   | -2.077              |
| Año46  |      | -151.448    |        | -151.448   | -1.888              |
| Año47  |      | -151.448    |        | -151.448   | -1.717              |
| Año48  |      | -151.448    |        | -151.448   | -1.561              |
| Año49  |      | -151.448    |        | -151.448   | -1.419              |
| Año50  |      | -151.448    |        | -151.448   | -1.290              |
|        |      |             |        | <b>VAN</b> | <b>\$19.552.185</b> |

Anexo XII: Flujo de caja Flushing (dólar observado \$691 el 29 octubre 2018).

| AÑO/\$ | Ahorro        | Operación  | Costo inicial | Suma        | Flujo año i |
|--------|---------------|------------|---------------|-------------|-------------|
| Año 0  | 1.008.602.233 |            | -200.000.000  | 808.602.233 | 735.092.939 |
| Año1   |               |            |               |             | 0           |
| Año2   |               |            |               | 0           | 0           |
| Año3   |               | -2.000.000 |               | -2.000.000  | -1.366.026  |
| Año4   |               |            |               | 0           | 0           |
| Año5   |               |            |               | 0           | 0           |
| Año6   |               | -2.000.000 |               | -2.000.000  | -1.026.316  |
| Año7   |               |            |               | 0           | 0           |
| Año8   |               |            |               | 0           | 0           |
| Año9   |               | -2.000.000 |               | -2.000.000  | -771.086    |
| Año10  |               |            |               | 0           | 0           |
| Año11  |               |            |               | 0           | 0           |
| Año12  |               | -2.000.000 |               | -2.000.000  | -579.328    |
| Año13  |               |            |               | 0           | 0           |
| Año14  |               |            |               | 0           | 0           |
| Año15  |               | -2.000.000 |               | -2.000.000  | -435.258    |
| Año16  |               |            |               | 0           | 0           |
| Año17  |               |            |               | 0           | 0           |
| Año18  |               | -2.000.000 |               | -2.000.000  | -327.015    |
| Año19  |               |            |               | 0           | 0           |
| Año20  |               |            |               | 0           | 0           |
| Año21  |               | -2.000.000 |               | -2.000.000  | -245.691    |
| Año22  |               |            |               | 0           | 0           |
| Año23  |               |            |               | 0           | 0           |
| Año24  |               | -2.000.000 |               | -2.000.000  | -184.591    |
| Año25  |               |            |               | 0           | 0           |
| Año26  |               |            |               | 0           | 0           |
| Año27  |               | -2.000.000 |               | -2.000.000  | -138.686    |
| Año28  |               |            |               | 0           | 0           |
| Año29  |               |            |               | 0           | 0           |
| Año30  |               | -2.000.000 |               | -2.000.000  | -104.197    |



| AÑO/\$ | Muro | Mantenición | Ahorro | Limpieza   | Suma                 |
|--------|------|-------------|--------|------------|----------------------|
| Año31  |      |             |        | 0          | 0                    |
| Año32  |      |             |        | 0          | 0                    |
| Año33  |      | -2.000.000  |        | -2.000.000 | -78.285              |
| Año34  |      |             |        | 0          | 0                    |
| Año35  |      |             |        | 0          | 0                    |
| Año36  |      | -2.000.000  |        | -2.000.000 | -58.816              |
| Año37  |      |             |        | 0          | 0                    |
| Año38  |      |             |        | 0          | 0                    |
| Año39  |      | -2.000.000  |        | -2.000.000 | -44189               |
| Año40  |      |             |        | 0          | 0                    |
| Año41  |      |             |        | 0          | 0                    |
| Año42  |      | -2.000.000  |        | -2.000.000 | -33200               |
| Año43  |      |             |        | 0          | 0                    |
| Año44  |      |             |        | 0          | 0                    |
| Año45  |      | -2.000.000  |        | -2.000.000 | -24944               |
| Año46  |      |             |        | 0          | 0                    |
| Año47  |      |             |        | 0          | 0                    |
| Año48  |      | -2.000.000  |        | -2.000.000 | -18740               |
| Año49  |      |             |        | 0          | 0                    |
| Año50  |      |             |        | 0          | 0                    |
|        |      |             |        | <b>VAN</b> | <b>\$729.656.561</b> |

