



**UNIVERSIDAD DE CHILE**  
**FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS**  
**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL**

**MODELO DEL BALANCE HÍDRICO DEL TRANQUE DE RELAVES  
OVEJERÍA**

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL**

**FELIPE GARCÍA URRUTIA**

**PROFESOR GUÍA:  
HÉCTOR MARCIAL GONZÁLEZ SALAS**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
HAYDEE XIMENA VARGAS MESA  
CARLOS ALBERTO ESPINOZA CONTRERAS**

**SANTIAGO DE CHILE  
DICIEMBRE DE 2007**

## RESUMEN

La modelación del sistema hídrico superficial del tranque de relaves Ovejería constituye una importante herramienta para el análisis cuantitativo de los recursos tanto disponibles como necesarios, lo que resulta altamente valioso dado el estado actual de constante aumento en la demanda del recurso y, en particular, por las crecientes necesidades de la División Andina de Codelco Chile.

El objetivo general del presente trabajo de título fue elaborar un modelo que simule el balance hídrico superficial del tranque de relaves Ovejería, con tal de tener una estimación de ciertos flujos relevantes y a la vez evaluar escenarios de expansión de la producción, para así poder estimar las curvas representativas de la operación hídrica del tranque.

Se recopilaron, estudiaron y expusieron los antecedentes necesarios para elaborar el modelo, a partir de una revisión bibliográfica, de estudios anteriores, de entrevistas con expertos y búsqueda de información en terreno. Los antecedentes trabajados tienen que ver principalmente con las características naturales del sector, con los fundamentos teóricos que rigen los fenómenos representados y con las características operativas del tranque de relaves.

A partir de los antecedentes recopilados se procedió a realizar la idealización del sistema, describiendo cada una de las ecuaciones utilizadas y el algoritmo para realizar las iteraciones necesarias. Completada la síntesis del modelo, se calibró en diferentes puntos de control, utilizando la información recopilada y variando algunos parámetros dentro de los rangos razonables. Junto con la calibración se obtuvieron las estimaciones para el escenario actual de producción y posteriormente se simuló algunos escenarios de aumento en la producción.

Los resultados obtenidos fueron estimaciones de los flujos en el escenario actual y las curvas representativas de la operación hídrica del tranque. Entre los flujos que se estimaron están: Aportes por precipitación y escorrentía, por transporte de la pulpa y por recuperación, salidas por infiltraciones, evaporación, evapotranspiración y evacuación de crecidas y tormentas intensas. También se estimó el agua retenida en las lamas y el muro, y el volumen de agua en la laguna de aguas claras mes a mes.

Se discutió acerca de los alcances del trabajo realizado, sobre la calibración obtenida y otros aspectos del estudio. Se concluyó que la DAND necesita contar con derechos totales de 9,5 l/s por cada KTPD de producción y de entre 5,5 y 6 l/s por cada KTPD de producción de derechos consuntivos. Se estimó un caudal de 215 l/s de infiltraciones totales promedio en el período. Finalmente se entregaron algunas recomendaciones a la DAND, con objeto de continuar mejorando las estimaciones de los flujos con que se cuenta.

# ÍNDICE DE CONTENIDOS

<b>1</b>	<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
1.1	MOTIVACIÓN	1
1.2	OBJETIVOS	2
1.3	ESTRUCTURA DE LA MEMORIA	2
<b>2</b>	<b>ANTECEDENTES</b>	<b>3</b>
2.1	EL TRANQUE DE RELAVES OVEJERÍA	3
2.2	CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA	7
2.2.1	IDENTIFICACIÓN DE LA ZONA	7
2.2.2	CUENCA DEL RÍO ACONCAGUA	8
2.2.3	CUENCA DEL RÍO MAIPO	9
2.2.4	CARACTERIZACIÓN A NIVEL LOCAL DE LA ZONA DEL TRANQUE	9
2.3	MINERÍA Y RELAVES	19
2.4	COMPONENTES MÁS RELEVANTES DEL BALANCE	22
2.5	ALGUNAS RELACIONES EN LOS SUELOS	22
2.5.1	DEFINICIONES	23
2.5.2	OTRAS RELACIONES	24
2.6	CURVAS DE OPERACIÓN HÍDRICA DE UN TRANQUE DE RELAVES	25
<b>3</b>	<b>DESCRIPCIÓN DE PROCESOS E INSTALACIONES EN EL TRANQUE</b>	<b>26</b>
3.1	MANEJO DE AGUAS	27
3.1.1	DESCRIPCIÓN GENERAL	27
3.1.2	MANEJO DE LA LAGUNA	27
3.1.3	AGUA RECOLECTADA POR DRENES	32
3.1.4	ALIMENTACIÓN A ESTANQUE DE AGUA DE DILUCIÓN Y LAVADO	33
3.1.5	AGUAS DE DILUCIÓN Y LAVADO	33
3.2	DISTRIBUCIÓN Y DEPOSITACIÓN DE RELAVES	35
3.2.1	CONDUCCIÓN DE RELAVES A COLA DEL DEPÓSITO	35
3.2.2	CONDUCCIÓN DE RELAVES A MURO Y DEPÓSITO	35
3.2.3	CONDUCCIÓN DE RELAVES A MURO	36
3.3	CLASIFICACIÓN DE ARENAS	36
3.4	DISTRIBUCIÓN DE ARENAS	37
3.4.1	BOMBEO DE ARENAS	37
3.4.2	DISTRIBUCIÓN DE ARENAS EN EL MURO	37
3.4.3	CONSTRUCCIÓN DE MURO Y OPERACIÓN DE DRENES	38
<b>4</b>	<b>MODELO DEL BALANCE HÍDRICO DEL TRANQUE</b>	<b>40</b>
4.1	DESCRIPCIÓN DEL MODELO	40
4.1.1	MODELO PRINCIPAL	40
4.1.2	SÍNTESIS DE CAUDALES	46
4.1.3	FUNCIÓN SUPERFICIE DE LAMAS EXPUESTAS	55
4.1.4	FUNCIÓN SUPERFICIE DE LAGUNA DE AGUAS CLARAS	56

4.1.5	FUNCIÓN VOLUMEN DE INFILTRACIÓN DESDE LAGUNA DE AGUAS CLARAS	57
4.1.6	FUNCIÓN VOLUMEN DE EVACUACIÓN DE TORMENTAS	58
4.1.7	MODELO AUXILIAR VOLUMEN DE DESCARTE EN RIEGO	59
<b>4.2</b>	<b>IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO</b>	<b>62</b>
4.2.1	DATOS METEOROLÓGICOS	62
4.2.2	OTROS DATOS DE ENTRADA	63
4.2.3	PARÁMETROS	69
4.2.4	CONDICIONES INICIALES	70
4.2.5	MODELO AUXILIAR VOLUMEN DE DESCARTE EN RIEGO	70
4.2.6	SÍNTESIS DE CAUDALES	73
<b>4.3</b>	<b>VERIFICACIÓN</b>	<b>74</b>
<b>4.4</b>	<b>CALIBRACIÓN</b>	<b>75</b>
<b>5</b>	<b>RESULTADOS</b>	<b>80</b>
5.1	ESCENARIO ACTUAL	80
5.2	CURVAS DE OPERACIÓN DEL TRANQUE	82
<b>6</b>	<b>DISCUSIÓN, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	<b>85</b>
6.1	DISCUSIÓN	85
6.2	CONCLUSIONES	89
6.3	RECOMENDACIONES	90
	<b>REFERENCIAS</b>	<b>91</b>

# 1 INTRODUCCIÓN

## 1.1 Motivación

Debido a la creciente demanda por agua para distintos usos, ésta adquiere cada vez en mayor medida, una condición de recurso escaso, aumentando de este modo la presión sobre los sistemas de recursos hídricos. Mientras la oferta por el recurso está dada por fenómenos de origen natural, donde la intervención del hombre en la mayoría de los casos está limitada a regular el recurso existente, la demanda aumenta principalmente debido al incremento de la población humana y a las constantes transformaciones en la vida de los mismos, factores que inciden en una mayor necesidad de agua apta para ser bebida, para los más diversos usos industriales, para la agricultura, para la recreación, para la minería, etc.

Dado el escenario de creciente presión sobre los sistemas de recursos hídricos, es que se hace necesario desarrollar evaluaciones cuantitativas de la disponibilidad del recurso hídrico, con el objeto de conocer los caudales futuros con que se cuenta al momento de proyectar cierta actividad en el tiempo, que puede ser de tipo industrial, propia del ecosistema o de cualquier otro tipo. En algunos casos, la evaluación realizada puede entregar orientaciones sobre el establecimiento de restricciones con tal de asegurar el abastecimiento de agua para cierta actividad, o bien servir de base para optimizar la asignación del recurso, cuando éste se encuentra agotado.

La División Andina de CODELCO – CHILE (DAND) proyecta importantes escenarios de expansión de la producción, con el consiguiente aumento en la demanda de agua. Actualmente la producción de mineral de la DAND es de 72 ktpd y se pretende llegar a una producción de 290 ktpd.

Una herramienta que permite desarrollar las evaluaciones necesarias es la modelación de los sistemas, que en el caso particular de la División Andina, constituye una herramienta que se trabaja y perfecciona permanentemente. Respecto del balance hídrico del Tranque de Relaves Ovejería, se han desarrollado distintos informes por consultores externos que contienen discrepancias en algunas consideraciones realizadas, con las consecuentes diferencias en los resultados finales.

La modelación del balance hídrico del Tranque de Relaves Ovejería resulta un importante aporte para conocer la disponibilidad de agua con que se cuenta para los escenarios de expansión, debido a que permite estimar la cantidad de agua que es posible recuperar desde el tranque, que se considera será un importante porcentaje del total de agua utilizada en el proceso en los escenarios futuros.

## **1.2 Objetivos**

El objetivo general del presente trabajo de título es desarrollar un modelo del balance hídrico del tranque de relaves Ovejería, a escala mensual.

Entre los objetivos específicos de este trabajo están:

- Hacer una revisión de las consideraciones utilizadas en base a estudios anteriores, revisión bibliográfica y entrevistas con expertos.
- Caracterizar los aspectos relevantes, para efectos del presente trabajo, de la zona de estudio.
- Contar con estimaciones de caudales medios mensuales posibles de reutilizar en la producción, provenientes desde el tranque de relaves Ovejería.
- Dotar a la División Andina de un modelo que le permita evaluar distintos escenarios de producción, modificar parámetros inciertos del modelo e incorporar distintas alternativas de solución, como lo sería un eventual cambio en el método de disposición de los relaves.
- Obtener las curvas de demanda por transporte de pulpa (DTP) y de demanda por disposición de relaves (DDR) con que opera el tranque.

## **1.3 Estructura de la Memoria**

La estructura del presente trabajo se divide en cinco capítulos, además de ésta introducción.

En el segundo capítulo se presentan los antecedentes en los que se basa el desarrollo del trabajo: una reseña sobre el Tranque de Relaves Ovejería y otra acerca de los relaves mineros y su disposición y una caracterización general de la zona de estudio.

El tercer capítulo describe el ciclo del agua en el tranque de relaves, incluyendo los aspectos operativos del ciclo y los flujos involucrados.

En el cuarto capítulo se describe en detalle el modelo del balance hídrico desarrollado, incluyendo todos los aspectos necesarios para su adecuada comprensión y reproducción si es necesario.

En el quinto capítulo se exponen los resultados del modelo de balance realizado, los flujos de agua de entrada y salida totales y promedio en el período, los flujos promedio para los escenarios de expansión realizados y las curvas características de la operación hídrica del tranque.

El sexto capítulo corresponde a la discusión, las conclusiones y las recomendaciones que se desprenden del trabajo realizado.

## **2 ANTECEDENTES**

### **2.1 El Tranque de Relaves Ovejería**

La División Andina desarrolla sus actividades en la alta cordillera de la V Región, aproximadamente a unos 50 km. en línea recta al Noreste de la ciudad de Santiago. Explota en forma subterránea la mina Río Blanco, ubicada a unos 3.600 m.s.n.m. y la mina a rajo abierto Sur-Sur, que se encuentra sobre los 4.000 m.s.n.m. El mineral extraído de la mina es sometido a chancado, molienda fina húmeda y flotación alcalina, lo que permite obtener por una parte, como producto útil, concentrado de cobre (3% - 4% del tonelaje extraído) y, por otra parte como desecho, material estéril o relave (97% - 96% del tonelaje extraído).

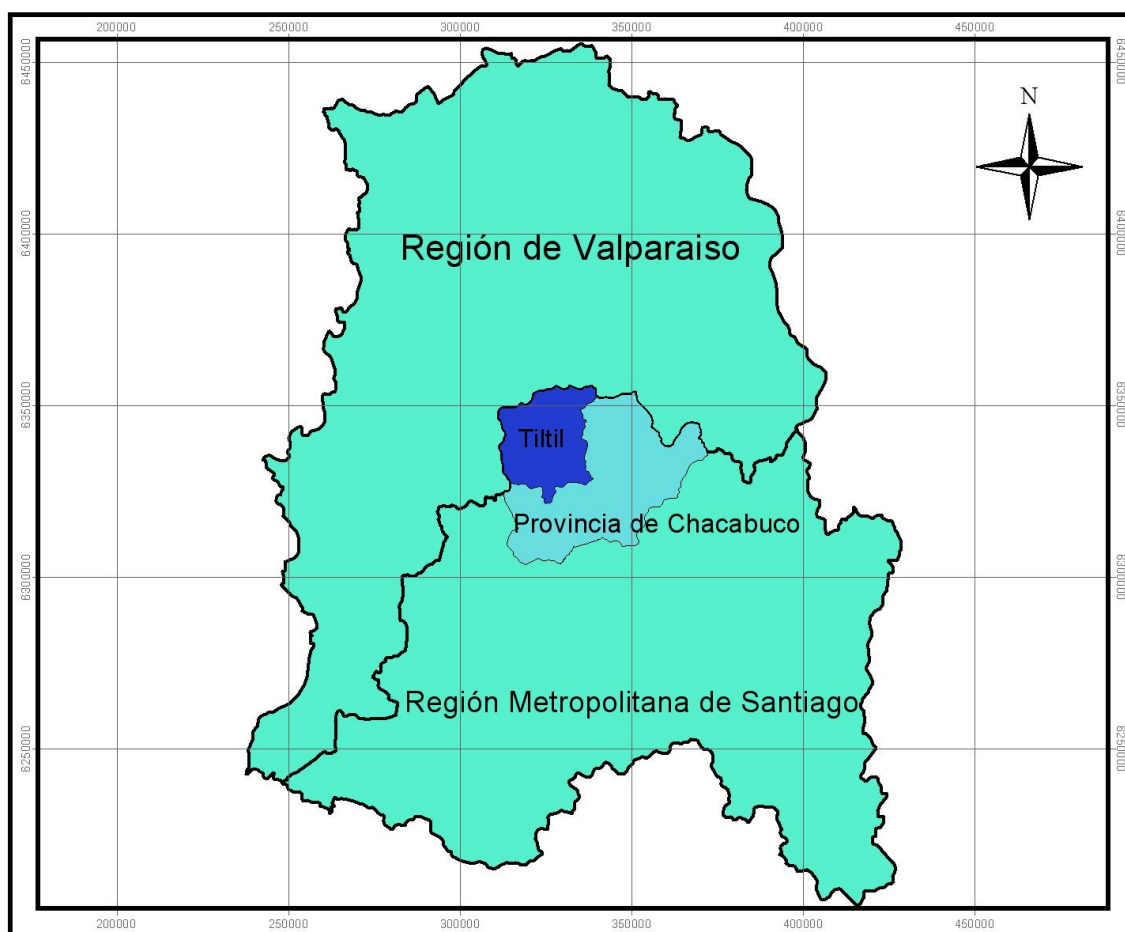
Andina inició sus actividades en junio de 1970 y, de acuerdo al proyecto original, el yacimiento fue explotado durante los primeros ocho años a una tasa de 10.000 ton/día (3,5 millones de ton/año). A partir de 1979, como resultado de diversos proyectos de expansión, la división fue incrementando su producción de mineral, alcanzando el año 1992, un nivel de 33.500 ton/día. Ese mismo año, el yacimiento de la División Andina contaba con reservas del orden de 2.000 millones de toneladas de mineral, con un total de 20 millones de toneladas de cobre fino, por lo cual su aprovechamiento necesariamente implicaba contar con un lugar apropiado para depositar material estéril en forma de relave. Inicialmente, la división había depositado sus relaves en el embalse Piuquenes y posteriormente en el embalse Los Leones, el cual, en esa fecha, se encontraba próximo al término de su vida útil.

Los estudios realizados por la División para dar respuesta al problema anterior identificaron diversas alternativas para la depositación de relaves. Se eligió la alternativa del embalse Ovejería, ubicado en el Valle Central, en la zona de Rinconada de Huechún, Comuna de Tiltil, Región Metropolitana. El fundo Ovejería presentaba varias ventajas para la construcción del tranque de relaves: Su aislamiento; la característica arcillosa de su tierra; el tamaño de la cuenca y, por último, la seguridad que representaba el muro de inicio de 16 metros de altura de arena compactada. En la Figura 2.1 se presenta la ubicación de la comuna de Tiltil.

La realización de este proyecto permitiría depositar los relaves correspondientes al procesamiento de la totalidad de las reservas conocidas de mineral, con lo cual se aseguraría la continuidad de operaciones de la División Andina durante los próximos 160 años, al mismo ritmo de producción.

El proyecto en estudio tenía como objetivo final el traslado y almacenamiento de relaves originados por el procesamiento de 2.000 millones de toneladas de relave. El área de influencia del proyecto se iniciaba en la descarga de los espesadores existentes en la alta cordillera, se desarrollaba a lo largo de la canaleta o relaveducto, y terminaba en el valle central del área de Rinconada de Huechún.

**Figura 2.1 Ubicación Comuna de Tiltit**



Fuente: Elaboración propia.

Las principales actividades consideradas por el proyecto eran las siguientes:

- Conducción de relaves, desde la descarga de los espesadores en el área de río Blanco, V Región, hasta el depósito de Ovejería, ubicado en la cuenca del estero Chacabuco en el área de rinconada de Huechún, en la Región Metropolitana. La ruta del relaveducto tendría una longitud aproximada de 77 Km., correspondiendo a un trazado en canaleta de hormigón, en un recorrido a cielo abierto y en túneles. El relave sería transportado en forma de pulpa con un contenido habitual de 57% en peso de material seco, a un caudal promedio de 418 l/s, lo que es equivalente a 32.300 ton/día de relaves originados por el procesamiento de 33.500 ton/día de mineral.
- Depositación de 1.930 millones de toneladas de relaves en el área del embalse. La hoya hidrográfica aportante de Ovejería se consideraba de de 4.400 há, de las cuales los relaves ocuparían unas 700 há al cabo de los primeros 18 años de operación, alcanzando unas 1.900 há al término de su vida útil (sobre 150 años al actual ritmo de producción). El proyecto contemplaba la construcción de un canal de contorno que permitiría captar las aguas lluvias correspondientes al



área de precipitación pluvial situada aguas arriba del embalse y evacuadas fuera de la cubeta sin que experimentaran variación alguna en sus características físicas y químicas naturales.

- Manejo de las aguas sobrenadantes de los relaves. La operación habitual del embalse fue concebido como de “descarga cero”, para años normales y también para años de grandes precipitaciones, pero no extremas. Para este efecto las aguas sobrenadantes en el embalse, provenientes de la decantación de los relaves así como de las aguas lluvias normales precipitadas sobre el área de los relaves, serían consumidas íntegramente por evacuación directa en la cubeta y playas de relaves y el resto por evapotranspiración mediante el desarrollo de una extensa área de forestación artificial que sería regada con dichas aguas.

Los recursos hídricos subterráneos en el área de Huechún fueron caracterizados en base a una revisión de la información existente y una campaña de monitoreo iniciada en agosto de 1992, en pozos seleccionados en el sector del futuro embalse de relaves. Los resultados obtenidos al cabo de un año de monitoreo confirmaron antecedentes ya existentes referentes a la aptitud de potabilidad que tenían estos recursos en su condición natural, requiriendo solamente la adición de cloro para cumplir íntegramente con las exigencias establecidas en la norma vigente para agua potable.

Los principales riesgos que fue posible prever en el embalse Ovejería son los siguientes:

- Vertimiento de relaves al medio ambiente, por mala operación.
- Contaminación de aguas superficiales o suelos, por mala operación.
- Contaminación de aguas subterráneas, por infiltración en el acuífero.

En lo que se refiere a recursos subterráneos, se continuaría con los mismos puntos y frecuencia de muestreo de la Línea Base y, adicionalmente, en los dos pozos construidos en la zona de la futura cubeta de embalse Ovejería y un pozo aguas abajo del muro. En éstos tres últimos pozos serían monitoreados semanalmente el nivel de aguas subterráneas (NAS). Los parámetros a determinar en este caso, serían los establecidos en la Norma para Agua de Uso Potable (NCh 409/84).

El proyecto “Sistema de Disposición de Relaves a Largo Plazo. Proyecto Embalse Ovejería” ingresó al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA) en forma voluntaria en noviembre de 1993, antes que dicho sistema entrara en vigencia. La autorización de la CONAMA para la construcción del tranque significó también el cumplimiento por parte de la división de exigencias de cuidado y mejoras en la zona, que sumaban casi 100 compromisos ambientales. Entre ellos, forestar 280 hectáreas con árboles nativos en los cerros que rodeaban al tranque. El plan considera el manejo de la vegetación existente, acciones de restitución y/o recuperación de zonas degradadas y medidas de protección (patrullaje, control de incendios, entre otras). Otro de los compromisos ambientales de Andina fue la forestación con eucaliptos para evapotranspiración de las aguas claras (aguas que transporta el material de descarte o relave hacia los embalses para después ser reutilizada).

El tranque de relaves Ovejería entró en funcionamiento en diciembre de 1999. Representó cinco años de construcción y un costo aproximado de 250 millones de dólares.

Actualmente, 83 Km. de canaletas conducen los relaves cordillera abajo, en algunos tramos en rápidos, que permiten llegar desde los 2.500 m.s.n.m. a 600 m.s.n.m., donde se ubica el tranque. En algunos tramos existen túneles para el paso de la canaleta y en las zonas descubiertas y de mayor riesgo, como la de Río Blanco, éstos están cubiertos con tapas de hormigón armado. La canaleta, de 80 cm. de ancho por 1 metro de alto, es bordeada por un camino de tierra para el paso de vehículos de inspección; así como también posee un sistema de monitoreo con tendido de fibra óptica. Los 13 medidores de nivel se leen constantemente desde la sala de operaciones. La fibra óptica detecta los problemas y de esta forma se accionan los procesos de seguridad. A esto se suman las cámaras de video en los ductos que muestran los niveles con que baja el relave por la canaleta. Uno de los peligros es el de los rodados, porque la canaleta atraviesa algunos tramos entre farallones de gran altura, que con lluvias muy fuertes pueden provocar rodamientos de grandes piedras. Por esto, el control permanente es vital y en caso de ser necesario existen cinco embalses de seguridad distribuidos en el recorrido de la canaleta hacia los que se puede desviar el curso del relave hasta resolver una posible situación de emergencia. En caso de grandes crecidas que pudieran colapsar el tranque, se acciona una compuerta que permite derivar el agua hacia el embalse Huechún.

La División Andina, en cumplimiento con la Resolución N° 275\_B/94 de la Intendencia de la Región Metropolitana, ha estado desarrollando el monitoreo del nivel y la calidad de las aguas subterráneas, aguas abajo del muro del Tranque de relaves Ovejería, en conformidad con lo señalado en dicha resolución, proporcionando esta información en forma periódica a la autoridad competente.

Como parte de este proceso de monitoreo, la DAND detectó, en el año 2002, un aumento del nivel freático en los pozos de control interno. Como parte de las investigaciones desarrolladas por la DAND, se elaboró un modelo para determinar el origen y la magnitud de las infiltraciones que se estaban produciendo en el área del tranque de relaves.

La División Andina, con el propósito de mantener la infiltración hacia las aguas subterráneas de acuerdo al proyecto y por lo tanto, disminuir el nivel freático, ha considerado llevar a cabo las siguientes medidas.

- Disminución del ingreso de aguas del proceso.
- Control de infiltración mejorando la tecnología de riego en el área bajo el muro.
- Bombeo de pozos aguas abajo del muro.
- Actualización del plan de monitoreo de aguas subterráneas y habilitación de nuevos pozos en el sector tranque viejo.
- Reformulación del Modelo de Infiltraciones.

- Desarrollo de un Modelo de Pluma de Infiltración.
- Control de infiltración mediante sellado de fondo de la cubeta.

La Actualización del Plan de Seguimiento y Monitoreo Ambiental asociado al Tranque de Relaves Ovejería de la División Andina fue desarrollado por GP Consultores Ltda., y entregado en febrero de 2006 a la DGA. Este estudio tuvo como objetivo formular una propuesta de actualización del plan de monitoreo, buscando que la nueva red formulada fuera representativa de los procesos y flujos observados y esperados.

La empresa consultora INGEDOS desarrolló un modelo hidrogeológico del acuífero asociado a la cuenca Ovejería, como una herramienta para identificar y cuantificar en detalle las recargas y descargas del sistema hídrico subterráneo. El modelo matemático empleado fue MODFLOW 2000, que resuelve las ecuaciones de flujo, mediante diferencias finitas centradas en el elemento o celda, en un medio poroso. Como pre y post procesador de información e interfaz gráfica, se empleó el software Groundwater Modeling System (G. M. S.) Versión 6.0 del año 2005 de la Brigham Young University.

## **2.2 Caracterización de la Zona**

En esta sección se identifica la zona de estudio. Se describen de manera general las cuencas del Río Aconcagua y del Río Maipo y se realiza una caracterización a nivel local del sector donde se ubica el Tranque de Relaves Ovejería.

### **2.2.1 Identificación de la Zona**

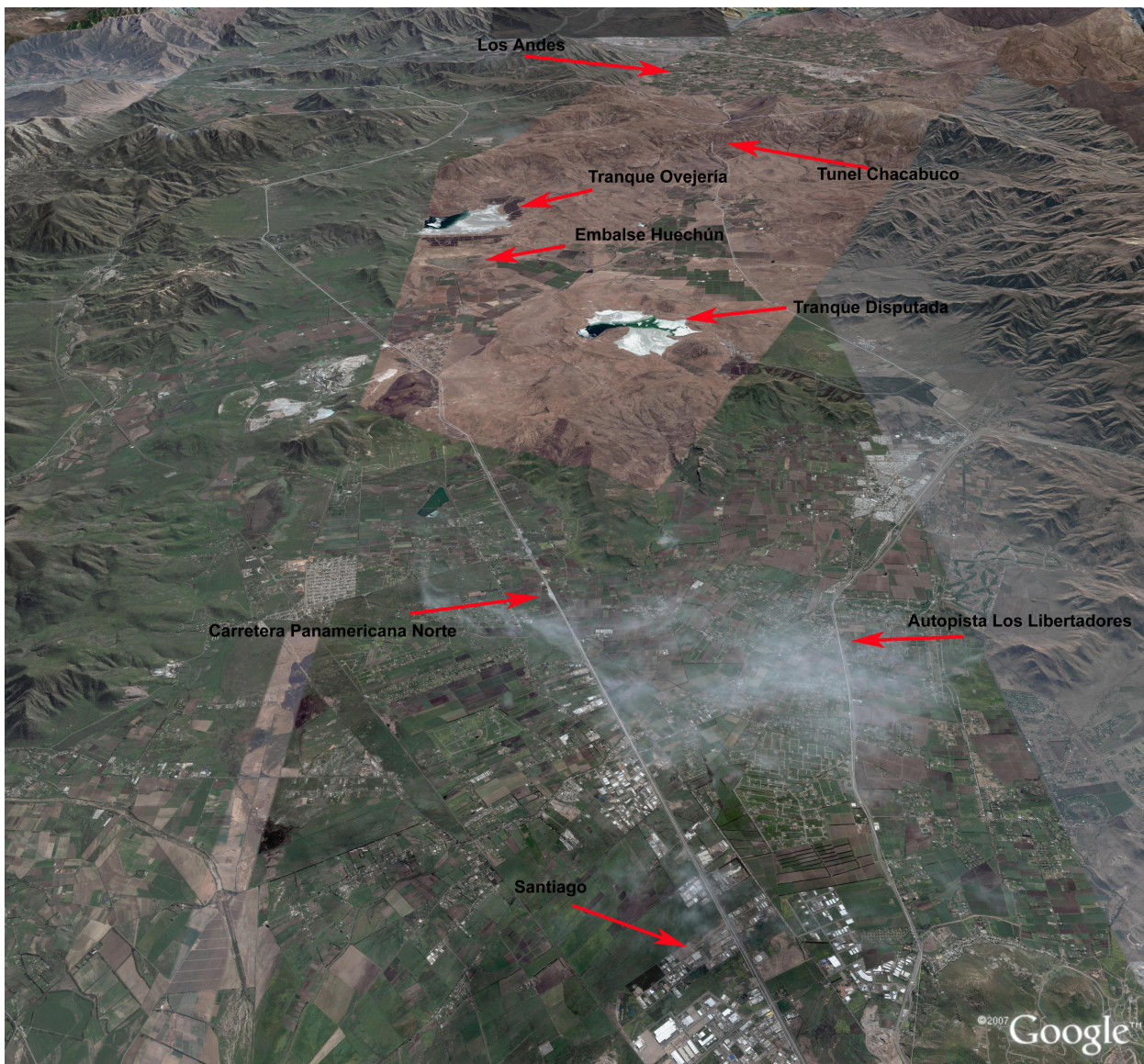
Dos son los puntos de interés: La ubicación de la mina y la ubicación del tranque Ovejería.

La mina se ubica en la parte alta del río Blanco el cual, junto al río Juncal y luego de su encuentro dan origen al río Aconcagua que es el principal río de la Quinta Región. El río Aconcagua abastece los recursos hídricos de gran parte de la demanda de aguas para la agricultura del valle de Aconcagua.

El tranque Ovejería se encuentra ubicado en las cercanías de la cuesta Chacabuco, al poniente de la Autopista Los Libertadores y al oriente de la Carretera Panamericana, al sur del túnel Chacabuco de la Autopista Los Libertadores. El sitio corresponde a la subcuenca del estero Chacabuco-Polpaico, que drena hacia el estero Lampa, tributario del río Mapocho por el norte, pertenecientes a la hoya hidrográfica del río Maipo, Región Metropolitana.

En la Figura 2.2 se presenta una imagen satelital de la ubicación del tranque.

**Figura 2.2 Ubicación del Tranque de Relaves Ovejería**



Fuente: Google Earth.

### **2.2.2 Cuenca del Río Aconcagua**

La superficie de la cuenca es de 7.340 km<sup>2</sup> y su rumbo general es de este a oeste. Se forma de la unión en la Cordillera de los Andes, a más de 1.400 m de altitud, de los ríos Juncal y Blanco, provenientes desde el oriente y el sureste respectivamente. Desde la mencionada junta hasta su desembocadura en la Bahía de Concón, recorre 142 km, recibiendo como tributarios al río Colorado, estero Riecillos, estero Vilcuya, estero Pocuro, río Putaendo, estero Quilpué, estero Catemu, estero Los Loros, estero los Litres y al estero Limache entre otros.

Se distinguen dos climas presentes en la cuenca: El clima templado mediterráneo con estación seca prolongada y el clima frío de altura. El primero abarca casi la totalidad de

la cuenca y se caracteriza por una estación seca prolongada y un invierno bien marcado con temperaturas extremas que llegan a cero grados. El segundo se localiza en la Cordillera de Los Andes por sobre los 3.000 metros de altitud y se caracteriza por sus bajas temperaturas y precipitaciones sólidas, permitiendo la acumulación de nieve y campos de hielo permanentes. Para ambos climas, las precipitaciones se concentran en los meses de junio, julio y agosto. El régimen de escorrentía del río Aconcagua es de crecidas en invierno producto de las precipitaciones y en primavera producto de los deshielos. La evapotranspiración potencial anual en la ciudad de Los Andes es de 1.400 mm.

En cuanto a la hidrogeología de la cuenca, los acuíferos almacenan una gran cantidad de aguas subterráneas y se ubican alrededor de los cauces de los ríos Aconcagua y Putaendo, teniendo su flujo un movimiento en el mismo sentido que el de los cauces.

### **2.2.3 Cuenca del Río Maipo**

La cuenca de río Maipo abarca prácticamente la totalidad de la superficie de la Región Metropolitana y también territorios de la quinta y sexta regiones. La superficie drenada es de 15.304 km<sup>2</sup>. El río Maipo tiene una longitud de 250 km y es la principal fuente de agua potable y de riego de la región Metropolitana. Sus afluentes en la parte alta son los ríos Yeso, Volcán y Colorado y los esteros Clarillo, Manzano, El Canelo, San José y Coyanco. Por el norte tiene como principales afluentes al río Mapocho y al estero Puangue; y por el sur al río Angostura.

Su régimen hidrológico es nivo-pluvial. En la parte alta y media presenta aumentos de caudales en primavera provenientes de los deshielos y en la parte baja, sus caudales crecen en invierno inducidos directamente por las mayores precipitaciones.

En esta cuenca se presentan los mismos dos climas presentes en la cuenca del río Aconcagua: El clima templado mediterráneo con estación seca prolongada y el clima frío de altura. En la ciudad de Santiago las precipitaciones anuales alcanzan los 330 mm, aumentando considerablemente en las cabeceras debido a la presencia de la Cordillera de Los Andes.

Existen también importantes acuíferos distribuidos en gran parte del área de la cuenca, los que abastecen una significativa fracción de las demandas hídricas para usos sanitarios y agrícolas.

### **2.2.4 Caracterización a Nivel Local de la Zona del Tranque**

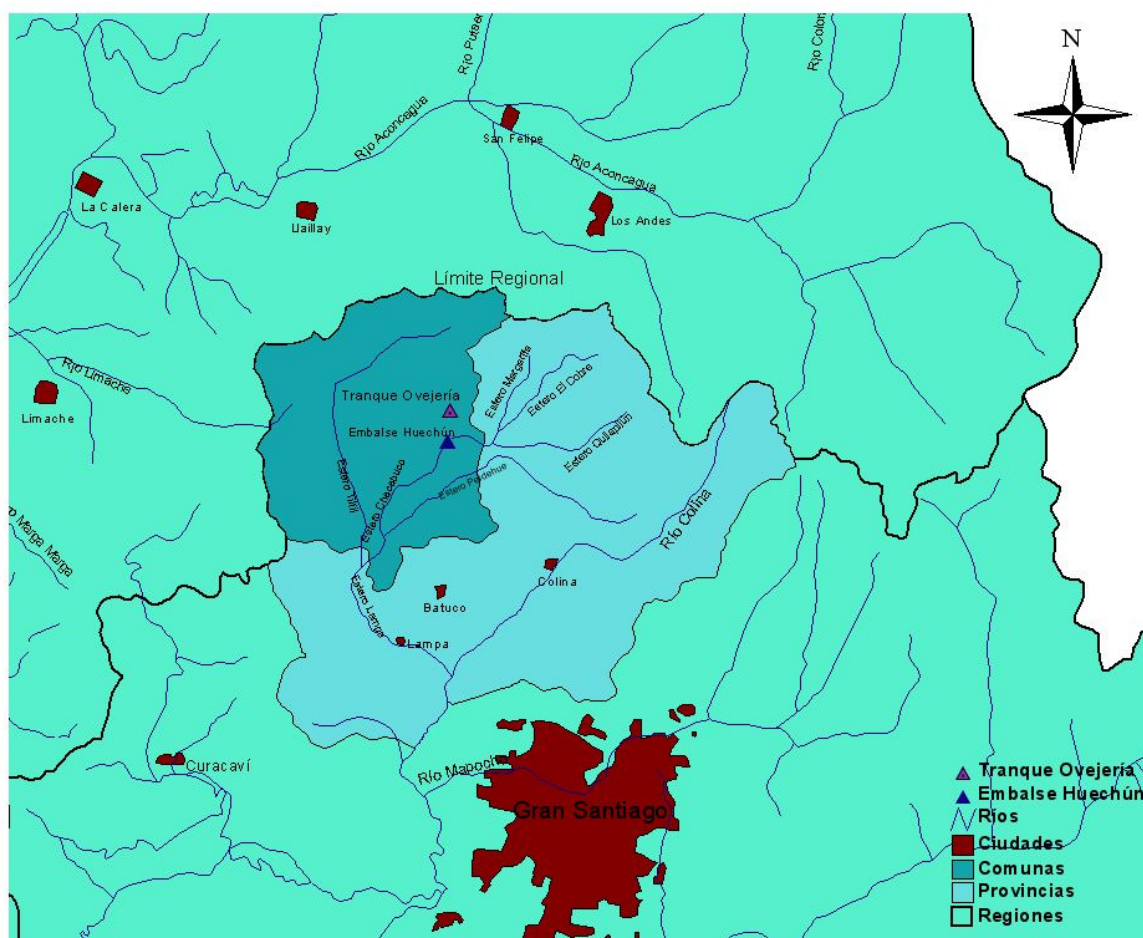
El tranque está ubicado en la subcuenca Ovejería inmediatamente al norte y aguas arriba del embalse de riego Huechún. La subcuenca Ovejería está ubicada en el sector norte de la cuenca Chacabuco-Polpaico. El depósito se ubica en una pequeña subcuenca (rinconada) del estero Chacabuco, denominada Rinconada Ovejería o Rinconada Huechún.

La cuenca Chacabuco-Polpaico está ubicada en el extremo norte de la Región Metropolitana, a 45 Km. de la ciudad de Santiago, entre los 32°55' y los 33°10' de Latitud Sur; y entre los 70°30' y los 70°55' de Longitud Oeste. Abarca un área



aproximada de 1.073 Km<sup>2</sup>, de los cuales 425 Km<sup>2</sup> corresponden a la cuenca del Estero Polpaico y 648 Km<sup>2</sup> corresponden a la cuenca del Estero Chacabuco. Ambos esteros se unen, cerca de la localidad de Polpaico, formando el Estero Lampa, que escurre en dirección norte sur. La cuenca Chacabuco-Polpaico está delimitada en el norte por el Cordón Chacabuco, en el este por la Cordillera de Los Andes y en el sur por el Cordón El Manzano. En la Figura 2.3 se presenta la ubicación del Tranque de Relaves Ovejería, del Embalse Huechún con respecto a los principales cauces y ciudades.

**Figura 2.3 Tranque de Relaves Ovejería, Cauces y Ciudades**



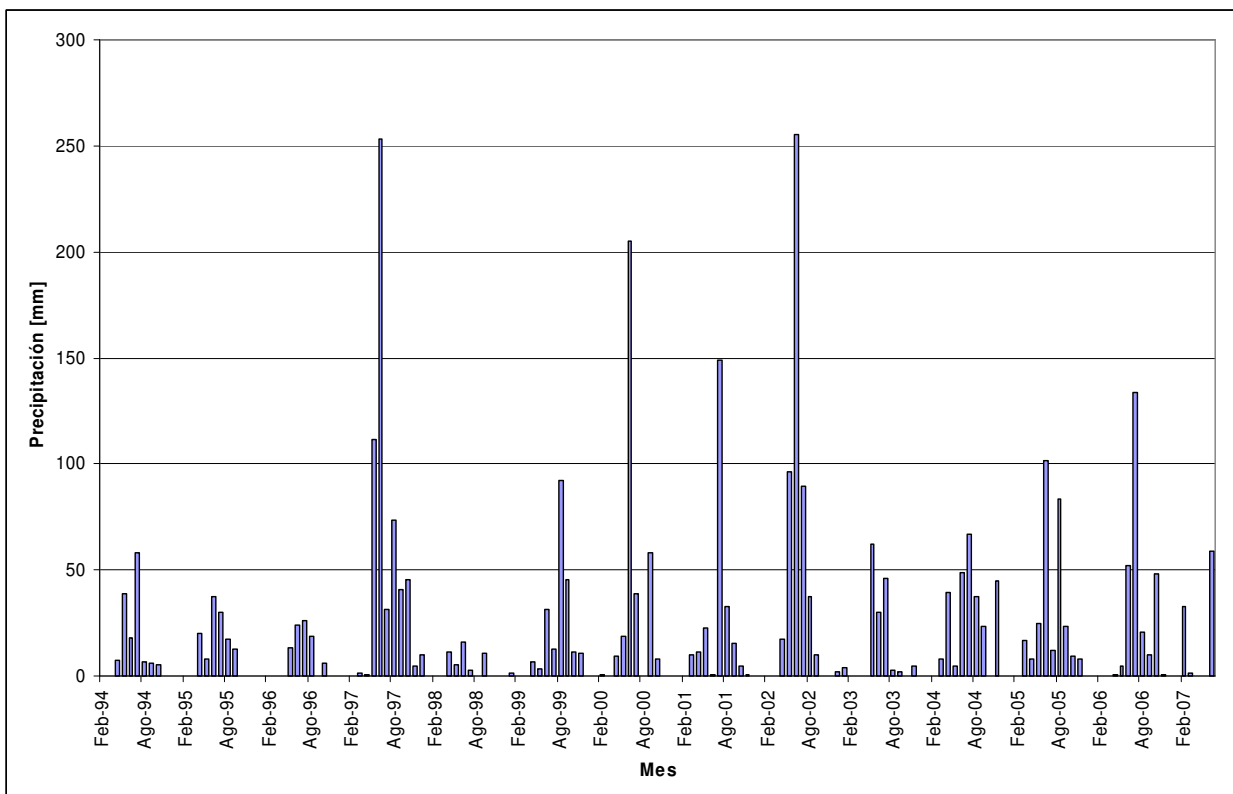
Fuente: Elaboración Propia.

### 2.2.4.1 Precipitaciones

En la Tabla 2.1 se presenta una lista de las estaciones meteorológicas en la zona del Banco Nacional de Aguas (BNA) de la Dirección General de Aguas (DGA). Las mediciones que mejor representan las precipitaciones en el tranque Ovejería, es la estación Huechún Andina. En dicha estación, el promedio anual de precipitaciones para el período que va desde febrero de 1994 hasta junio de 2007 es de 248,4 mm, registrándose la máxima media mensual en el mes de junio con un valor igual a los 80,8

mm. En la Figura 2.4 se presenta un gráfico de las precipitaciones mensuales registradas en la estación Huechún Andina en el período entre febrero de 1994 y junio de 2007.

**Figura 2.4 Precipitaciones Mensuales Estación Huechún Andina**



**Tabla 2.1 Estaciones Meteorológicas del BNA de la DGA**

Cod. BNA	NOMBRE	VIGENCIA	INICIO	UTM ESTE	UTM NORTE	ALT.	TIPO
05732002-8	EMBALSE HUECHUN ANDINA	VIGENTE	01-01-1995	336.627	6.339.904	580	PLUVIO-TERMOMETRICAS
05733006-6	RINCON DE LOS VALLES	VIGENTE	01-05-1957	334.854	6.352.815	950	PLUVIOMETRICAS
05422002-2	LAS CHILCAS	VIGENTE	01-06-1990	330.147	6.354.583	S/I	PLUVIOMETRICAS
05733009-0	TIL-TIL	S/I	S/I	319.578	6.335.908	515	SUSPENDIDAS
05732001-K	EMBALSE HUECHUN	S/I	S/I	331.991	6.337.977	570	PLUVIOMETRICAS
05733007-4	CALEU	VIGENTE	01-05-1957	313.144	6.346.880	1.120	PLUVIOMETRICAS
05733008-2	EMBALSE RUNGUE	VIGENTE	01-05-1943	322.522	6.345.205	750	TERMOPLUVIOMETRICAS
05733010-4	LAS BATEAS FUNDO	VIGENTE	01-11-1985	330.179	6.352.735	800	PLUVIOMETRICAS

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

### **2.2.4.2 Evaporación**

La evaporación promedio anual en el período 1994-2005 en la estación meteorológica Huechún Andina es de 1019,1 mm, registrándose la máxima evaporación media mensual para el mismo período en el mes de enero, con 169,3 mm.

### **2.2.4.3 Fluviometría**

Los cauces superficiales más importantes dentro de la cuenca Chacabuco-Polpaico corresponden a los esteros Chacabuco, Santa Margarita, Quilapilún, Peldehue y Tilttil, tal como se muestra en la Figura 2.3. Los recursos propios de estos esteros son prácticamente nulos, mostrando escorrentía sólo después de lluvias intensas que superen su capacidad de infiltración. El estero Quilapilún tiene un flujo proveniente del deshielo de la nieve acumulada en la zona alta de su hoya aportante y afloramientos de agua subterránea captados en una galería artificial.