Anexo XIII: Flujo de caja Extracción mecánica (dólar observado \$691 el 29 octubre 2018).

| AÑO/\$ | Muro       | Mantenición  | Ahorro | Limpieza | Suma         | Flujo año i  |
|--------|------------|--------------|--------|----------|--------------|--------------|
| Año0   | 96.777.764 |              |        |          | 96.777.764   | 96.777.764   |
| Año1   |            |              |        |          | 0            | 0            |
| Año2   |            |              |        |          | 0            | 0            |
| Año3   |            |              |        |          | 0            | 0            |
| Año4   |            |              |        |          | 0            | 0            |
| Año5   |            | -256.000.000 |        |          | -256.000.000 | -158.955.859 |
| Año6   |            |              |        |          | 0            | 0            |
| Año7   |            |              |        |          | 0            | 0            |
| Año8   |            |              |        |          | 0            | 0            |
| Año9   |            |              |        |          | 0            | 0            |
| Año10  |            | -256.000.000 |        |          | -256.000.000 | -98.699.082  |
| Año11  |            |              |        |          | 0            | 0            |
| Año12  |            |              |        |          | 0            | 0            |
| Año13  |            |              |        |          | 0            | 0            |
| Año14  |            |              |        |          | 0            | 0            |
| Año15  |            | -256.000.000 |        |          | -256.000.000 | -61.284.364  |
| Año16  |            |              |        |          | 0            | 0            |
| Año17  |            |              |        |          | 0            | 0            |

| AÑO/\$ | Muro | Mantenición  | Ahorro | Limpieza | Suma         | Flujo año i           |
|--------|------|--------------|--------|----------|--------------|-----------------------|
| Año18  |      |              |        |          | 0            | 0                     |
| Año19  |      |              |        |          | 0            | 0                     |
| Año20  |      | -256.000.000 |        |          | -256.000.000 | -38.052.768           |
| Año21  |      |              |        |          | 0            | 0                     |
| Año22  |      |              |        |          | 0            | 0                     |
| Año23  |      |              |        |          | 0            | 0                     |
| Año24  |      |              |        |          | 0            | 0                     |
| Año25  |      | -256.000.000 |        |          | -256.000.000 | -23.627.775           |
| Año26  |      |              |        |          | 0            | 0                     |
| Año27  |      |              |        |          | 0            | 0                     |
| Año28  |      |              |        |          | 0            | 0                     |
| Año29  |      |              |        |          | 0            | 0                     |
| Año30  |      | -256.000.000 |        |          | -256.000.000 | -14.670.989           |
| Año31  |      |              |        |          | 0            | 0                     |
| Año32  |      |              |        |          | 0            | 0                     |
| Año33  |      |              |        |          | 0            | 0                     |
| Año34  |      |              |        |          | 0            | 0                     |
| Año35  |      | -256.000.000 |        |          | -256.000.000 | -9.109.530            |
| Año36  |      |              |        |          | 0            | 0                     |
| Año37  |      |              |        |          | 0            | 0                     |
| Año38  |      |              |        |          | 0            | 0                     |
| Año39  |      |              |        |          | 0            | 0                     |
| Año40  |      | -256.000.000 |        |          | -256.000.000 | -5.656.301            |
| Año41  |      |              |        |          | 0            | 0                     |
| Año42  |      |              |        |          | 0            | 0                     |
| Año43  |      |              |        |          | 0            | 0                     |
| Año44  |      |              |        |          | 0            | 0                     |
| Año45  |      | -256.000.000 |        |          | -256.000.000 | -3.512.118            |
| Año46  |      |              |        |          | 0            | 0                     |
| Año47  |      |              |        |          | 0            | 0                     |
| Año48  |      |              |        |          | 0            | 0                     |
| Año49  |      |              |        |          | 0            | 0                     |
| Año50  |      | -256.000.000 |        |          | -256.000.000 | -2.180.749            |
|        |      |              |        |          | <b>VAN</b>   | <b>-\$318.971.775</b> |