La demanda hídrica para riego es imposible de satisfacer con los recursos propios de la cuenca, por lo tanto es necesario el trasvase de agua para riego desde otras cuencas, además de la explotación del acuífero. Entre los recursos provenientes de otras cuencas, el más importante es el caudal trasladado por el canal Chacabuco-Polpaico, de promedio anual 1,1 m<sup>3</sup>/s, que ingresa a la cuenca por medio de un túnel que atraviesa el cordón Chacabuco para luego pasar por el lecho del estero Margarita. El canal Chacabuco-Polpaico tiene desde el año 1.915 derechos de carácter eventual sobre el Río Aconcagua, los cuales se ejercen cuando el río se declara libre, lo que ocurre para un caudal entre 27 m<sup>3</sup>/s y 30 m<sup>3</sup>/s. En épocas en que los canales de derechos permanentes no son requeridos en toda su dotación por los regantes (durante época de invierno, cuando el río Aconcagua trae un caudal mayor a 10 m<sup>3</sup>/s), se entregan también derechos eventuales al canal.

El otro recurso de origen externo que ingresa a la cuenca Chacabuco-Polpaico proviene de la hoya del estero Colina e ingresa a la zona por un canal desde el sector alto de la cuenca del estero Peldehue, proporcionando agua para consumo humano y riego a pequeñas parcelas y terrenos agrícolas.

El tranque Ovejería se encuentra en el sector de Rinconada de la subcuenca asociada a las quebradas Ojo de Agua y Llano del Espino, que forman parte de la cuenca del sistema Chacabuco-Quilapilún. La subcuenca presenta una superficie aproximada de 44 Km<sup>2</sup> y se ubica entre las elevaciones 580 y 1.500 m.s.n.m. Presenta una orientación norte-sur, con un ancho de valle que varía entre 1 Km. (sector norte) a 3 Km. (sector sur), una largo de aproximadamente 6,5 Km. y una pendiente media de 0,6%.

Destaca la presencia de cerros islas ubicados hacia el sector oriente de la subcuenca, correspondientes, de norte a sur a: Chivato, Pescado y Charcas. El muro principal del tranque Ovejería se apoya, en su extremo izquierdo, en el cerro Chivato, y el muro más pequeño situado a continuación del principal (hacia el este), se apoya en el dorso del mismo cerro y en la ladera oriental de la cubeta.

La red de drenaje local está representada por las quebradas Ojo de Agua y Llano del Espino, que presentan dirección norte-sur y desembocaban en el embalse Huechún



antes de la construcción del tranque Ovejería. Hacia el sector del valle principal, destaca el estero Chacabuco que presenta un sentido noreste-suroeste en la localidad de El Colorado. A la altura del cerro Manuco recibe el aporte del estero Quilapilún que presenta dirección este-oeste y aproximadamente 1 Km. aguas abajo de esta intersección, el estero Chacabuco cambia su dirección de escurrimiento a sureste-noroeste, desembocando finalmente en el embalse Huechún. Por otra parte, hacia el sur del cerro Charcas escurre el estero Peldehue, el cual presenta una dirección sureste-noroeste. De acuerdo a esto existe una divisoria de aguas superficiales en el sector del valle principal y a la altura del cerro Charcas, en donde la red de drenaje tendría una dirección tanto hacia el norte como hacia el sureste.

En la Figura 2.5 se muestra una vista aérea de la zona del tranque Ovejería y el límite de la cuenca aportante.

En la zona existe una estación fluviométrica vigente, la estación Polpaico en Chicauma. La calidad de la estadística registrada en la estación es mala por varias razones. Por un lado la estación ha resultado destruida en múltiples ocasiones por las crecidas. Además, está ubicada en un brazo del cauce, por lo que posiblemente hay cierta parte del caudal que no es medido. La estación registra un caudal medio mensual para el período 1950-2005 de  $0,9 \text{ m}^3/\text{s}$ .

#### **2.2.4.4 Aguas Subterráneas**

El sentido del flujo subterráneo es en la dirección del valle principal coincidiendo con la antigua red de drenaje local, es decir, hacia el embalse Huechún y hacia la localidad de Huechún. Las quebradas “Llano del Espino” y “Ojo de Agua” presentan flujos preferenciales en dirección al embalse Huechún y al sector del Tranque Viejo, en la Figura 2.7 se muestra la dirección del flujo de las aguas subterráneas.

La División Andina posee una red de monitoreo de calidad y niveles de aguas subterráneas, con pozos distribuidos en la zona, para evaluar la evolución de una posible influencia del tranque de relaves Ovejería sobre dicha variables.

En la Tabla 2.2 se presenta la lista de pozos de monitoreo dentro del área de influencia directa del tranque de relaves. La ubicación de los mismos se presenta en la Figura 2.6.

**Figura 2.5 Cuenca Aportante al Tranque Ovejería**



Fuente: Google Earth.

**Tabla 2.2 Pozos de Monitoreo Área de Influencia Directa**

POZO	COTA [m.s.n.m.]	UTM ESTE	UTM NORTE
PBID-1	576,913	332.854	6.340.721
PBID-2	575,699	332.471	6.340.664
PBID-3	576,635	332.096	6.340.631
PBID-4	575,653	331.729	6.340.599
PBID-5	576,368	331.355	6.340.568
PB2	S/I	332.224	6.340.106
A1	S/I	335.123	6.339.422
E. Saavedra	S/I	334.441	6.336.216
C16 R	S/I	334.297	6.336.364
C23	S/I	332.274	6.335.140
C28	S/I	329.801	6.335.140

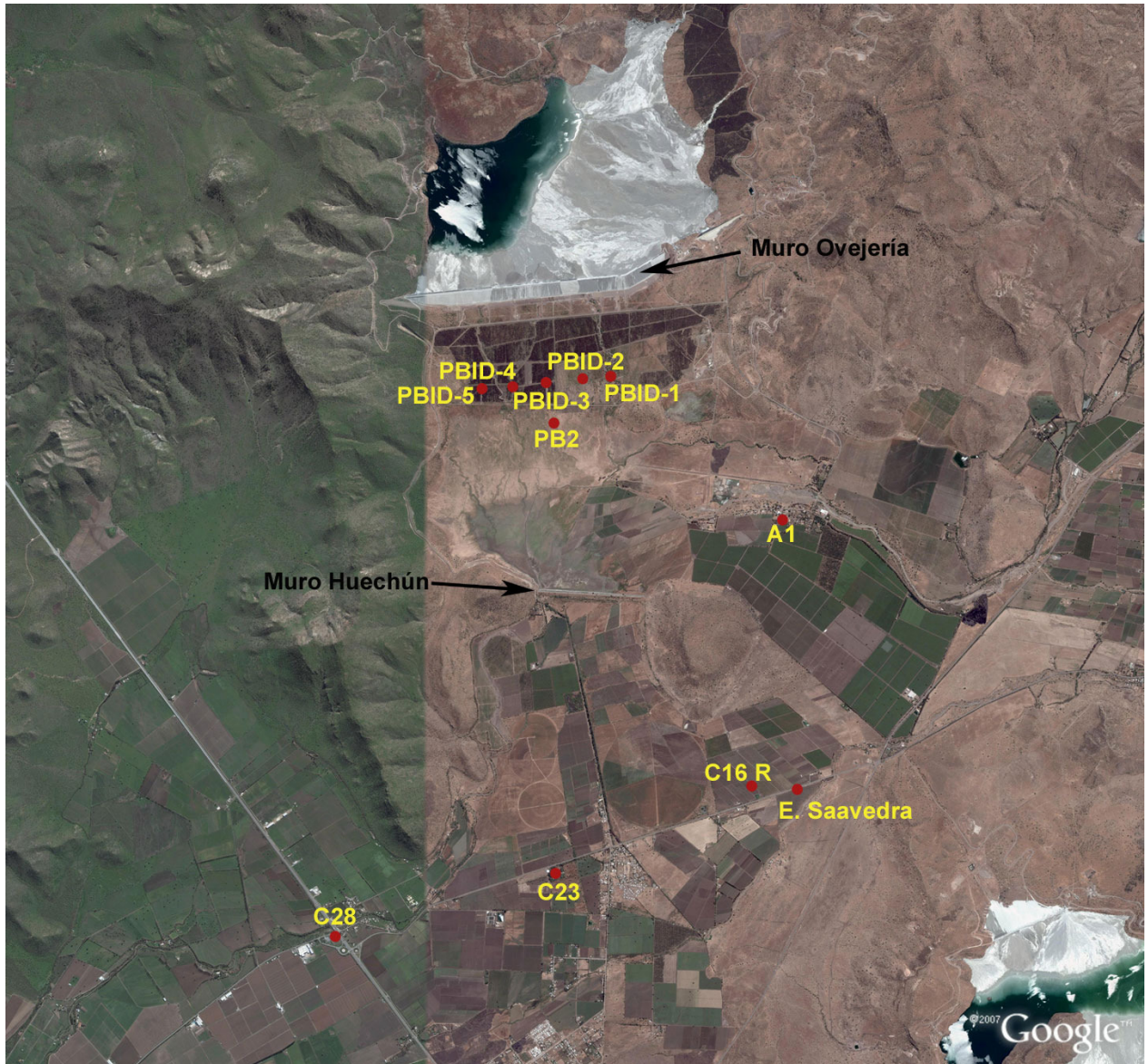
En la Figura 2.8 se presenta un gráfico de la evolución del nivel estático en los pozos de la red de monitoreo que se encuentran inmediatamente aguas abajo del muro, mientras que en la Figura 2.9 se muestra la evolución histórica de la profundidad del nivel estático en los demás pozos de la red de monitoreo del área de influencia directa del tranque. Observando la Figura 2.8 se puede ver que en el transcurso del año 1997 el nivel estático de los pozos con datos aumenta cerca de 10 metros, para luego disminuir paulatinamente hasta un total de 5 metros hasta comienzos del año 2000. Posteriormente el nivel estático aumenta sostenidamente, en el transcurso del año 2000 se produce un aumento de unos 5 metros retomando los niveles de fines de 1997. En el transcurso del año 2001 y la primera mitad del año 2002 se produce un aumento de otros 5 metros, manteniéndose esos niveles relativamente constantes con un pequeño descenso de un par de metros hasta el año 2007. En total, en el período 1997-2007 se ha producido un aumento de poco menos de 15 metros en el nivel estático. Como se ve en la Figura 2.10 el comportamiento anterior se explica en parte por la cantidad de precipitaciones. El bajo nivel de comienzos de 1997 se debe a que tanto el año 1997 como el año 1998 fueron de pocas precipitaciones, al igual que el año 1998 que fue especialmente seco. El año 1997 fue muy lluvioso, a igual que el año 2002.

A pesar de lo anterior, los niveles actuales son superiores en unos 5 metros a los niveles registrados luego del aumento de los mismos posterior al año 1997, especialmente lluvioso. Tal diferencia sería explicable por las infiltraciones que se producen desde el tranque de relaves hacia el acuífero, cuya existencia queda confirmada por el aumento que se ha detectado en la concentración de sulfatos en los pozos de monitoreo a partir de septiembre de 2002.

Si se observa la evolución de la profundidad del resto de los pozos de la red de monitoreo del área de influencia directa presentada en la Figura 2.9, se puede ver que el nivel estático en estos pozos presenta el mismo comportamiento dependiente en gran medida de la cantidad de precipitaciones, pero no se aprecia el mismo aumento en los niveles debido a la operación del tranque.



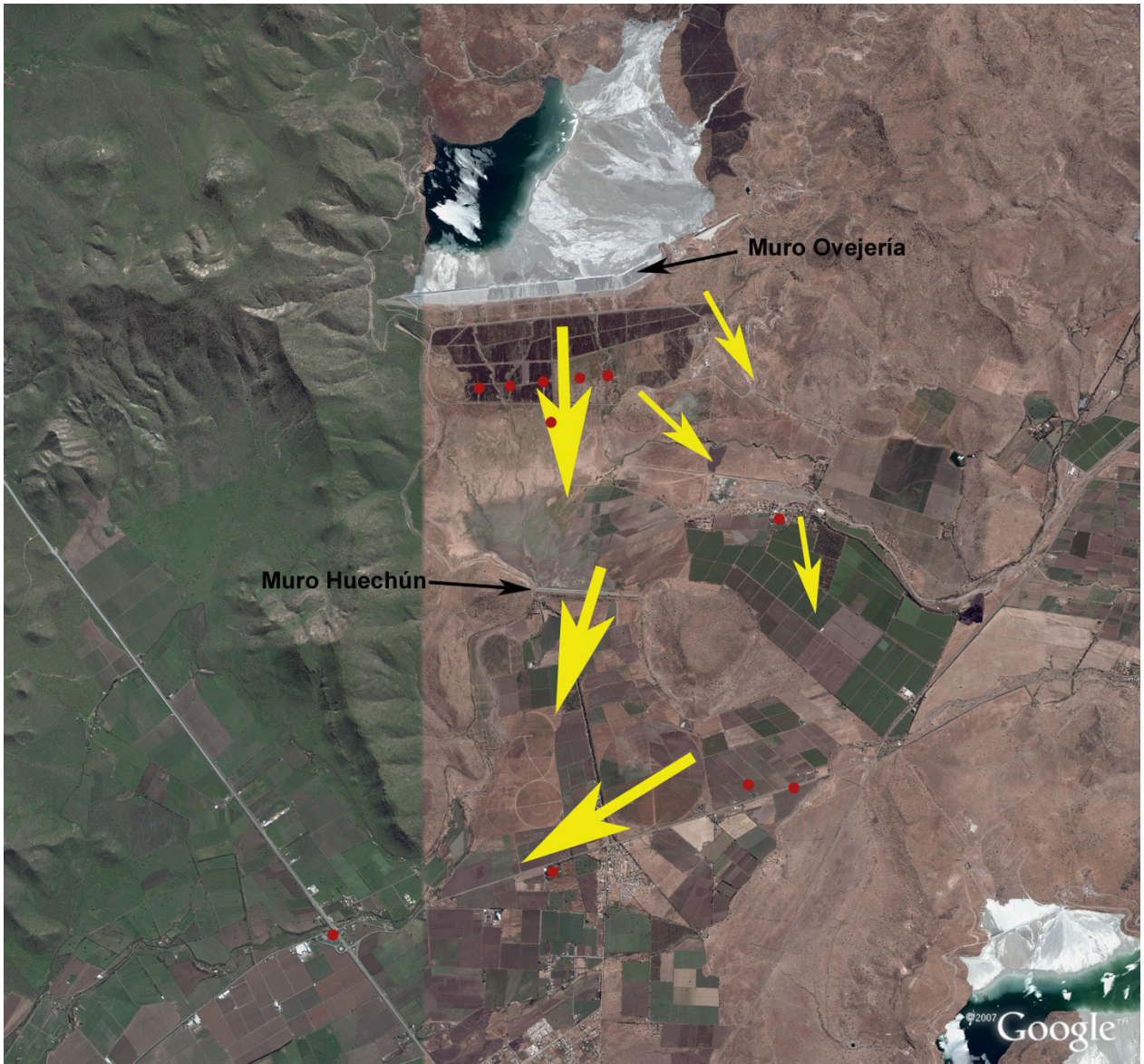
**Figura 2.6 Pozos de Monitoreo Área de Influencia Directa**



Fuente: Elaboración propia.

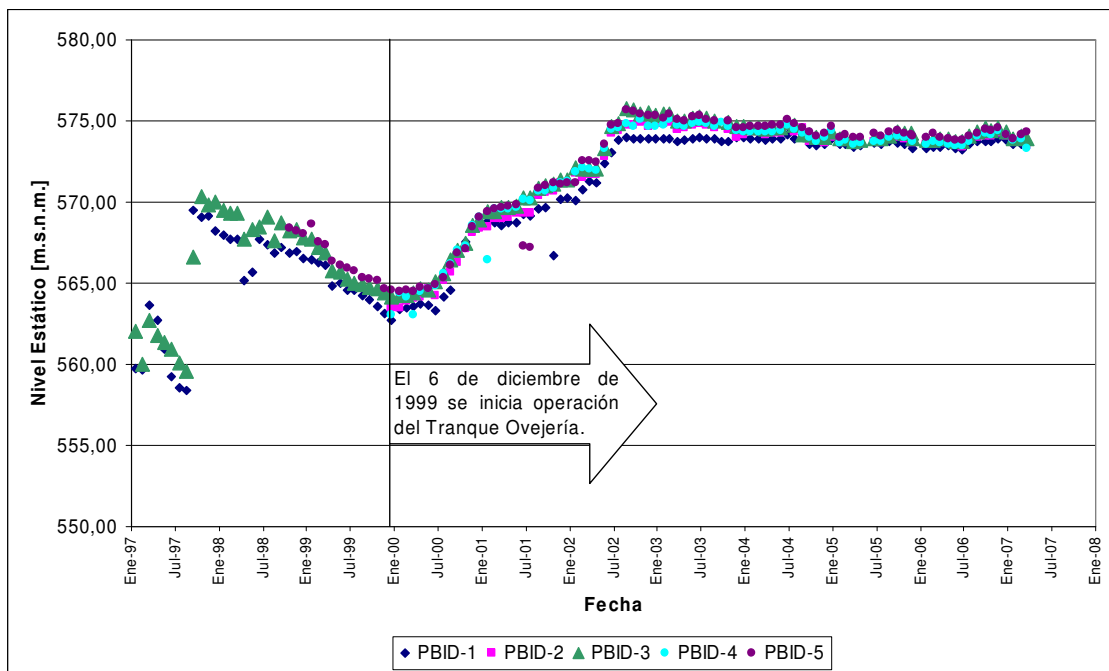


**Figura 2.7 Dirección del Flujo del Agua Subterránea**



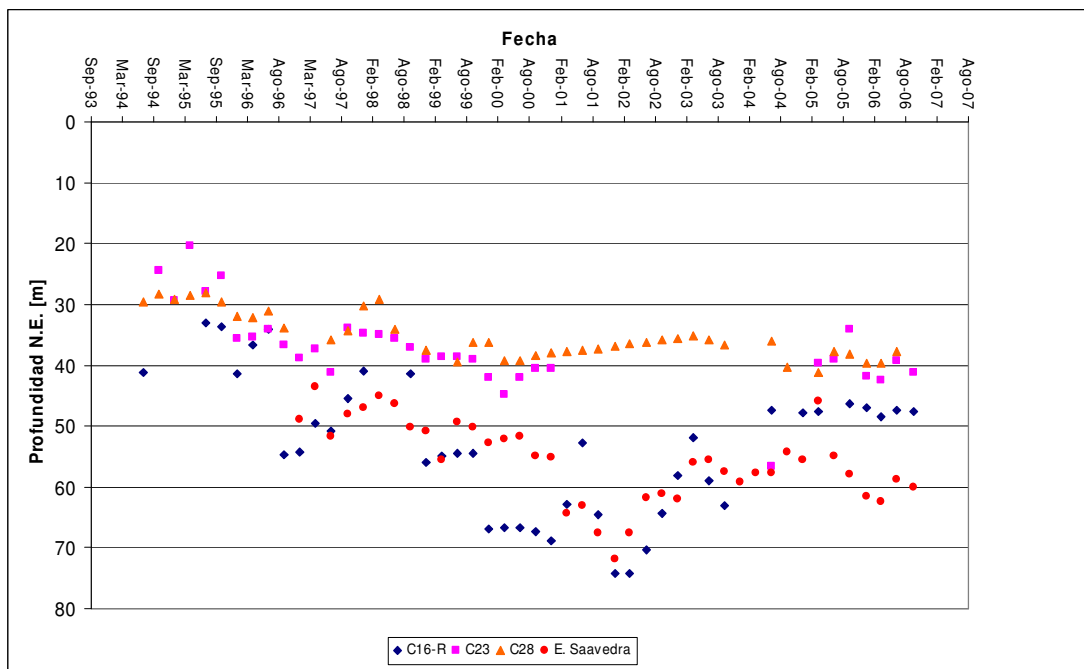
Fuente: Elaboración propia en base a estudios anteriores.

**Figura 2.8 Evolución del Nivel Estático en Pozos de Monitoreo**



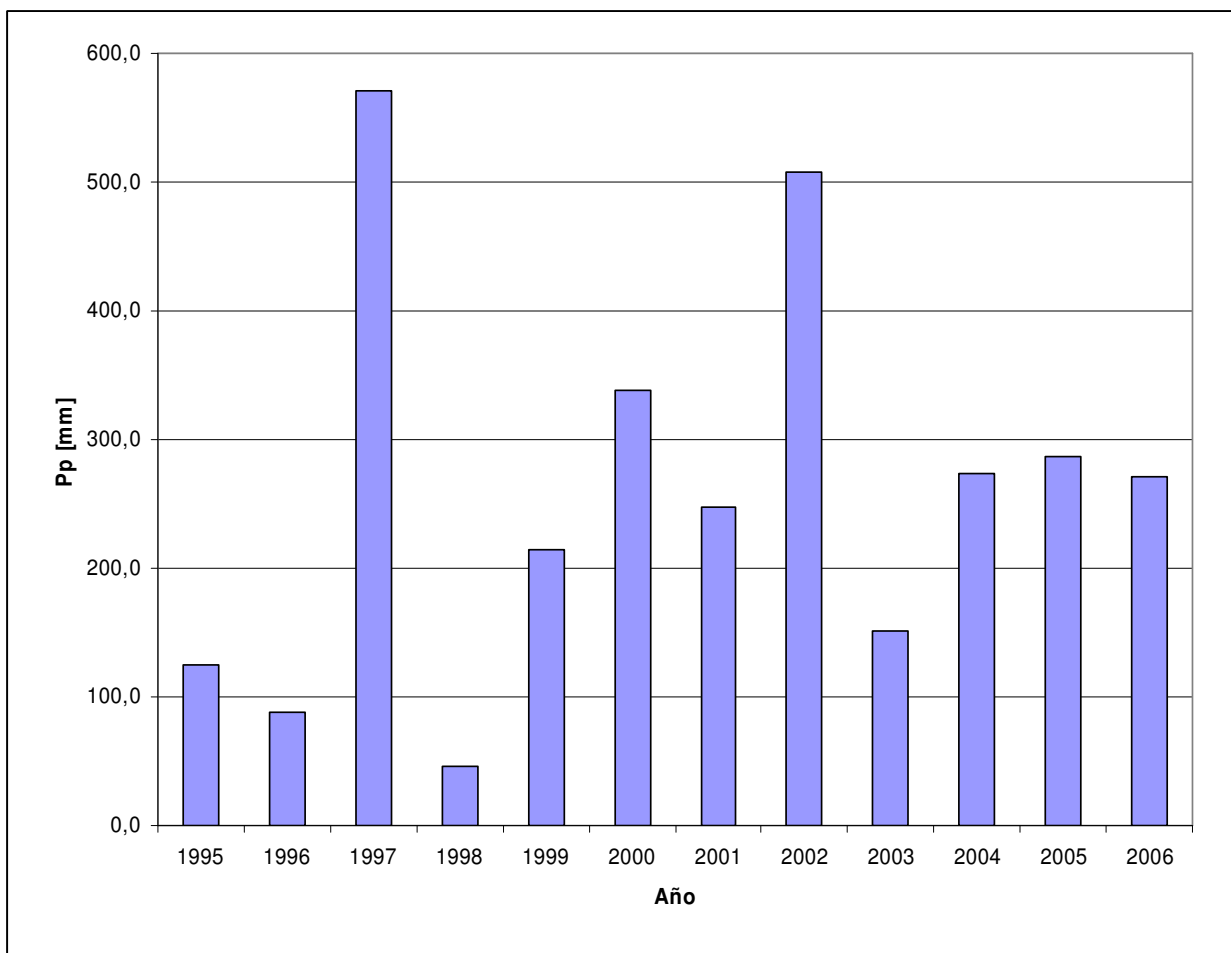
Fuente: Elaboración propia.

**Figura 2.9 Evolución de la Profundidad del Nivel Estático en Pozos de Monitoreo**



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 2.10 Precipitaciones Anuales Estación Huechún Andina**



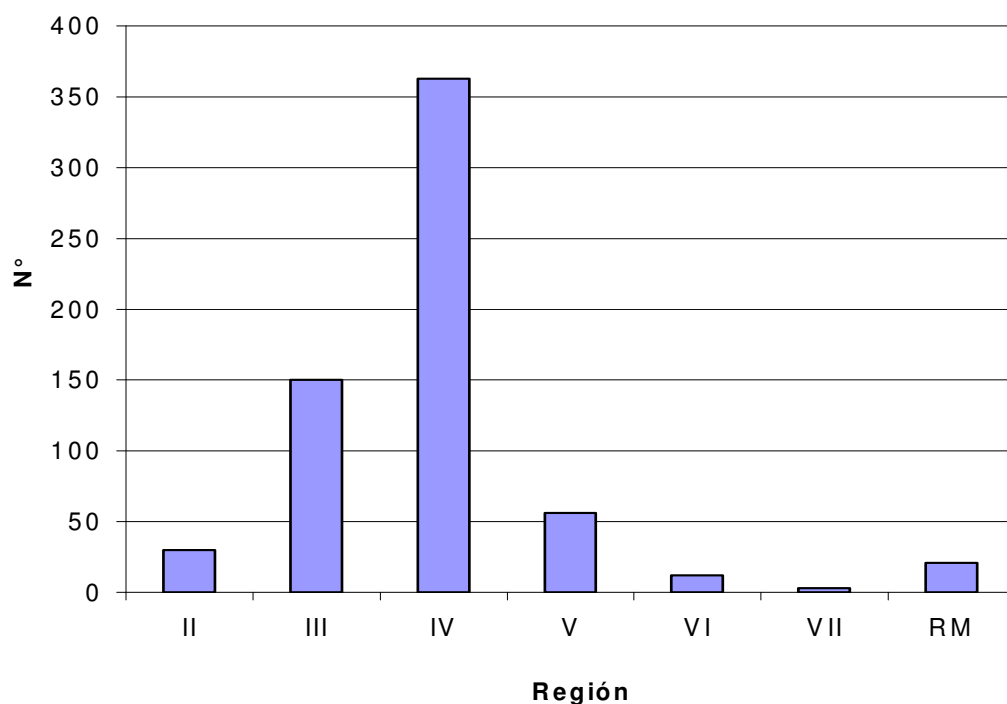
Fuente: DAND.

### 2.3 Minería y Relaves

La minería, junto con ser uno de los sectores productivos más importantes del país, genera una importante cantidad de desechos, dadas las bajas proporciones en que se encuentran los metales preciados en las rocas. En esta sección se presentan algunos datos que permiten hacerse una idea de la cantidad, estado e incremento de los depósitos de relaves en Chile.

Existe un catastro de depósitos de relaves y otros depósitos no convencionales del Servicio Nacional de Geología y Minería SERNAGEOMIN que, entre otras cosas, cuantificó el número de ese tipo de depósitos. En un estudio realizado por la División de Recursos Hídricos y Medio Ambiente para la Comisión Nacional de Medio Ambiente CONAMA el año 2002, se recogió y presentó la información del número de depósitos hasta 1988 entre la segunda y la séptima regiones, la que se presenta en la Figura 2.11.

**Figura 2.11 Número de Depósitos de Relaves por Regiones a 1988**



Fuente: CONAMA, 2002.

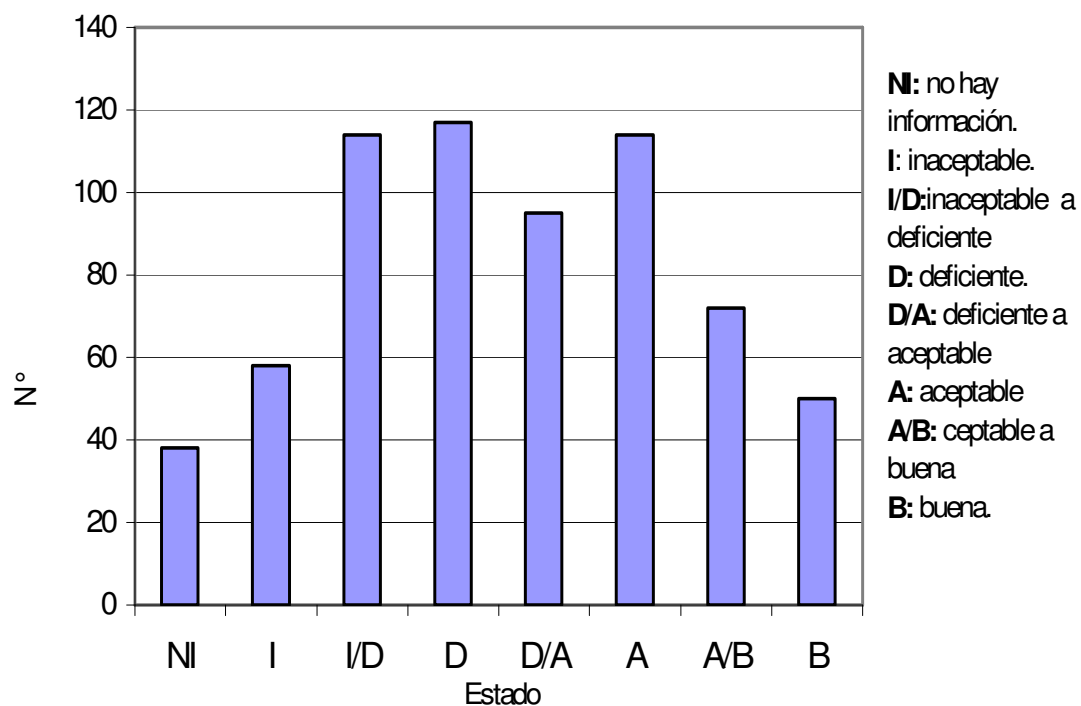
En el mismo estudio se rescató la información relativa a la calidad en que se encontraban los depósitos catastrados, información que se presenta en la Figura 2.12.

En el mismo estudio de la CONAMA, se rescató la información que lleva registrada el SERNAGEOMIN sobre los proyectos de depósitos de relaves presentados entre 1.992 y 1.998, la que se presenta en la Figura 2.13.

El estudio de la CONAMA rescata también la información de la base de datos que posee SERNAGEOMIN en la cual incluye todas las empresas mineras que se encuentran activas y los depósitos de relaves asociados a ellas. A la fecha del informe (Diciembre 2002) existía un total de 107 de ellos activos entre las regiones Primera y Décimo Primera, tal como se presenta en la Tabla 2.3.

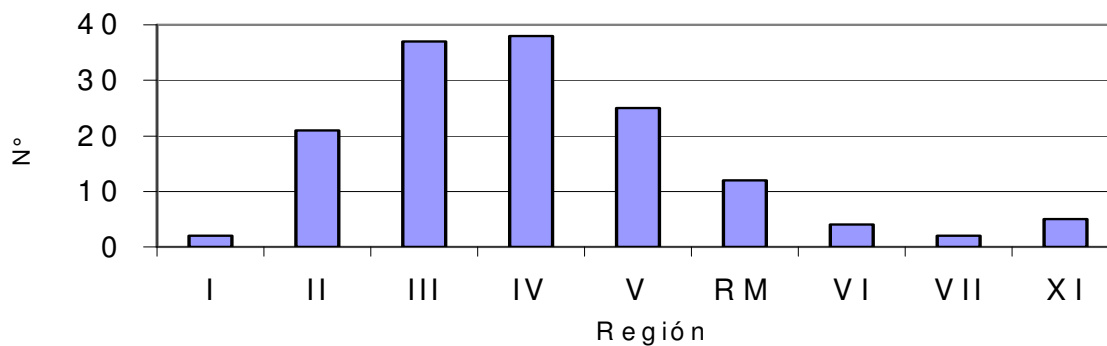


**Figura 2.12 Calidad de los Depósitos de Relave**



Fuente: CONAMA, 2002.

**Figura 2.13 Número de Proyectos Presentados por Regiones desde 1992 a 1998**



Fuente: CONAMA, 2002.

**Tabla 2.3 Depósitos de Relaves Activos por Región a Diciembre de 2.002**

Región	Número de Depósitos
I	1
II	14
III	34
IV	38
V	11
RM	5
VI	2
XI	2
TOTAL	107

Fuente: CONAMA, 2002.

## 2.4 Componentes Más Relevantes del Balance

Desde el punto de vista de la cantidad de agua involucrada, los procesos de evaporación, infiltración y consolidación de las lamas depositadas son los más relevantes. En el Anexo 9 del archivo magnético adjunto, se describe la teoría relativa a estos fenómenos.

## 2.5 Algunas Relaciones en los Suelos

En esta sección se presentan las relaciones de los suelos que se utilizan durante el estudio.

Una porción de suelo se puede representar esquemáticamente como en la Figura 2.14. Está compuesto de cierto volumen y masa de sólidos  $V_S$  y  $M_S$  respectivamente, una parte de su volumen y masa corresponde a agua intersticial ( $V_A$  y  $M_A$ ), y cierto volumen de aire o de vacíos  $V_V$ .

Se cumple que:

$$V_T = V_S + V_A + V_V \quad (1)$$

$$M_T = M_S + M_A \quad (2)$$

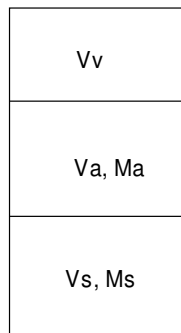
En suelos saturados se cumple que:

$$V_T = V_S + V_A \quad (3)$$

Donde:

- $V_T$  : Volumen total.
- $V_S$  : Volumen de los sólidos.
- $V_A$  : Volumen de agua.
- $V_V$  : Volumen de vacíos.
- $M_T$  : Masa total
- $M_S$  : Masa de sólidos.
- $M_A$  : Masa de agua.

**Figura 2.14 Representación Esquemática de un Suelo**



### 2.5.1 Definiciones

Se definen las siguientes propiedades de un suelo:

$$C_p = \frac{M_s}{M_s} \quad (4)$$

Donde:

- $C_p$  : Concentración de sólidos en peso.

$$D = \frac{M_T}{V_T} \quad (5)$$

Donde:

- $D$  : Densidad de la muestra.

$$D_A = \frac{M_S}{V_T} \quad (6)$$

Donde:

- $D_A$  : Densidad aparente de los sólidos de la muestra.

$$D_R = \frac{M_S}{V_S} \quad (7)$$

Donde:

- $D_R$  : Densidad real de los sólidos de la muestra.

$$H_V = \frac{V_A}{V_T} \quad (8)$$

Donde:

- $H_V$  : Humedad volumétrica.

### 2.5.2 Otras Relaciones

A partir de las ecuaciones (2), (5) y (8) se tiene que:

$$V_A = \frac{H_V \times M_S}{(D - H_V)} \quad (9)$$

A partir de las ecuaciones (3), (6) y (7) se tiene que para un suelo saturado:

$$V_A = M_{Sx} \left( \frac{1}{D_A} - \frac{1}{D_R} \right) \quad (10)$$

A partir de las ecuaciones (3) y (4) se tiene que para suelos saturados:

$$V_A = M_{Sx} \left( \frac{1}{C_P} - 1 \right) \quad (11)$$

## **2.6 Curvas de Operación Hídrica de un Tranque de Relaves**

Estas curvas han sido definidas arbitrariamente en función de representar gráficamente ciertas cantidades de agua relevantes a la hora de evaluar la operación hídrica de un tranque de relaves. No se ha encontrado bibliografía al respecto, pero la DAND se encuentra implementándolas como un instrumento de gestión, y ha solicitado incluirlas en los resultados del presente estudio. A continuación se describen las curvas que se muestran en el punto 5.2, como resultados del estudio. Las curvas se dibujan en un gráfico que lleva la producción diaria de mineral en la abcisa y el caudal de agua en la ordenada.

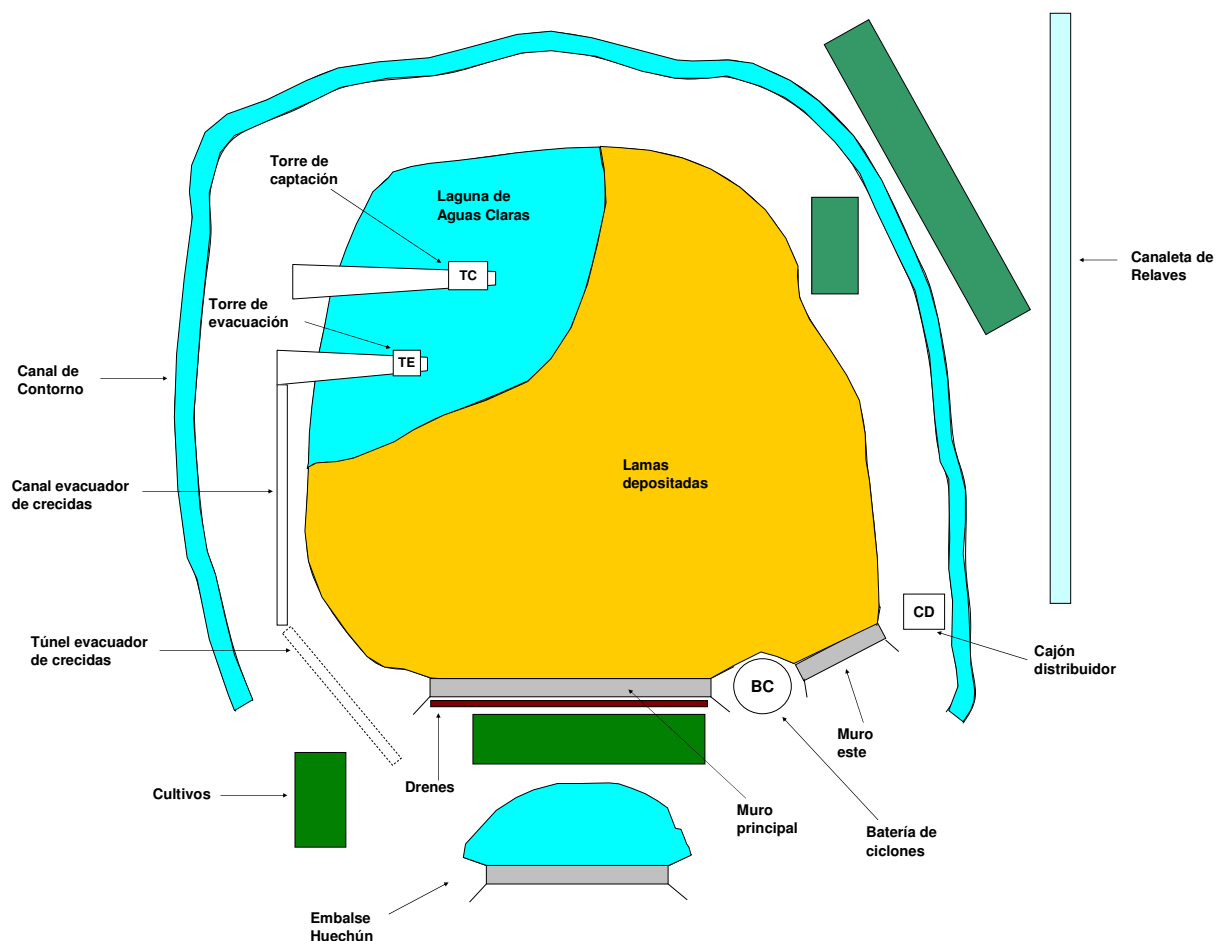
Se define la curva de transporte de pulpa DTP como la curva caudal de agua en el transporte del relave en la canaleta versus producción de mineral.

La curva de disposición de relaves DDR se define como la curva agregada de los almacenamientos (sin contar el volumen en la laguna de aguas claras) y las salidas (sin contar el agua en riego). Además se define la curva de disposición de relaves optimizada DDR\* como la que resulta de descontar los caudales de infiltración a la curva DDR. Tanto a la curva DDR como a la curva DDR\*, se les descuentan los caudales de entrada que no provienen del transporte de relaves (precipitación incidente, escorrentía y recirculación desde sentinas).

### 3 DESCRIPCIÓN DE PROCESOS E INSTALACIONES EN EL TRANQUE

En este capítulo se efectúa una descripción de los procesos e instalaciones del Sistema de Manejo de Aguas del Embalse Ovejería. Principalmente se reproduce el material atingente del documento “Manual de Operaciones, Manejo de Aguas. Embalse Ovejería” y del documento “Servicio Integral de Operación del Sistema de Depositación de Relaves en División Andina. Bases Técnicas” de la DAND. La descripción expuesta en el presente capítulo sirve de base para la definición conceptual del modelo. En la Figura 3.1 se presenta un esquema en planta de las instalaciones de principal importancia para en presente trabajo

Figura 3.1 Esquema en Planta de las Instalaciones Principales



Fuente: Elaboración propia.

## **3.1 Manejo de Aguas**

### **3.1.1 Descripción General**

El Sistema de Manejo de Aguas tiene por objetivos mantener el volumen de agua de la poza de clarificación, dentro de los valores de diseño y márgenes de seguridad; abastecer de agua para efectuar los procesos de Clasificación y Depositación de Arenas; mantener drenado el muro de arenas y abastecer al sistema de descarte de agua.

Las principales áreas que forman este sistema se presentan a continuación.

### **3.1.2 Manejo de la Laguna**

#### **3.1.2.1 Descripción del Proceso**

El sistema de manejo de agua de la laguna tiene como función captar y conducir, hacia la Piscina de Agua de Dilución, el agua necesaria para satisfacer los requerimientos de agua de dilución y lavado, y los requerimientos de riego estacionales. Además, con esto permite realizar el manejo del volumen de agua existente en la laguna de clarificación.

El sistema se inicia aguas arriba, en la laguna de agua clara del embalse y termina, aguas abajo, en la obra de toma de la Piscina de Agua de Dilución.

La captación y conducción se realiza a partir de Torres de Captación ubicadas en un costado de la laguna, las cuales poseen una serie de bombas en su parte superior. Las bombas de la torre captan e impulsan el agua hasta el Canal de Contorno, el cual permite conducir el agua hacia la Piscina de Agua de Dilución. Desde el canal de contorno también es posible abastecer agua a los diferentes sistemas de riego.

En los 20 años de vida útil proyectados para el embalse se considera, en la medida que suba el nivel de la laguna, la construcción de cuatro Torres de Captación, de acuerdo a lo señalado en la Tabla 3.1.

Actualmente la Torre N° 1, se encuentra fuera de operaciones al cumplir su vida útil y se encuentra operando la Torre N° 2 desde mediados del año 2003. Para las Torres N° 3 y 4 el año de operación es muy estimativo, dependiendo del crecimiento real del muro (lamas) y del agua embalsada.

La captación de aguas claras posee una capacidad máxima de 1.440 l/s, de los cuales  $\pm 450$  l/s corresponden al caudal de agua necesario para dilución y lavado del sistema de clasificación y bombeo de arenas, el cual opera en forma permanente durante todo el año. La capacidad restante es empleada en los requerimientos de riego para descarte de agua.

**Tabla 3.1 Torres de Captación de Aguas Claras**

<i>Torre N°</i>	<i>Cota Superior</i>	<i>Año Estimado Operación</i>
1	607,0	1
2	614,0	4
3	622,0	--
4	633,0	--

Paralelamente, el sistema cuenta con un Evacuador de Crecidas, el cual entrará en operación sólo en casos de emergencia, durante crecidas y en condiciones tales que las descargas al diluirse con las aguas naturales cumplan con las normas de agua para riego. El sistema se compone de una Torre de Evacuación vertical con tres vanos verticales independientes que permitirán verter el agua a un pozo de disipación desde el cual entra sin presión a un túnel que la conduce hasta un canal que descarga en el estero Chacabuco.

### **3.1.2.2 Descripción de las Instalaciones**

#### **Laguna de Agua Clara**

La laguna de agua clara está confinada en el sector nor.-poniente del embalse. El crecimiento del muro está programado para permitir que la cubeta cuente antes del periodo invernal con capacidad suficiente de almacenar el agua clara de relaves más una crecida con período de retorno de 50 años más una crecida de retorno de una en 500 años. De acuerdo con el estudio hidrológico, corresponden a un volumen de 7 millones y 10 millones de m<sup>3</sup>, respectivamente. A esto se debe agregar una revancha mínima de 3 m en cualquier periodo de operación.