Anexo XIV: Flujo de caja Dragado (dólar observado \$691 el 29 octubre 2018).

| AÑO/\$ | Ahorro        | Dragado         | Suma            | Flujo año i     |
|--------|---------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Año 0  | 1.000.000.000 |                 | 1.000.000.000   | 1.000.000.000   |
| Año1   |               |                 | 0               | 0               |
| Año2   |               |                 | 0               | 0               |
| Año3   |               | -41.605.466.130 | -41.605.466.130 | -31.258.802.502 |
| Año4   |               |                 | 0               | 0               |
| Año5   |               |                 | 0               | 0               |
| Año6   |               | -41.605.466.130 | -41.605.466.130 | -23.485.200.978 |
| Año7   |               |                 | 0               | 0               |
| Año8   |               |                 | 0               | 0               |
| Año9   |               | -41.605.466.130 | -41.605.466.130 | -17.644.779.097 |
| Año10  |               |                 | 0               | 0               |
| Año11  |               |                 | 0               | 0               |
| Año12  |               | -41.605.466.130 | -41.605.466.130 | -13.256.783.694 |
| Año13  |               |                 | 0               | 0               |
| Año14  |               |                 | 0               | 0               |
| Año15  |               | -41.605.466.130 | -41.605.466.130 | -9.960.017.802  |
| Año16  |               |                 | 0               | 0               |
| Año17  |               |                 | 0               | 0               |
| Año18  |               | -41.605.466.130 | -41.605.466.130 | -7.483.108.792  |
| Año19  |               |                 | 0               | 0               |
| Año20  |               |                 | 0               | 0               |
| Año21  |               | -41.605.466.130 | -41.605.466.130 | -5.622.170.392  |
| Año22  |               |                 | 0               | 0               |
| Año23  |               |                 | 0               | 0               |
| Año24  |               | -41.605.466.130 | -4,1605E+10     | -4.224.019.829  |
| Año25  |               |                 | 0               | 0               |
| Año26  |               |                 | 0               | 0               |
| Año27  |               | -41.605.466.130 | -41.605.466.130 | -3.173.568.617  |
| Año28  |               |                 | 0               | 0               |
| Año29  |               |                 | 0               | 0               |
| Año30  |               | -41.605.466.130 | -41.605.466.130 | -2.384.349.073  |
| Año31  |               |                 | 0               | 0               |
| Año32  |               |                 | 0               | 0               |
| Año33  |               | -41.605.466.130 | -41.605.466.130 | -1.791.396.749  |
| Año34  |               |                 | 0               | 0               |
| Año35  |               |                 | 0               | 0               |
| Año36  |               | -41.605.466.130 | -41.605.466.130 | -1.345.902.892  |
| Año37  |               |                 | 0               | 0               |
| Año38  |               |                 | 0               | 0               |
| Año39  |               | -41.605.466.130 | -41.605.466.130 | -1.011.196.763  |
| Año40  |               |                 | 0               | 0               |
| Año41  |               |                 | 0               | 0               |

| AÑO/\$ | Ahorro | Dragado         | Suma                      | Flujo año i        |
|--------|--------|-----------------|---------------------------|--------------------|
| Año42  |        | -41.605.466.130 | -41.605.466.130           | -759.727.095       |
| Año43  |        |                 | 0                         | 0                  |
| Año44  |        |                 | 0                         | 0                  |
| Año45  |        | -41.605.466.130 | -41.605.466.130           | -570.794.211       |
| Año46  |        |                 | 0                         | 0                  |
| Año47  |        |                 | 0                         | 0                  |
| Año48  |        | -41.605.466.130 | -41.605.466.130           | -428.846.139       |
| Año49  |        |                 | 0                         | 0                  |
| Año50  |        |                 | 0                         | 0                  |
|        |        |                 | <b>VAN Millones de \$</b> | <b>-\$-123.400</b> |