#### **Obra de Captación e Impulsión**

La obra de captación, está compuesta por los siguientes elementos:

- **Canal de Aproximación:** excavado en el terreno natural, el cual permite el paso de agua clara desde la laguna hacia la Torre de Captación.
- **Torre de Captación:** consistente en un cajón de hormigón de 16 m de largo (frente), 8 m de ancho (fondo) y 18 m de alto, cerrado perimetralmente. En el frente oriente tiene dos vertederos de 0,80 m de largo cada uno, con umbral variable definido por un sistema de losetas de hormigón de 0,3 m alto. Estas losetas se instalan desde la plataforma de operación mediante un sistema de teclas eléctricos, permitiendo variar el nivel de captación según requerimientos de caudal y turbiedad del agua.



- **Plataforma:** Una plataforma superior conectada al terreno natural mediante una estructura metálica con pasillo y un sistema de tecla manual que permite traspasar las losetas de hormigón al sistema de teclas eléctricos.
- **Sistema de Bombeo:** Ocho bombas verticales tipo turbina, tamaño 12"x20", con motor trifásico de 250 HP y 1450 rpm; líneas impulsión de acero, de diámetro 12", estándar y con longitud aproximada de 33 m, cada una con capacidad para impulsar 180 l/s. Las bombas están dispuestas de tal manera que forman dos conjuntos de cuatro bombas cada uno. Cada grupo de cuatro líneas de impulsión se conecta a un manifold de 28" de diámetro, que derivan a sendas líneas del mismo diámetro que descargan en el canal de contorno. Ambas líneas se conectan a través de una línea de acero de diámetro 16" que se controla mediante una válvula de compuerta.

### Canal de Contorno

La obra es un canal excavado en terreno natural, por las laderas de los cerros aledaños, que posee un camino de borde y que ha sido construido con dos objetivos principales:

- Servir como aductor para transportar agua para la dilución de relaves y eventualmente para conducir aguas para descarte mediante el riego de plantaciones forestales,
- Servir como interceptor de aguas lluvias que escurren por laderas y quebradas para conducir las fuera del área de la cubeta hasta el cauce natural aguas abajo del muro, con el fin principal de evitar su ingreso a la cubeta y asegurar el recurso a los usuarios agrícolas de la zona de aguas abajo del embalse.

El canal, de 17 Km de largo, posee tres secciones características para capacidades de 1.2, 3.0 y 5 m<sup>3</sup>/s y cruza unas 45 quebradas.

Eventualmente, las aguas aportadas por quebradas y laderas superarán la capacidad del canal, de 5 m<sup>3</sup>/s máximo. Con esta condición se concibió que las quebradas menores y laderas sean interceptadas por el canal en un 100%, mientras que algunas quebradas medianas traspasen hacia la cubeta los flujos de aguas lluvias mediante una serie de alcantarillas – canoas y, además, la disposición de seis bocatomas en quebradas medianas y mayores donde la captación puede ser total o parcial.

El canal de contorno está constituido por las obras que se describen a continuación:

- **Cajón de Inicio:** Esta obra corresponde al cajón de recepción de las aguas impulsadas desde el muelle de aguas claras, y tiene como objetivos: recibir las aguas provenientes de la poza de aguas claras y aquietarlas y distribuir las aguas hacia el canal de contorno oriente y poniente, para lo cual existe una compuerta manual que permite la entrega al canal poniente.
- **Canal de Contorno, tramo inicial, desde cajón de inicio (Km. 0,548) a Bocatoma N ° 1 (Km. 2.032):** Corresponde a un canal de sección trapezoidal, construido en tierra y roca, revestido con geomembrana en todo su trayecto.

Posee una pendiente de 0.05%, y un ancho basal de 1.2 m. El talud es de 1.5/1 y su profundidad de 1.5 m.

- **Canal de Contorno, tramo medio, desde Bocatoma N ° 1 (Km. 2.032) hasta Bocatoma N ° 5 (Km. 8.920):** Corresponde a un canal de sección trapecial, construido en tierra y roca, con revestimiento de HDPE en algunos tramos. Posee una pendiente de 0.05% y un ancho basal de 1.5 m. Su talud es de 1.5/1 y con una profundidad de 1.7 m.
- **Canal de contorno, tramo final, desde Bocatoma N ° 5 (Km. 8920) hasta la obra de descarga a tranque El Chaval (Km. 16.344):** Corresponde a un canal de sección trapecial, construido en tierra y roca, con revestimiento de HDPE en algunos tramos. Su pendiente es de 0.05% y su ancho basal es de 1.5 m. Posee un talud de 1.5/1 y una profundidad de 2.5 m.
- **Cruces de quebradas:** El canal de contorno oriente, en su recorrido de 17 Km., cruza 45 quebradas de diferente importancia. Estos cruces han sido resueltos mediante Bocatomas, Alcantarilla de Cruce o por ingreso directo al canal. De acuerdo con el tamaño de la quebrada respectiva, y por ende de su caudal afluente, se construyeron dos tipos de bocatomas, tres tipos de alcantarillas de cruces, nominadas tipo 1, 2 y 3, y finalmente en las quebradas de menor importancia se ha dispuesto la entrada directa al canal de contorno.
- **Obras de Captación Quebradas Menores:** están compuestas por piscinas de disipación, de 6 x 6 m, desde las cuales el agua es conducida por una canoa de hormigón que deriva en el interior del canal. En este punto, el canal está revestido por una canoa de hormigón de 0.8 m de altura y fueron contemplados tres anchos distintos, según el tamaño del área aportante: 0.5, 1.0 y 1.6 m. En estos casos el camino de servicio se ha separado del canal de contorno y el cruce quebrada-camino se hace en un badén.
- **Bocatomas en quebradas:** se construyeron dos tipos de obras según la importancia de la quebrada a captar. El primer tipo de captación corresponde a las Bocatomas N° 1, 2, 3 y 6, cuyas cuencas son de mediana importancia. Están constituidas por una captación de fondo mediante una rejilla y tiene vaciamiento directamente sobre el canal de contorno. En este caso su diseño es para un caudal específico de 2 m<sup>3</sup>/s/m. Estas bocatomas descargan sobre el sector del canal de contorno de 3.0 m<sup>3</sup>/s de capacidad. El segundo tipo corresponde al caso específico de la quebrada Ojos de Agua (bocatoma N° 5), cuya cuenca es la de mayor magnitud. Consiste en una bocatoma independiente que capta por el fondo mediante una rejilla y dispone de un canal aductor que conduce el agua hasta una cámara de confluencia con el canal de contorno. En este punto el canal de contorno se inicia para una capacidad de 5 m<sup>3</sup>/s. En este caso el diseño es para un caudal específico de 3 m<sup>3</sup>/s/m. En ambos tipos de bocatomas se dispone de vertederos laterales para el vertido de los excedentes sobre la propia quebrada y el cruce de caminos se realiza por badenes.
- **Obra de toma para riego:** El sistema de descarte de agua del proyecto Ovejería contempla tres áreas de riego, una interna en la cola del embalse, aguas abajo

del canal de contorno; en la cola del embalse, aguas arriba del canal de contorno; y otra ubicada aguas abajo del muro de arenas. Desde el canal se realiza el aporte de agua a las forestaciones por medio de una serie de obras. Su respectiva descripción queda fuera del alcance de este documento.

- **Obra de toma Piscina Agua de Dilución:** La obra de toma de las aguas destinadas al proceso de clasificación se sitúa aproximadamente en el Km. 14,1 del canal de contorno oriente. Esta obra consiste en un sumidero de fondo controlado con un orificio lateral con una compuerta manual que alimenta una cámara desde donde nacen tres tuberías de diámetro 12". La regulación del caudal ingresado a la piscina se efectúa mediante la apertura total o parcial de la compuerta de operación remota.
- **Rápido de descarga a Tranque El Chaval:** Esta obra permite descargar las aguas excedentes del canal de contorno oriente al tranque El Chaval para posteriormente conducir las hacia el Embalse Huechún, sólo en casos de extrema necesidad. El rápido de descarga es un canal rectangular de 1,1 m de base y 0,9 m de alto, concebido para transportar un caudal máximo de 5 m<sup>3</sup>/s entre las cotas 640 y 585 m.s.n.m. Las pendientes del rápido son similares a las pendientes topográficas variando entre 25% y 10%, según la ubicación. Se ha considerado una transición de entrada que permite mantener la altura normal en el canal y un dissipador de energía, en el extremo final, que entrega las aguas al tranque El Chaval con régimen de río. Desde el punto de vista operativo no presenta restricciones de ningún tipo por tratarse de un sistema abierto que opera en cualquier condición de caudal entrante bajo los 5 m<sup>3</sup>/s.

### Canal Poniente

Consiste en una excavación en suelo y roca que comienza inmediatamente aguas abajo del cajón de inicio del Canal de Contorno y que se extiende por casi 2 Km. Su principal función es la colección de las aguas lluvias provenientes de las laderas aledañas al camino de acceso a la torre de Captación. Además, este canal es utilizado para el riego de plantaciones ubicadas aguas abajo del muro de arenas. Posee una pendiente de 0.05% y una capacidad máxima de 200 l/s.

Las obras principales del canal poniente son:

- **Bocatomas:** el canal posee seis obras de toma de agua proveniente de las quebradas aledañas. Una obra de hormigón permite que las aguas ingresen al canal mientras que el excedente es derivado al embalse por unos tubos corrugados que cruzan por debajo del camino.
- **Rápido de Descarga a Canal Evacuador:** Se consideró un rápido de descarga desde el canal Poniente hacia el canal Evacuador. La obra consiste en una canaleta de hormigón de 1.0 x 1.1 m, la cual posee en su parte final un dissipador de energía antes de la entrega al canal de evacuación.

### Sistema de Evacuación de Crecidas

- **Torre de Evacuación:** Se sitúa en el costado sur-poniente de la laguna de agua clara. Es una estructura vertical de sección horizontal rectangular, con forma de

peineta y tres vanos independientes de 1,0 m de luz cada uno y una altura máxima de caída de 25 metros. Cada vano posee un umbral de vertimiento variable, que se consigue con la instalación de losetas de hormigón, a medida que sube el nivel de relaves depositados. Además, tiene compuertas móviles que permiten regular el nivel de la laguna y en particular, permiten bajar el nivel de agua después de una crecida. Para la colocación de las losetas se ha considerado un tecele manual que corre por una viga monorriel soportada en una estructura de tipo metálico, desde donde las losetas son traspasadas a los tecles eléctricos que las bajan hacia su ubicación definitiva en los vanos. La torre ha sido diseñada para operar con una carga de 3,0 m, con lo cual consigue una capacidad de evacuación de 25 m<sup>3</sup>/s. Adicionalmente, cuando los vanos se encuentran con sus compuertas móviles cerradas, permiten que éstos operen con una carga máxima de 1,5 m, logrando de este modo una capacidad de evacuación variable y a voluntad entre 0 y 10 m<sup>3</sup>/s según se fijen los umbrales de operación de las losetas.

- **Túnel Evacuador de Crecidas:** Considera una sección tipo herradura, con ancho basal de 4,5 m y una altura total de 4,5 m. Su longitud es de 1846 m y posee una pendiente uniforme de 0,4%. Se ubica en la ladera poniente de la Rinconada de Huechún, entre las cotas 587,15 m.s.n.m. (entrada) y 579,76 m.s.n.m. (salida) y el escurrimiento en su interior es en régimen de río con un caudal de diseño de 25 m<sup>3</sup>/s.
- **Canal Evacuador de Crecidas:** Es un canal de sección trapezoidal diseñado en tierra. Su ancho basal es de 4,5 m, pendiente de 0,03%, talud de 1/1 y una longitud de 4.335 m. El canal recorre la ladera de la cuenca del embalse Huechún, iniciado en la cota 579,15 m.s.n.m. y finalizando a la salida del túnel Las Torcazas en la cota 577,86. El escurrimiento es en régimen de río con un caudal de diseño de 25 m<sup>3</sup>/seg. Además, en este canal se ha considerado una compuerta que derive las aguas hacia el interior del embalse Huechún. La compuerta, de accionamiento remoto y apertura ON / OFF, sólo debe ser utilizada en función de lo dictado por la Superintendencia de Recursos Hídricos y Relaves.

### 3.1.3 Agua Recolectada por Drenes

#### 3.1.3.1 Descripción del Proceso

El sistema de drenaje está diseñado para captar la mayor parte del agua empleada en el transporte de arenas al muro que percolan a través de talud, las aguas lluvias percoladas desde la superficie y las filtraciones bajo la presa. Debido a criterios ambientales el flujo debe ser cuantificado y recirculado al depósito, evitando su paso hacia aguas abajo.

Las aguas del drenaje del muro y las impulsadas por el sistema de recirculación de forestación, son conducidas por gravedad hasta dos sentinas, llamadas Oriente y Poniente. La Sentina Poniente cuenta con dos bombas verticales, una en operación y otra de reserva, para impulsar las aguas captadas hasta la Sentina Oriente. Desde esta última, el total de las aguas captadas es impulsado por cuatro bombas, 3 en operación

y 1 de reserva, hasta el Estanque de Lamas localizado en el cerro Chivato. Adicionalmente, es posible derivar parte de ese flujo para el riego de las plantaciones ubicadas aguas abajo del muro, mediante la acción de una válvula manual.

### **3.1.4 Alimentación a Estanque de Agua de Dilución y Lavado**

#### **3.1.4.1 Descripción del Proceso**

Este sistema abastece al Estanque de Agua de Dilución y Lavado, con el agua requerida para los procesos de dilución y lavado del sistema de clasificación, así como del lavado de líneas de relaves en directo y otras instalaciones, la cual es obtenida mediante bombeo desde la Piscina de Agua de Dilución.

Los límites de baterías para este sistema corresponden a la obra de entrada de agua a la Piscina de Dilución y a la llegada al Estanque de Agua de Dilución y Lavado, respectivamente.

### **3.1.5 Aguas de Dilución y Lavado**

#### **3.1.5.1 Descripción del Proceso**

El Estanque de Agua de Dilución y Lavado se ubica a la cota  $\pm 693$  m.s.n.m. y ha sido diseñado para satisfacer tanto las demandas de la dilución de relaves y arenas, como las de lavado para todo el sistema.

#### **Agua de Dilución**

El sistema de dilución tiene como objetivo principal suministrar el recurso suficiente para lograr la dilución adecuada tanto para la operación de la clasificación como en el transporte de arenas.

Para el caso del proceso de clasificación se requiere disminuir la concentración en peso del relave, desde un  $C_p = 57 \pm 2\%$  a un  $C_p = 38 \pm 2\%$  para luego ser clasificado en los ciclones. La dilución de los relaves requiere de un flujo de  $370 \pm 20$  l/s, los cuales se conducen con una línea gravitacional desde el Estanque Agua de Dilución y Lavado hasta el Estanque de Alimentación Ciclones.

Para el bombeo y conducción de arenas al muro es necesario bajar la concentración del under descargado en la cuba de la batería desde un  $C_p = 75 \pm 2\%$  (dependiendo de las condiciones de dilución en la alimentación) a  $C_p = 70 \pm 2\%$  (dependiendo de las condiciones de operación en el muro). El agua para dilución es aportada desde una la línea matriz de lavado que se inicia en el estanque de dilución y finaliza en la torre de hidrociclones.

#### **Agua de Lavado**

El sistema de lavado tiene como función la limpieza de líneas, cajones y estanques en el caso de alguna detención. El agua proviene desde el Estanque de Agua de Dilución y

Lavado y se efectúa a los siguientes componentes del sistema de clasificación y distribución:

- **Cajón Distribuidor de Relaves a Muro, de Medición y Descripiador:** El lavado de los cajones es eventual y se realiza con una línea de 3" alimentada desde el Estanque Agua de Dilución y Lavado mediante una bomba centrífuga horizontal. Este tiene como objetivo lavar el cajón para realizar inspecciones y mantención cuando el sistema está detenido.
- **Línea de Distribución de Relaves en Directo a Muro:** Cada vez que se saca esta línea de operación se debe efectuar el lavado, descargando agua desde el Estanque de Agua de Dilución y Lavado en las líneas. Dado que los cajones de inicio de las líneas están a una cota superior al estanque de agua, el lavado se inicia a partir del tramo que quede localizado a la altura del estanque en forma gravitacional. El lavado es imprescindible para evitar la consolidación de partículas sedimentadas que puedan provocar embanques al interior de la tubería.
- **Cajón Alimentador Ciclones, Sifón:** Para evitar embanques producidos por la consolidación de partículas sólidas en el interior, es imprescindible el lavado del sifón. El caudal de lavado es similar al de operación y se agrega en el cajón de alimentación a ciclones, mediante la misma línea con que se agrega el agua de dilución.
- **Hidro ciclones:** los hidrociclones y las cubas de descarga de arenas y lamas son lavados utilizando el agua empleada en el lavado del sifón. Adicionalmente, en la torre existen arranques con conexiones para mangueras provenientes de la línea matriz que conduce agua a Clasificación.
- **Sistema de Bombeo de Arenas Principal:** el lavado de este sistema puede ser realizado de dos formas. La primera de ellas es aprovechar el agua de lavado del sifón para llenar con agua al estanque agitador y desde ahí permitir el paso hacia las BDP. Si el sifón no posee agua o el flujo está desviado hacia el embalse, entonces es factible lavar el estanque agitador utilizando la descarga de agua proveniente de la línea matriz de lavado y posteriormente dar paso hacia las BDP. Frente a una detención del sistema, programada o por emergencia, el nivel del estanque agitador es mantenido con agua de lavado alimentada por un grifo de 2", con el fin de evitar la paralización automática de las BDP. Por otro lado, en la eventualidad de que sea necesario parar una bomba en plena operación, el lavado de esta se realiza mediante la adición de agua desde la tubería de 2" conectada con la alimentación de cada BDP.
- **Línea de Conducción de Arenas al Muro:** El agua de lavado de la línea de conducción y las tuberías de distribución de arenas, es abastecida por la línea matriz que conduce agua de lavado a la torre de clasificación. Esta línea, cuyo tramo final es de 10", se conecta en el acumulador de arenas ("Chimbombo") y también, aguas abajo del chimbombo, con la tubería de 9" que alimenta el sector central y poniente del muro. Para lavar la línea de HDPE que alimenta al sector oriente del muro, el agua es abastecida mediante la descarga al estanque de la

bomba centrífuga o a través del chimbombo, para lo cual se deben cerrar todas las otras válvulas existentes en ese sector. También es factible realizar el lavado de ambas líneas aprovechando el agua utilizada en el estanque Agitador, la cual es impulsada por las BDP.

- **Estanque de Lamas, Estanque Muestreador y Estanque Rejilla Protección:** La adición de agua de lavado, que proviene de la línea matriz de 10", es eventual y cumple con el objetivo de permitir la inspección y la mantención de los estanques.
- **Estanque Alimentación Bomba Centrífuga:** Se aplica un caudal similar al de operación y se efectúa con anterioridad a su detención. La alimentación se realiza a través de un grifo que forma parte de la línea matriz de agua de lavado.

### **Agua de Incendio**

El agua para el Sistema de Red de Incendio es proporcionada desde el Estanque de Agua de Dilución y Lavado. El diseño del estanque contempla un nivel mínimo de captación normal que permite mantener como reserva 100 m<sup>3</sup> que aseguran el suministro en caso de incendio. El uso de este volumen está controlado por una válvula de operación remota que conecta el volumen inferior del estanque a la matriz principal que conduce el agua para distintos consumos hacia el Cerro Chivato.

La red húmeda del cerro El Chivato se compone de un arranque desde la línea matriz de agua, la cual alimenta a seis (6) grifos: dos en la plataforma del Edificio Operativo, dos en la base de la Torre de Ciclones, uno frente a las oficinas del operador y uno en la parte posterior de la bodega de repuestos. La presurización de la línea se desarrolla por la diferencia de cotas existentes entre el Estanque Agua de Dilución y Lavado y las plataformas mencionadas y permite asegurar un flujo de 150 litros por minuto con un alcance de 40 m.

## **3.2 Distribución y Depositación de Relaves**

### **3.2.1 Conducción de Relaves a Cola del Depósito**

El Sistema de Distribución de Relaves en cubeta se inicia en el cajón de salida del rápido el Alamo, desde donde el relave se conduce por la canaleta de hormigón de 0,8 m de ancho por 1,0 m de alto, hasta dos cajones de derivación o descarga intermedia (Cajón N°1 y Cajón N°2 respectivamente).

### **3.2.2 Conducción de Relaves a Muro y Depósito**

Desde el cajón de derivación N° 2, el relave es conducido hasta el sector cercano al muro principal por la canaleta de hormigón, ya descrita. Esta canaleta se desarrolla por un trazado con 1,2 % de pendiente y una longitud de 9,6 Km.

Esta conducción termina en el cajón de distribución de relaves al muro ubicado en la cota 730 m.s.n.m.

En el cajón de distribución de relave al muro ubicado en la cota 730 m.s.n.m., se separa el relave para clasificación y el relave a depositar directamente en la cubeta del embalse desde el muro hacia aguas arriba.

En atención a que se debe tener un control cuidadoso de los caudales a transportar por cada línea, para evitar riesgos de embanques, se ha dispuesto, en la cabecera de los sistemas de conducción a muro y a clasificación, un cajón de triple o de medición, de tres compartimientos con vertederos triangulares.

### **3.2.3 Conducción de Relaves a Muro**

Desde el cajón distribuidor salen dos tuberías (de 16" y 20" de diámetro) que descargan, cada una, en una cámara del cajón triple o de medición. Desde estas cámaras salen dos tuberías, una de ellas corresponde a tubería de 560 mm de diámetro de HDPE con una longitud total de 4270 m que en primera instancia llega hasta la cumbre del cerro El Chivato donde la línea descarga en una cámara con salida a la atmósfera, de ahí la tubería baja al muro de arenas por la ladera Poniente del cerro para seguir hasta el extremo opuesto de la presa. A lo largo del muro existen a lo menos 9 puntos de descarga que permiten distribuir el relave hacia la cubeta. La segunda tubería es la que transporta el relave para el sistema de clasificación (Ver Sistema de Clasificación).

Los eventuales reboses en el cajón de distribución, son descargados a una quebrada que los conducirá a la cubeta.

### **3.3 Clasificación de Arenas**

Desde el cajón de alimentación a clasificación, localizado a la cota 680 m.s.n.m., se conducen los relaves ya diluidos a través de una tubería de HDPE de 710 mm de diámetro hasta la cota 658 m.s.n.m. desde el manifold de alimentación a la batería de ciclones. Esta tubería está constituida por un sifón de 1.400 m de largo en cuyo punto bajo a cota 600 m.s.n.m., se dispone de un drenaje de 14" controlado por una válvula pinch, con descarga al embalse.

Aguas arriba del manifold de alimentación a ciclones, se ha previsto una línea de by-pass del sistema de cicloneo. Esta línea descarga sobre el cajón de lamas (overflow).

Un densímetro y un flujómetro permiten controlar el tonelaje y la dilución del relave que va a clasificación, mediante las válvulas pinch de control de tonelaje a clasificación y la válvula de control de agua de dilución

La batería de ciclones está formada por 12 ciclones Krebs D20-L y dos reciclones Vulco. La alimentación de cada ciclón está controlada por una válvula pinch de 6" de diámetro (on off).

Los finos de clasificación son recepcionados por el cajón de overflow de ciclones, el que mediante una tubería de HDPE de 560 mm entrega al cajón de lamas, desde donde se



descarga directamente a la cubeta de relaves. Opcionalmente estas lamas pueden ser conducidas hacia el muro para su descarga hacia la cubeta.

Las arenas de clasificación son recepcionadas por el cajón de underflow de ciclones, y desde allí son conducidas por una tubería de acero de 8" de diámetro hasta un cajón de arenas que tiene un cortador automático de muestras de una etapa. La descarga de este cajón se efectúa por una tubería de 8" de diámetro hasta el estanque agitador de arenas, en la plataforma de la planta de ciclones y bombas de arenas a cota 650 m.s.n.m.

### **3.4 Distribución de Arenas**

#### **3.4.1 Bombeo de arenas**

El estanque de agitación de arenas de 28 m<sup>3</sup> de capacidad está construido en acero y tiene un agitador de 30 HP de potencia instalada.

Este estanque alimenta el sistema de bombeo de arenas. El sistema principal está compuesto por 3 bombas de desplazamiento positivo (BDP), marca Wirth, de Potencia Nominal Motor 200 HP.

Existe un sistema secundario de bombeo para la distribución de arenas, constituido por una bomba centrífuga tipo Warman de Potencia operacional 42,2 HP Máxima 141,1 HP Potencia Nominal Motor 175 HP, conectada a una tubería de HDPE que distribuye las arenas en el tramo más cercano del muro (1000 m aprox.).

Las BDP están instaladas en paralelo y tienen cada una de ellas una succión independiente de 8", desde el estanque de agitación. Cada bomba tiene una descarga de 6" de diámetro conectada a una tubería única de 9" de diámetro que efectúa la distribución de arenas en el muro.

Las líneas de descarga de cada bomba tienen un arranque en tubería de 4" controlado por válvula pinch para recirculación al estanque, y otro arranque también de 4", con un disco de ruptura para seguridad (control de presión) del sistema, también con descarga al estanque de arenas.

La bomba centrífuga constituye además la alternativa de reemplazo del funcionamiento de las 3 BDP. Tiene una succión de tubería de acero de 8" y una descarga de 6" que la conecta directamente con la tubería de distribución de arenas en el muro. Esta bomba tiene una línea de agua de sello conectada directamente a la red de agua de lavado de tubería de arenas.

#### **3.4.2 Distribución de arenas en el muro**

Las arenas producidas en la etapa de clasificación son bombeadas por las BDP a través de una tubería de acero (línea matriz) de 9" de diámetro de largo inicial 3.000 m y/o la bomba centrífuga conectada a una tubería de HDPE de 10" que distribuye las arenas en el tramo más cercano del muro (1000 m aprox.).

A lo largo de estas tuberías o línea matriz existen 14 peinetas para distribuir la arena por sectores. Estas peinetas son tuberías de 6" de diámetro, de 200 m de largo y con perforación cada 4 m.

La descarga por sectores estará controlada por 2 válvulas pinch por cada peineta, una de 8" y otra de 6". Posteriormente a medida que crece la longitud del muro se deberán agregar peinetas adicionales.

La tubería de acero de 9", la tubería de HDPE de 10" y las peinetas de 6" van soportadas en una estructura de madera de 4 m de alto.

Adicionalmente la línea matriz cuenta con otros 14 arranques sin peinetas, los que permiten distribuir relave en forma controlada hacia el interior de la cubeta. Estos arranques corresponden a mangueras flexibles de 6" de diámetro con una válvula "pinch" de accionamiento manual ubicada en su punto inicial.

El sistema de distribución se va levantando periódicamente, a medida que el muro aumenta de altura. A Abril de 2003 se han efectuado tres peraltes del coronamiento del muro con todo el sistema de distribución incluido y el muro de arenas ha crecido 13 metros en cota desde el muro de partida.

El sistema cuenta con agua de lavado para la tubería de arenas mediante una línea gravitacional desde el estanque de agua de dilución ubicado en la ladera oriente de la cuenca.

### **3.4.3 Construcción de Muro y Operación de Drenes**

El muro principal o muro Oeste forma la presa que une la ladera Oriente del Cerro El Chivato con la ladera Poniente de la cuenca del embalse Ovejería tiene un muro de partida construido con material de empréstito, con una longitud de 2.850 m en dirección oriente-poniente, con una cota de coronamiento de 596,9 m.s.n.m., y altura 16 m.

Sobre este y a partir del año 2000 se inició la construcción del muro mediante la depositación de arena en forma hidráulica por el método de aguas abajo sobre el muro de partida.

En Abril de 2003 el muro de arenas presenta una cota de coronamiento de 609,6 m.s.n.m. con un coronamiento de 10 m de ancho, y taludes que presentan inclinación media de 4:1 (H:V) por el lado de aguas abajo, y 2:1 por aguas arriba.

El muro Este que une la ladera Poniente del Cerro El Chivato con la ladera Oriente de la cuenca del embalse Ovejería, tendrá una longitud aproximada a los 400 m, y de igual geometría en su sección transversal que el muro principal. Este muro entra en funcionamiento a partir del año 2004, para ello División Andina construyó el muro de partida con sus fundaciones, sistema de drenaje e instrumentación geotécnica asociada.

El dren basal es del tipo de "dedos", y está formado por una red de zanjias recolectoras y conductoras, revestidas con geotextiles y rellenas con bolones. Todo el sistema está

cubierto con una carpeta de material filtrante que impide el arrastre de finos, y un material de transición entre el filtro y los drenes.

Los dedos descargan en drenes longitudinales, paralelos al eje del muro, y estos a su vez en drenes emisarios, distanciados alrededor de 400 m entre sí. Los drenes emisarios descargan en cámaras que son vaciadas por tuberías de 355 mm, que conducen el agua a dos sentinas, para posteriormente ser impulsadas de vuelta al depósito.

Al mes de Abril de 2003 se encuentra construido el sistema de drenajes que corresponde a un crecimiento hasta la cota de muro 620 msnm formado por 3 drenes colectores longitudinales al muro.

## 4 MODELO DEL BALANCE HÍDRICO DEL TRANQUE

### 4.1 Descripción del Modelo

En base a lo expuesto en los capítulos anteriores, se realizó la idealización del sistema, presentándose el esquema conceptual de los flujos de agua en la Figura 4.1 y el esquema conceptual de los flujos de sólidos en la Figura 4.2.

El modelo consiste en un modelo principal en el que se realizan el grueso de los cálculos, en especial los relacionados con el balance en la laguna de aguas claras. Además algunos modelos auxiliares y funciones cuyos resultados constituyen datos de entrada para el modelo principal. Los modelos auxiliares y funciones representan fenómenos que por su complejidad y sus particularidades resulta conveniente tratarlos de manera separada.

#### 4.1.1 Modelo Principal

El modelo principal contempla como elementos con capacidad de almacenamiento de agua a las arenas depositadas en el muro, a las lamas depositadas en la cubeta y a la laguna de aguas claras. Además se realiza balance hídrico en elementos sin capacidad de almacenamiento, que son: El cajón distribuidor, donde se diluyen los relaves para que ingresen con una concentración de sólidos óptima a la batería de ciclones; La batería de ciclones, donde se separan las arenas que se depositarán en el muro de las lamas a depositarse en la cubeta; y el canal de contorno. La escala temporal del modelo es mensual.

Como elementos con capacidad de almacenamiento de sólidos contempla al muro de arenas y el depósito de lamas, realizándose además balance de masas de sólidos en el cajón distribuidor y en la batería de ciclones. El algoritmo de resolución del modelo se presenta en el diagrama de flujo de la Figura 4.3.

El desarrollo completo del modelo principal se presenta en el Anexo 10 del archivo magnético adjunto.

##### 4.1.1.1 Flujos Considerados

El modelo considera los siguientes flujos de agua:

- VATR : Volumen de agua utilizada en el transporte de relaves.
- VARD : Volumen de agua del rebose de la dilución.
- VAD : Volumen de agua para dilución.
- VASEP : Volumen de agua para separación de sólidos.
- VAL : Volumen de agua que ingresa al depósito en las lamas.

- VAAM : Volumen de agua con que se aportan las arenas al muro.
- VRS : Volumen de agua retornada desde las sentinas.
- VAPM : Volumen de agua de pérdidas en el muro.
- VALL : Volumen de agua liberada por las lamas depositadas.
- EL : Evaporación desde la superficie de las lamas expuestas.
- VPINC : Volumen de agua por precipitación incidente.
- ELAC : Evaporación desde la superficie de la laguna de aguas claras.
- VILAC : Volumen de infiltraciones desde la laguna de aguas claras.
- VDESC : Volumen de descarga de grandes crecidas por la torre de evacuación.
- VRECCC : Volumen de agua recuperada desde la laguna de aguas claras hacia el canal de contorno.
- ENCCC : Escorrentía no captada por el canal de contorno.
- EAACC : Escorrentía generada aguas abajo del canal de contorno.
- VICC : Volumen de infiltraciones desde el canal de contorno.
- EAFCC : Escorrentía afluente al canal de contorno.
- VET : Volumen de evacuación de tormentas intensas desde el canal de contorno.
- VDR : Volumen por descarte en riego.

Como flujos de sólidos considera:

- MSR : Masa de sólidos transportados al tranque.
- MSRD : Masa de los sólidos del rebose de la dilución en el cajón distribuidor.

- MSSEP : Masa de sólidos a separación en la batería de ciclones.
- MSL : Masa de las lamas del overflow de la batería de ciclones.
- MSAM : Masa se los sólidos o arenas aportadas al muro.

Figura 4.1 Esquema Conceptual del Modelo – Flujos de Agua

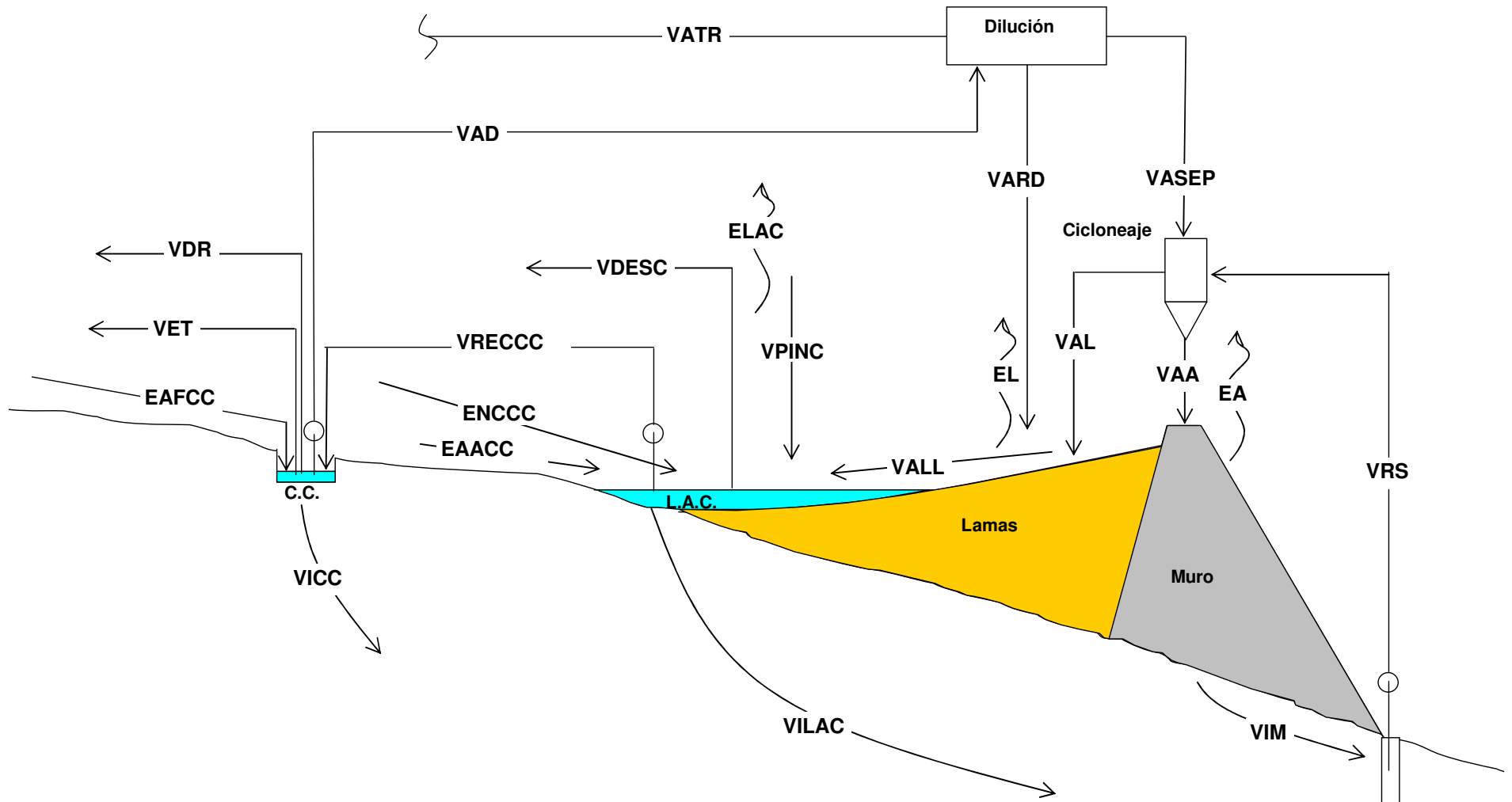
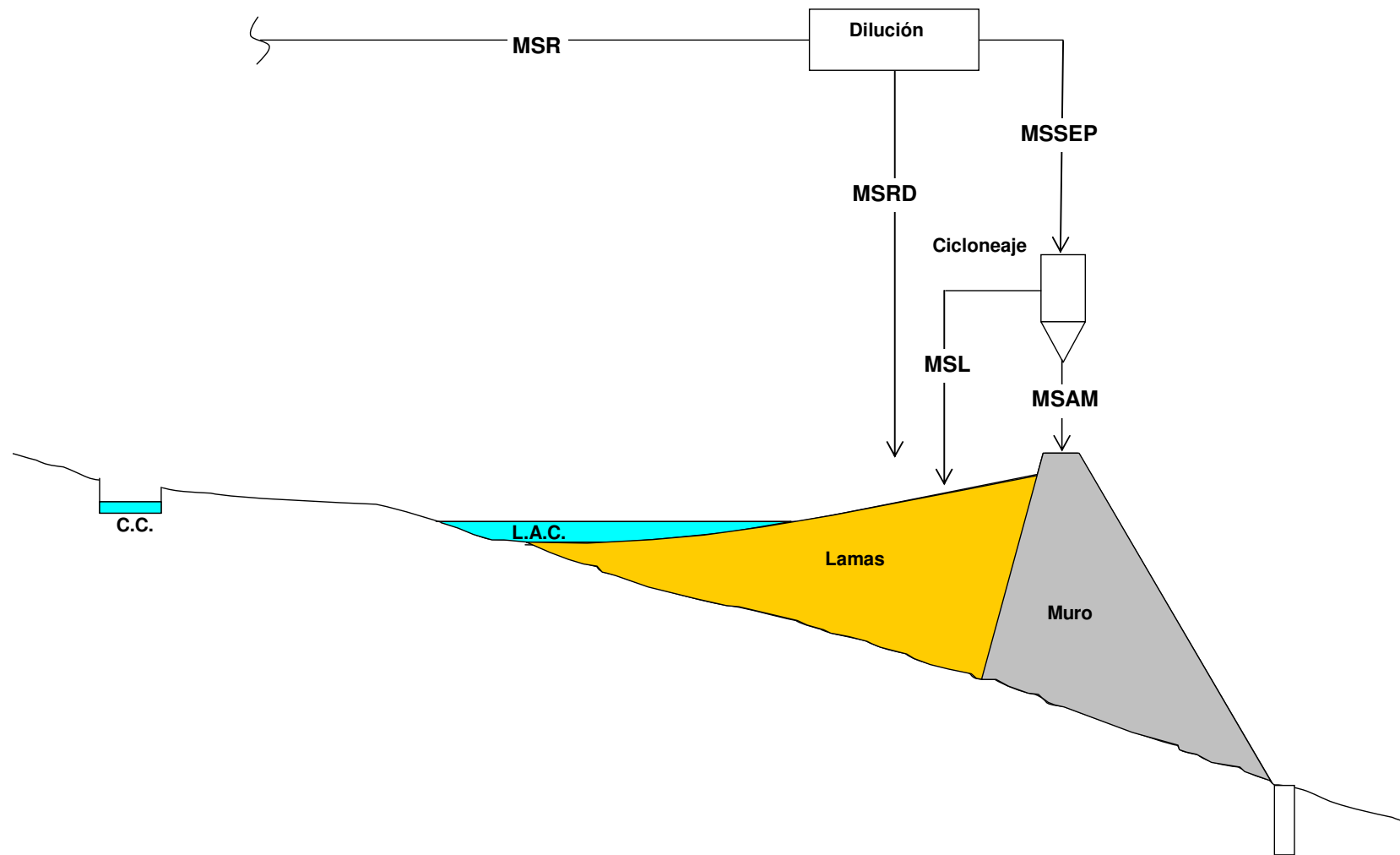


Figura 4.2 Esquema Conceptual del Modelo – Flujos de Sólidos





### Figura 4.3 Diagrama de Flujo Implementado

#### **4.1.2 Síntesis de Caudales**

Al no existir mediciones de los caudales naturales afluentes tanto al canal de contorno como a la cubeta, éstos deben ser estimados. La estimación se realiza utilizando el modelo pluvial MPL.

El modelo pluvial MPL fue desarrollado por el ingeniero Pablo Isense y permite estimar los caudales medios mensuales que se generan en una cuenca pluvial, en base a información meteorológica, de precipitaciones y evaporación, y a algunos parámetros que determinan los procesos que ocurren con el agua en la cuenca. Este modelo simula el ciclo de escorrentía de una cuenca pluvial aplicando la ecuación de continuidad o balance hidrológico sobre un elemento de área o volumen de control de la cuenca.

El modelo se ha utilizado en diversos estudios a lo largo del país, y en el caso particular de la cuenca del Río Maipo se ha utilizado para sintetizar la escorrentía superficial de las cuencas no controladas para alimentar los modelos MOS-MAIPO y MAGIC-MAIPO, que constituyen la principal herramienta de evaluación de los recursos hídrico superficiales de la cuenca con que cuenta la DGA.

##### **4.1.2.1 Descripción del Modelo Pluvial MPL**

La descripción del modelo MPL ha sido expuesta en diversos estudios donde se ha utilizado. En este trabajo se han utilizado como base descripciones anteriores, que han sido reordenadas y modificadas con el objetivo de que ésta resulte más clara y comprensible. Además, se han incorporado ciertos elementos al algoritmo que permiten verificar la consistencia del balance hídrico que se realiza, al verificarse el cumplimiento de la ecuación de continuidad. También se han corregido algunos errores que se encontraron en las descripciones base. Todo lo anterior se ha hecho sin realizar modificación conceptual alguna al modelo. La descripción detallada del modelo implementado se presenta en el Anexo 11 del archivo magnético adjunto.

##### **Base conceptual**

El modelo considera que existen dos elementos de embalse:

- Un volumen de almacenamiento cercano a la superficie del suelo, cuya magnitud representa la capacidad media de retención de agua en la cuenca y desde el cual se extrae agua para satisfacer la demanda de evapotranspiración. La cantidad de agua almacenada en esta capa representa la humedad del suelo y se ha expresado como lámina de agua.
- Otro volumen, subterráneo, que retiene el agua que percola y que al vaciarse en forma lenta contribuye al escurrimiento subsuperficial y subterráneo, y que es el que produce la escorrentía en los periodos de estiaje.

Los cálculos se realizan para un área unitaria, amplificándose posteriormente los resultados por el área de la cuenca. Temporalmente la discretización que se realiza es a escala diaria, agregándose los valores diarios de los resultados para obtener los volúmenes mensuales.

#### **4.1.2.2 Calibración**

##### **Datos Utilizados**

El modelo MPL se calibró, utilizando los datos de caudales medios mensuales, precipitaciones mensuales y evaporaciones de bandeja mensuales promedio de la cuenca del embalse Lliu Lliu, obtenidos de la memoria del Ingeniero Ernesto Brown F. "Simulación Matemática del Régimen de Escorrentía en una Cuenca Pluvial". Universidad de Chile, diciembre de 1968.

La cuenca experimental Lliu Lliu fue controlada hidrometeorológicamente por la División Hidrología de ENDESA, como parte de sus investigaciones de evaporación desde embalses, desde febrero de 1962 hasta diciembre de 1967 y, desde enero de 1968 en adelante, por la sección Hidrología y Riego del Depto. de Obras Civiles de la universidad de Chile.

La cuenca total hasta el embalse Lliu Lliu tiene una superficie de 48,4 km<sup>2</sup> y se divide en dos subcuencas que desaguan en forma separada en el embalse y que se denominan subcuenca O u oriente y subcuenca P o poniente, de 25,98 y 21,2 km<sup>2</sup>, respectivamente. La superficie restante de 1,2 km<sup>2</sup> corresponde al área del embalse y zona adyacente.

Para la medición de las variables hidrometeorológicas en la cuenca, ENDESA instaló 8 pluviómetros y 2 pluviógrafos, tres estaciones evaporimétricas y una estación meteorológica principal en el entorno del embalse y dos controles fluiométricos, uno en cada subcuenca.

Cinco pluviómetros y un pluviógrafo se distribuyeron por la cuenca a diferentes alturas. Los otros tres pluviómetros y el segundo pluviógrafo se instalaron en las estaciones evaporimétricas que rodean el embalse.

En la estación principal se instalaron evaporígrafos y evaporímetros de diferente tipo, además de termohigrógrafo, anemógrafo, actinógrafo y otros. En las demás estaciones se instalaron sólo evaporímetros. Cada estación contó con evaporímetro tipo Weather Bureau, Clase A.

Para la medición de los caudales se instalaron limnógrafos y limnímetros en cada una de las dos subcuencas O y P.

A continuación se resumen las conclusiones de E. Brown F. respecto a los datos recopilados.

El análisis de los datos obtenidos indicó que uno de los pluviógrafos no funcionó correctamente desde 1963 en adelante. Además, fue necesario tomar, como precipitación media en la cuenca, el promedio aritmético de todas las lecturas, ya que, por un problema del operador, fue imposible identificar a qué instrumento correspondían las lecturas. Se contó con datos de precipitación desde febrero de 1962 hasta marzo de 1967.

Para los datos de evaporación se trabajó con las medidas de los evaporímetros de bandeja clase A porque había cuatro instrumentos y son los más difundidos. Se adoptó el promedio de las cuatro lecturas. Se contó con datos desde febrero de 1962 hasta marzo de 1967.

Para los datos de caudales fue necesario descartar las mediciones de la subcuenca P y usar solamente los de la cuenca O. Ello se debió a que el vertedero P sufrió continuas fallas, se destruyó durante las crecidas de 1963 y 1965, y además, pudo detectarse que gran parte del agua escurría por debajo del canal de acceso al vertedero, situación que no se dio en la subcuenca O.

En la subcuenca O no existen mediciones en los meses de agosto, septiembre y octubre de 1965 ya que una crecida destruyó el vertedero. Durante las crecidas de 1963 el caudal sobrepasó los bordes de la canalización en varias ocasiones, de manera que los valores son estimativos y sujetos a mayores errores.

En consecuencia en el presente estudio se trabajó con el periodo estadístico de 5 años que corresponde a los años hidrológicos 1962-63 a 1966-67. En la Tabla 4.1, en la Tabla 4.2 y en la Tabla 4.3 respectivamente, se presentan los datos de caudales, precipitaciones y evaporación utilizados para calibrar el modelo.

**Tabla 4.1 Caudal Medio Mensual Medido (m<sup>3</sup>/s). Estación Experimental Lliu Lliu. Área Cuenca = 25,98 km<sup>2</sup> Estadística Memoria Ing. Ernesto Brown**

Año Hidr.	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	Anual
1962/63	0,009	0,292	0,273	0,086	0,048	0,039	0,021	0,011	0,005	0,004	0,003	0,003	0,066
1963/64	0,013	0,019	0,799	1,162	0,921	0,404	0,154	0,083	0,051	0,028	0,025	0,026	0,307
1964/65	0,023	0,034	0,066	0,193	0,162	0,052	0,026	0,018	0,008	0,005	0,006	0,020	0,051
1965/66	0,031	0,026	0,375	2,100	0,900	0,450	0,090	0,050	0,029	0,020	0,018	0,026	0,343
1966/67	0,026	0,401	1,521	0,355	0,241	0,143	0,094	0,055	0,029	0,022	0,018	0,018	0,243
prom	0,020	0,155	0,607	0,779	0,454	0,217	0,077	0,043	0,024	0,016	0,014	0,018	0,202

**Tabla 4.2 Precipitación Mensual (mm). Estación Experimental Lliu Lliu.  
Estadística Memoria Ing. Ernesto Brown**

Año Hidr.	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	Anual
1962/63	6,8	307,1	25,0	21,9	21,7	27,5	0,0	0,0	0,0	0,0	2,9	0,7	413,6
1963/64	81,9	68,6	320,0	290,3	116,2	0,5	15,7	0,5	0,0	0,0	0,0	15,4	909,1
1964/65	0,0	91,5	96,8	152,4	0,8	3,7	0,0	8,3	0,0	0,0	0,0	39,6	393,1
1965/66	80,6	24,1	271,3	345,9	3,2	28,2	7,0	1,8	0,0	0,0	0,7	81,5	844,3
1966/67	10,5	314,4	190,1	50,8	7,9	4,8	10,7	23,6	0	0	0	5,8	618,6
prom	36,0	161,1	180,6	172,3	30,0	12,9	6,7	6,8	0,0	0,0	0,7	28,6	635,7

**Tabla 4.3 Evaporación Mensual (mm). Estación Experimental Lliu Lliu.  
Estadística Memoria Ing. Ernesto Brown**

Año Hidr.	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	Anual
1962/63	43,4	28,6	24,3	37,8	70,8	92,4	155,8	204,4	228,6	164,4	160,2	99,5	1.310,2
1963/64	48,6	18,0	19,1	27,4	50,5	88,7	140,5	194,7	190,2	163,3	130,6	69,4	1.141,0
1964/65	46,9	26,1	21,4	35,8	72,1	108,0	170,1	173,4	226,8	220,1	161,8	74,9	1.337,4
1965/66	34,9	21,1	18,3	34,7	70,5	99,1	140,1	219,0	217,0	158,4	139,3	62,5	1.214,9
1966/67	37,6	12,7	20,3	36,0	57,7	131,0	163,8	202,3	217,0	158,4	139,3	62,5	1.238,6
prom	64,3	103,8	154,1	198,8	215,9	172,9	146,2	73,8	42,3	21,3	20,7	34,3	1.248,4

### **Función Objetivo**

Para evaluar la bondad del ajuste logrado en la calibración del modelo MPL, se definen cuatro errores típicamente utilizados para estos fines:

- El error absoluto medio:

$$EAM = \frac{1}{N} \times \sum_{i=1}^N |Q_i^s - Q_i^o|$$

- El error absoluto normalizado promedio:

$$EANM = 100 \times \frac{1}{N} \times \sum_{i=1}^N \frac{|Q_i^s - Q_i^o|}{Q_i^o}$$

- El error cuadrático medio:

$$ECM = \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{(Q_i^s - Q_i^o)^2}{N}}$$

- El error porcentual del volumen:

$$EPV = 100 \times \frac{\sum_{i=1}^N (Q_i^s - Q_i^o)}{\sum_{i=1}^N Q_i^o}$$

Donde:

- $Q_i^s$  : Caudal simulado en el mes  $i$  [ $m^3/s$ ].
- $Q_i^o$  : Caudal observado en el mes  $i$  [ $m^3/s$ ].
- $N$  : Número de meses de la calibración.

De los cuatro errores recién definidos, es de especial interés para los efectos del presente estudio el error porcentual del volumen y, por lo tanto, este error constituye la función objetivo de la calibración. El error porcentual del volumen compara el volumen total observado con el volumen total sintetizado en términos porcentuales, por lo que al utilizarlo como función objetivo se busca una consistencia en la síntesis de caudales en términos generales.

También se pone una atención particular en el error absoluto normalizado medio, que representa el porcentaje promedio que es la diferencia entre los valores absolutos de los caudales sintetizados y observados de los caudales observados, por lo que bajos valores implican que en promedio, los caudales sintetizados se parecen a los observados. Este error no distingue entre caudales sintetizados mayores y menores que el observado y tiende a subestimar la importancia de las diferencias en los caudales grandes, debido a que se normalizan las diferencias.

El error absoluto medio resulta, para el presente trabajo, menos interesante que el anterior porque, aunque también se fija en las diferencias absolutas y por ello es una medida de cuán cercanos son los caudales sintetizados a los observados, no relativiza la importancia de las diferencias en los caudales grandes, que siempre tiende a ser mayores.

El error cuadrático medio se utiliza en general cuando lo que interesa es tener la mejor aproximación posible a los caudales peak, debido a que éste tiende a exagerar la importancia de ellos. No es de especial interés para este estudio priorizar el ajuste a los caudales peak.

Sin perjuicio de lo anterior, se busca también que la calibración resultante tenga errores pequeños para los cuatro errores que se definieron.

### **Parámetros Seleccionados y Resultados**

La calibración se realizó tomando como base las calibraciones realizadas en los estudios de los modelos MOS-MAIPO<sup>1</sup> y MAGIC-MAIPO<sup>2</sup>. En ambas se hizo variar el parámetro A desde 1,00 hasta 0,911 con el fin de lograr una mejor aproximación a la lluvia promedio de la cuenca. Según los datos pluviométricos, el promedio anual de lluvias en la cuenca Lliu Lliu es de 635,7 mm en el periodo 1962-63 a 1966-67, de modo que aplicando el coeficiente A = 0,911 la lluvia promedio en dicho periodo es de 579 mm, lo que es más consistente con el mapa de isoyetas. Para el coeficiente B se mantuvo la cifra de 0,85 de la memoria de E. Brown F.

En la Tabla 4.4 se presentan los parámetros resultantes de las calibraciones base y la elaborada en el presente trabajo. En la Tabla 4.5 se presentan los errores de las mismas calibraciones.

La presente calibración se realizó modificando los parámetros de la calibración del modelo MAGIC-MAIPO pues, como se observa en la Tabla 4.5, ésta posee menores errores que la del modelo MOS-MAIPO, de tal forma de minimizar la función objetivo definida en el punto anterior. Es importante mencionar que se modificó como si fuese un parámetro del modelo y no un dato de entrada, el número de días del mes DIASMES. Se tomó esa decisión considerando que el principal factor que controla el caudal que se genera en la cuenca, es la precipitación. El dato de precipitación que se ingresa al modelo es a escala de tiempo mensual y el modelo lo distribuye en partes iguales de acuerdo a la cantidad de días del mes. Como se sabe, en la realidad la precipitación no se distribuye uniformemente en un mes, hay días con lluvia y días sin lluvia, con lo que el número de días del mes para el modelo MPL no tiene la característica de representar una situación de manera exacta y se puede modificar su valor en función de obtener una mejor representación de los caudales.

Como se observa en la Tabla 4.5, la calibración lograda cumple con todos los objetivos planteados anteriormente y se obtiene un error porcentual del volumen y un error absoluto normalizado medio considerablemente más pequeños que los de las calibraciones base.

En la Figura 4.4 se muestra el gráfico con los caudales observados y sintetizados, donde se puede observar la adecuada calibración realizada. En la Figura 4.5 se muestra un gráfico con los caudales observados en el eje de las abscisas y los caudales sintetizados en el eje de las ordenadas, comparando los puntos con la recta donde los caudales sintetizados son iguales a los observados. En él se puede observar que los puntos se encuentran cercanos a la recta, sobre todo para los caudales más pequeños.

---

<sup>1</sup> Modelo de simulación hidrológico operacional cuencas de los ríos Maipo y Mapocho.

<sup>2</sup> Bases para la Formulación de un Plan Director para la Gestión de los Recursos Hídricos. Cuenca del Río Maipo.

Es natural que en los modelos se produzcan las mayores diferencias para los caudales más grandes si se calibran con los criterios utilizados en este trabajo (ver punto 0).

**Tabla 4.4 Parámetros de las Calibraciones**

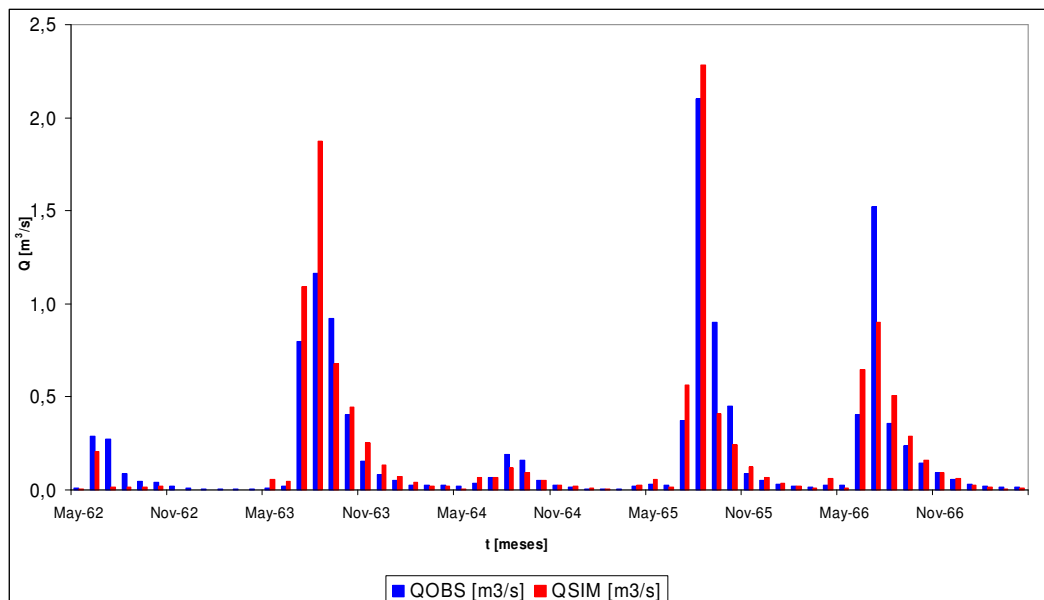
Parámetros	CALIBRACIÓN		
	MOS-MAIPO	MAGIC-MAIPO	PROPIA
A [°/1]	0.911	0.911	0.911
B [°/1]	0.850	0.850	0.850
$\alpha$ [mm/día]	62.000	170.634	170.000
K [días]	38.000	38.000	38.000
FC [mm/día]	6.000	6.000	5.000
PMIN [°/1]	0.090	0.090	0.074
SCC [°/1]	0.974	0.958	0.958
SMIN [°/1]	0.230	0.307	0.307
SCRIT [°/1]	0.805	0.415	0.415
HMAX [mm]	295.0	295.0	295.1
SI [°/1]	0.010	0.010	0.100
EZI [m <sup>3</sup> /día]	0.001	0.001	0.000
DIASMES [días/mes]	30	30	23

**Tabla 4.5 Errores de las Calibraciones**

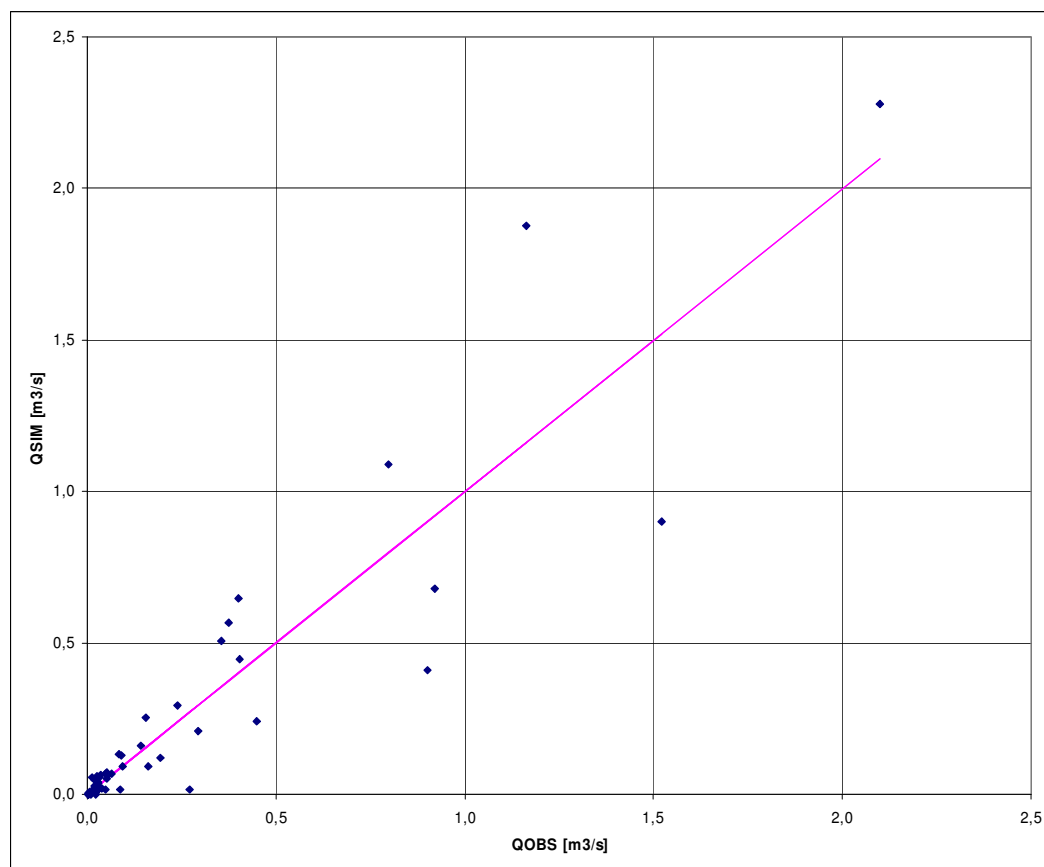
Error	CALIBRACIÓN		
	MOS-MAIPO	MAGIC-MAIPO	PROPIA
EANM [%]	59.87	59.64	51.74
EAM [m <sup>3</sup> /s]	0.066	0.064	0.077
ECM [m <sup>3</sup> /s]	0.140	0.138	0.163
EPV [%]	4.4074	1.2137	0.0097



**Figura 4.4 Caudales Observados y Caudales Sintetizados – Modelo MPL**



**Figura 4.5 Caudales Sintetizados Versus Caudales Observados – Modelo MPL**



### 4.1.2.3 Verificación

Se verificaron diversos aspectos del funcionamiento del modelo MPL implementado.

Por un lado, se verificó que las variaciones en los parámetros produjeran las variaciones esperadas en los resultados, resultando correcto este aspecto.

Por otro lado, se verificó el cumplimiento de la ecuación de continuidad en el sistema. El flujo de entrada está dado por la precipitación que cae sobre la cuenca. Los flujos de salida los constituyen la evaporación y la percolación profunda. Las diferencias de almacenamiento se dan en el suelo y en el acuífero. Según lo anterior, se verificó el cumplimiento de la siguiente ecuación, para el período total de la calibración.

$$(PMES - ETMES - ESCMES) \times AREA \times 10^3 - VVZNSAT - VVESUB = 0$$

En todo el periodo de la calibración, se tiene que:

$$(PMES - ETMES - ESCMES) \times AREA \times 10^3 - VVZNSAT - VVESUB = -6,1 [m^3]$$

Lo que indica que en la operación del modelo “se pierden” poco más de 6 m<sup>3</sup>. Considerando que la cantidad de agua que ingresa al sistema como precipitación en el mismo período es de 75.232.771,9 m<sup>3</sup>, se considera que la cantidad de agua que “se pierde” (porque ingresa pero no sale ni se almacena) es absolutamente despreciable. La diferencia encontrada se explica debido a que la saturación del suelo S [%] no puede ser mayor que 1 y cuando en la iteración que se realiza el resultado es mayor que 1, sencillamente se le asigna ese valor.

Según lo anterior, se considera que el funcionamiento del modelo MPL implementado es satisfactorio.

### 4.1.3 Función Superficie de Lamas Expuestas

Tomado en cuenta los datos obtenidos de los informes de las batimetrías que se presentan en el anexo correspondiente se encontró, para estimar la superficie de las lamas expuestas, una función lineal dependiente del volumen total de lamas depositadas y de la superficie de la laguna de aguas claras.

La función propuesta tiene la siguiente forma:

$$SLE_t = a \times VTL_t + b \times SLAC_t + c$$

El ajuste propuesto considera los siguientes valores de los coeficientes a, b y c.

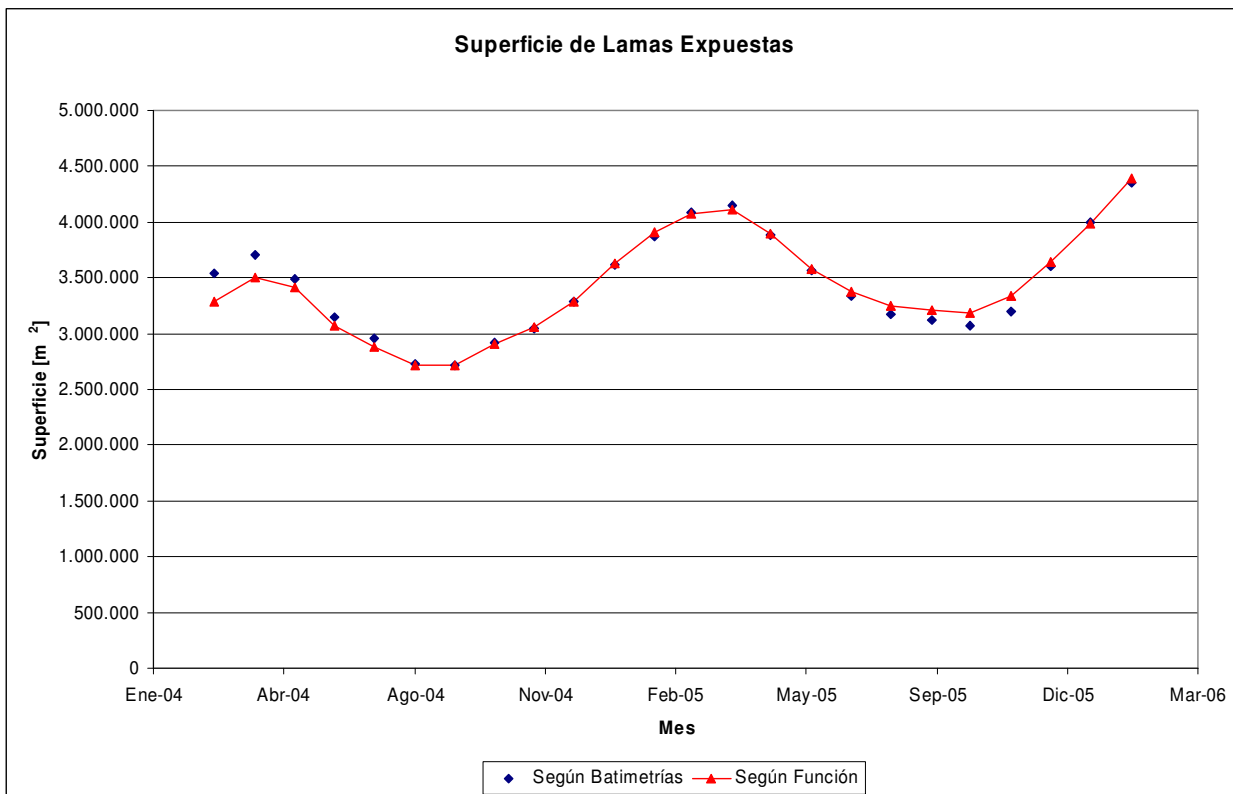
$$a = 0,04 ,$$

$$b = -0,9 \text{ y}$$

$$c = 2.643.000$$

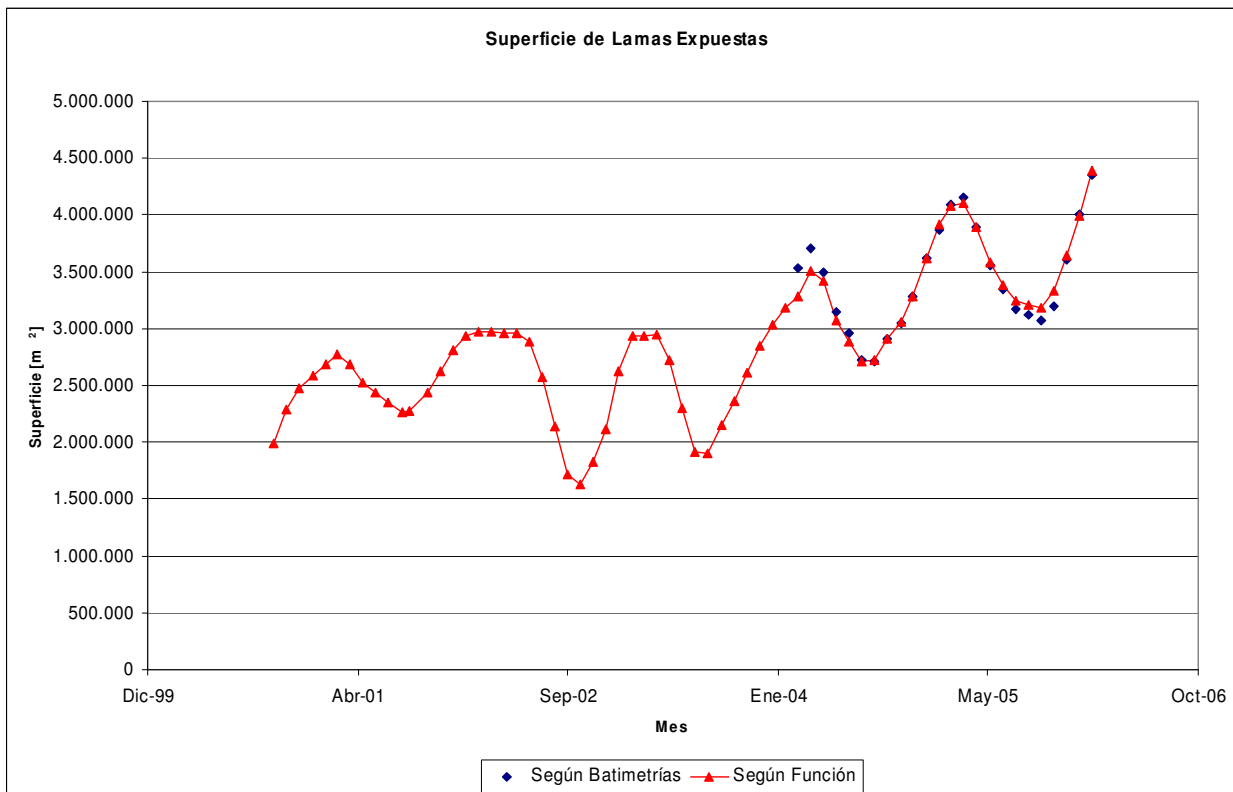
El ajuste se realizó para el período comprendido entre los meses de marzo de 2004 y febrero de 2006, que es donde existía información, mostrándose gráficamente dicho ajuste en la Figura 4.6.

**Figura 4.6 Ajuste de la Función Superficie de Lamas Expuestas**



En la Figura 4.7 se presenta el ajuste de la función extrapolado, desde el mes de octubre de 2.000, primer mes en que se cuenta con datos de las batimetrías para calcular la función con datos reales.

**Figura 4.7 Ajuste de la Función Superficie de Lamas Expuestas Extrapolado**



#### 4.1.4 Función Superficie de Laguna de Aguas Claras

Para estimar la superficie de la laguna de aguas claras se propuso una función lineal que depende del volumen de agua acumulado en la alguna de aguas claras y del volumen total de lamas depositadas. La función propuesta tiene la siguiente forma:

$$SLAC_t = a \times VLAC_t + b \times VTL_t + c$$

El ajuste realizado considera los siguientes valores de los coeficientes a, b y c.

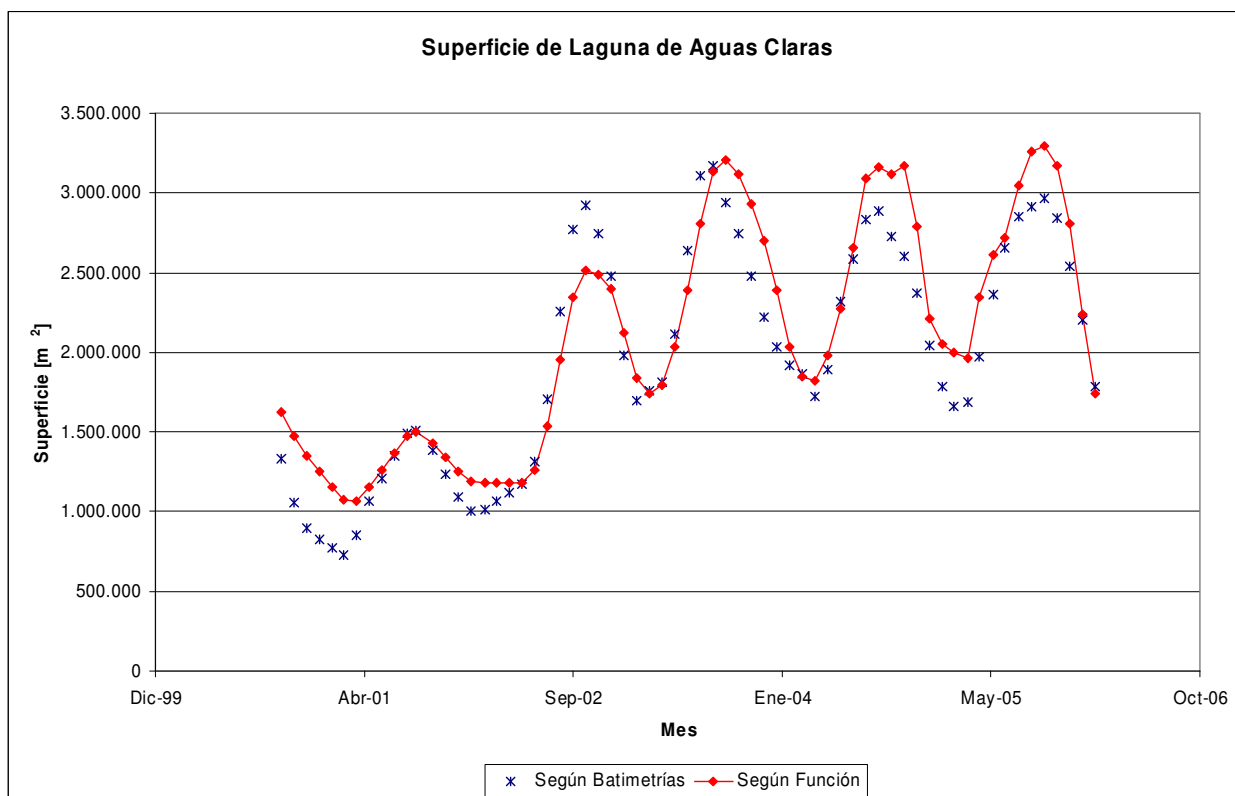
$$a = 0,35,$$

$$b = -0,01 \text{ y}$$

$$c = 1.200.000$$

El ajuste conseguido se muestra gráficamente en la Figura 4.8 para el período entre septiembre de 2.001 y diciembre de 2.005.

**Figura 4.8 Ajuste de la Función Superficie de Laguna de Aguas Claras**



#### 4.1.5 Función Volumen de Infiltración desde Laguna de Aguas Claras

Para estimar el volumen de agua que se infiltra desde la laguna de aguas claras, se tomó como referencia los valores obtenidos por el modelo subterráneo desarrollado por la consultora INGEDOS. Se construyó una función lineal dependiente del volumen de agua almacenado en la laguna de aguas claras y se ajustó a los valores de referencia.

La función propuesta tiene la siguiente forma:

$$VILAC_t = a \times \left( \frac{VLAC_t + VLAC_{t-1}}{2} \right) + b$$

El ajuste realizado considera los siguientes valores para los coeficientes a y b:

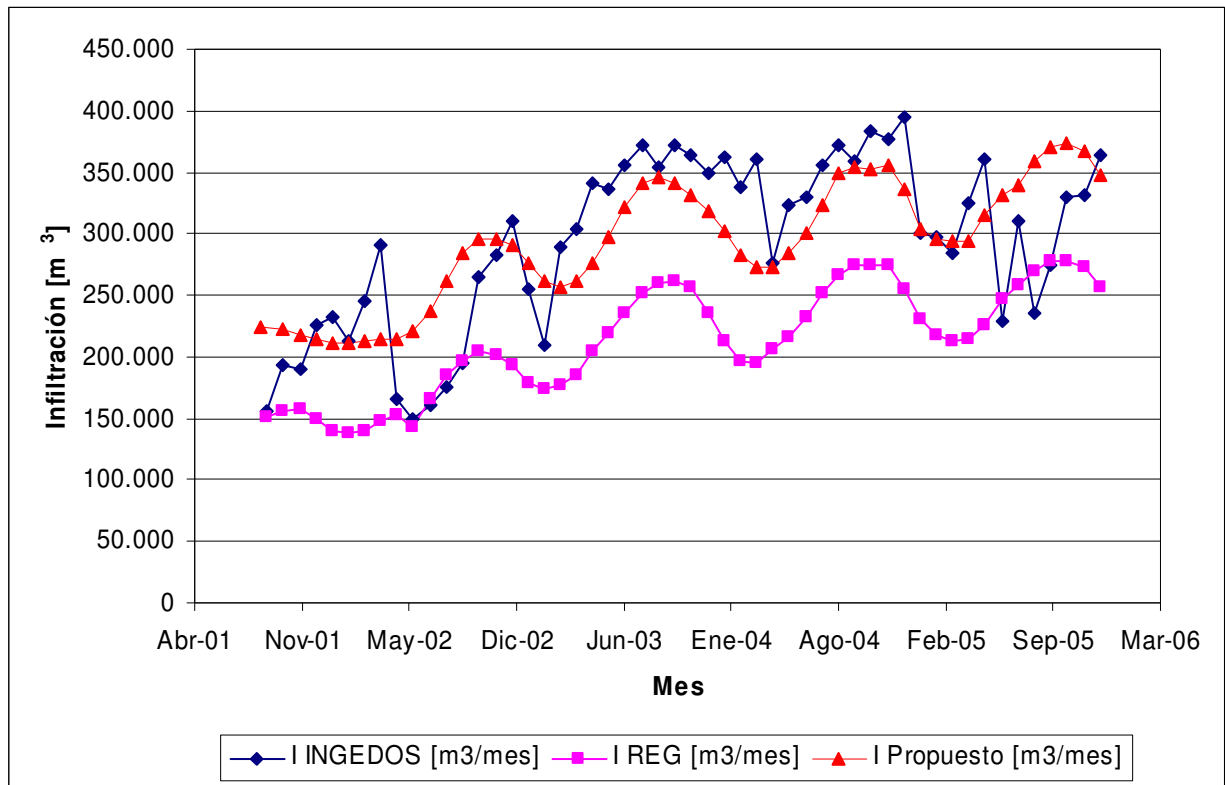
$$a = 0,0198 \text{ y}$$

$$b = 186.708$$

En la Figura 4.9 se presentan gráficamente los valores obtenidos por el modelo de INGEDOS, por la función propuesta y por la función utilizada por el balance superficial de REG. La consultora REG, para el balance superficial que realizó, utilizó una función

dependiente del volumen de aguas claras almacenadas y del gradiente de profundidad de agua en la poza.

**Figura 4.9 Ajuste de la Función Volumen de Infiltración desde LAC**



#### 4.1.6 Función Volumen de Evacuación de Tormentas

Debido a la que no fue posible conseguir registros históricos de este procedimiento de operación, en que la escorrentía afluente al canal de contorno se conduce hacia el embalse Huechún, se construyó una función que depende de la escorrentía afluente al canal de contorno en cada mes.

Según los relatos del personal que ha participado en la operación del tranque desde su inicio, se trata de un procedimiento que se ha realizado muy pocas veces, en unas cuatro o cinco ocasiones durante los meses de lluvias más intensas.

De acuerdo a lo anterior, es que se construyó fórmula que se presenta en la ecuación (1).

$$VET_t = \begin{cases} si & EAFCC_t < 500.000 \text{ m}^3 & 0 \\ si & 500.000 \text{ m}^3 \leq EAFCC_t < 1.000.000 \text{ m}^3 & \frac{EAFCC_t}{1.5} \\ si & 1.000.000 \text{ m}^3 \leq EAFCC_t & \frac{1.000.000}{1.5} + \frac{EAFCC_t - \frac{1.000.000}{1.5}}{2} \end{cases} \quad (1)$$

#### 4.1.7 Modelo Auxiliar Volumen de Descarte en Riego

##### 4.1.7.1 Descripción

En este modelo auxiliar se calculan los volúmenes mensuales que se descartan mediante el riego de las especies cultivadas.

La operación del modelo comienza con el cálculo de la precipitación útil, que desde el punto de vista del riego se define como aquella parte de la precipitación que efectivamente se incorpora a la zona radicular del cultivo, excluyéndose por lo tanto la que queda interceptada en la vegetación, la que percola a estratos más profundos y la que se derrama por escorrentía superficial.

Para calcular la precipitación útil se utiliza el método de la curva número, aunque se trata de un método elaborado para calcular las abstracciones de la precipitación de una tormenta, se aplica a nivel mensual considerando condiciones promedio.

El método supone que para la tormenta como un todo, el exceso de precipitación o escorrentía directa  $P_e$  es siempre menor o igual a la precipitación  $P$ ; de manera similar, después de que la escorrentía se inicia, la profundidad adicional del agua retenida en la cuenca  $F_a$  es menor o igual a alguna retención potencial máxima  $S$ . Existe también una cierta cantidad de precipitación (abstracción inicial) para la cual no ocurrirá escorrentía.

Se debe escoger un valor de la curva número que depende de las condiciones de humedad antecedente, del grupo hidrológico del suelo y del uso de la tierra. A partir de ese valor se calcula la retención potencial máxima  $S$ .

$$S = \frac{25.400}{CN} - 254 \quad (1)$$

Donde:

- $S$  : Retención potencial máxima [mm].
- $CN$  : Valor de la curva número II, parámetro del modelo.

La abstracción inicial antes de que se produzca escorrentía se supone en 20% de la retención potencial máxima.

$$Ia = 0,2 \times S \quad (2)$$

Donde:

- $Ia$  : Abstracción inicial [mm].

La precipitación efectiva se calcula también en función de la retención potencial máxima.

$$Pe_t = \frac{(P_t - 0,2 \times S)^2}{P_t + 0,8 \times S} \quad (3)$$

Donde:

- $Pe_t$  : Precipitación efectiva o escorrentía directa en el mes t [mm].
- $P_t$  : Precipitación total en el mes t, dato de entrada al modelo [mm].

Y aplicando la ecuación de continuidad:

$$Fa_t = P_t - Pe_t - Ia \quad (4)$$

Donde:

- $Fa_t$  : Infiltración total en el mes t [mm].

En el modelo se estima la precipitación útil como la Infiltración total.

$$Pu_t = Fa_t \quad (5)$$

Donde:

- $Pu_t$  : Precipitación útil en el mes t [mm].

Después se calcula la evapotranspiración de los cultivos, en base a la evapotranspiración del cultivo de referencia.

$$ET_{0t} = k_p \times EREF_t \quad (6)$$

Donde:

- $ET_{0t}$  : Evapotranspiración del cultivo de referencia en el mes t [mm].
- $k_p$  : Coeficiente de cubeta, parámetro del modelo.



- $EREF_t$  : Evaporación desde cubeta Clase A en el mes t, dato de entrada al modelo [mm].

$$ETC_t = Kc_t \times ET_{0t} \quad (7)$$

Donde:

- $ETC_t$  : Evapotranspiración desde los cultivos en el mes t [mm].
- $Kc_t$  : Coeficiente ponderado de cultivos para el mes t [°/1].

El coeficiente ponderado de cultivos se calcula en base a la superficie cada especie y el coeficiente de cultivo de las mismas.

$$Kc_t = \frac{\sum_i Kc_{it} \times S_{it}}{STOT_t} \quad (8)$$

Donde:

- $Kc_{it}$  : Coeficiente de cultivo de la especie i en el mes t, parámetro del modelo [°/1].
- $S_{it}$  : Superficie ocupada por la especie i en el mes t, dato de entrada al modelo [hà].
- $STOT_t$  : Superficie total cultivada en el mes t [hà].

$$STOT_t = \sum_i S_{it} \quad (9)$$

La tasa de riego por unidad de superficie corresponde a la diferencia entre la evapotranspiración desde los cultivos y la precipitación útil, dividido por la eficiencia del sistema de riego.

$$TR_t = \frac{ETC_t - Pu_t}{\eta_t} \quad (10)$$

Donde:

- $TR_t$  : Tasa de riego en el mes t [mm].
- $\eta_t$  : Eficiencia del sistema de riego en el mes t, parámetro del modelo [°/1].

Conocida la tasa de riego mensual por unidad de superficie y la superficie cultivada se estima el caudal de riego a nivel mensual.

$$VDR_t = \frac{TR_t}{1.000} \times STOT_t \times 10.000 \quad (11)$$

Donde:

- $VDR_t$  : Volumen de agua de descarte en riego en el mes t [ $m^3/mes$ ].

## 4.2 Implementación del Modelo

En esta sección se expone la implementación del modelo anteriormente descrito, los datos de entrada que se utilizaron, el valor asignado a cada uno de los parámetros, las condiciones iniciales consideradas y la implementación de los modelos y funciones auxiliares.

El período en que se realizó la simulación va desde el mes de diciembre de 1999, mes de inicio de la operación del tranque, hasta junio de 2007 mes hasta el que se cuenta con estadísticas de precipitación y evaporación.

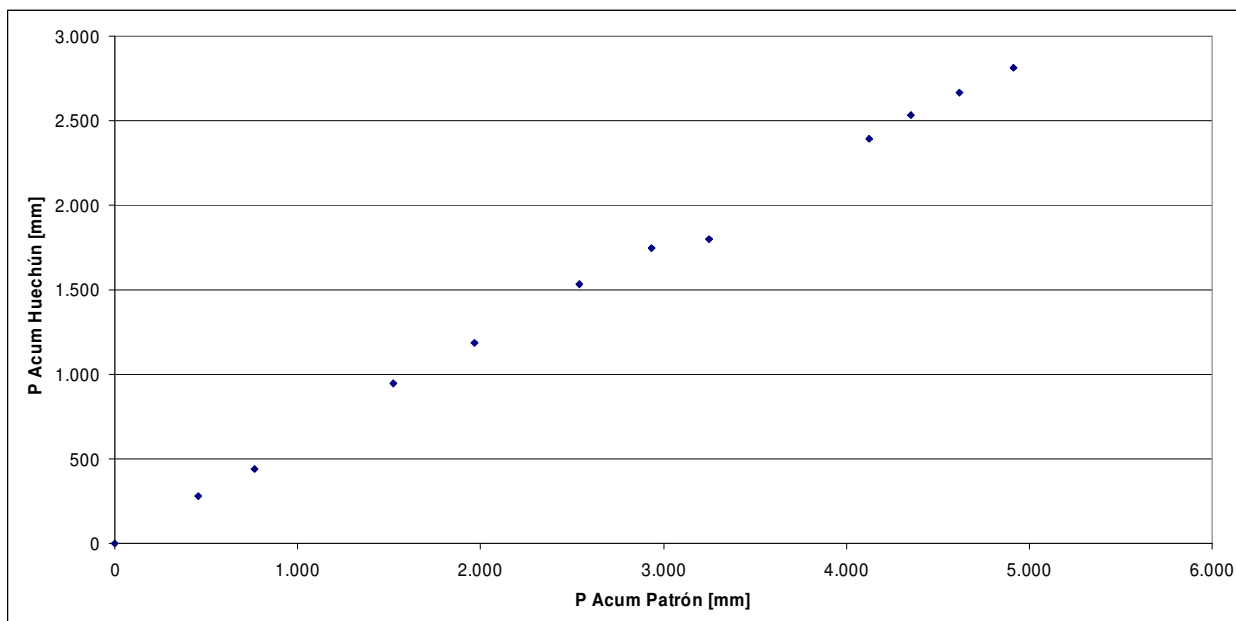
### 4.2.1 Datos Meteorológicos

#### 4.2.1.1 Precipitaciones

Se consideraron los registros de precipitaciones mensuales de la estación Huechún Andina, facilitados por la DAND. Dichos registros se extienden desde febrero de 1994 hasta junio de 2007. Se verificó la consistencia de los registros realizando la curva doble acumulada respecto del patrón considerado para la zona en el estudio del modelo MAGIC-MAIPO, que considera el promedio de las precipitaciones registradas en las estaciones Santiago Quinta Normal, San Bernardo, Cerrillos de Leyda y Hacienda Chada. De dicho patrón se tienen los datos hasta el año hidrológico 2004-2005.

Por considerarse que las mediciones más recientes son más confiables, se acumuló los valores anuales de precipitaciones el año hidrológico 2004-2005 hacia atrás. En Figura 4.10 se presenta la curva doble acumulada resultante.

**Figura 4.10 Curva Doble Acumulada Estación Huechún Andina**



La curva doble acumulada resultante no es una curva homogénea, por lo que se concluye que el patrón no es compatible con la estación para estos efectos. Aunque se pudo verificar la consistencia de los registros pluviométricos de la estación Huechún Andina, son éstos los que se utilizan en el modelo tomando en cuenta principalmente que la estación se encuentra ubicada muy cercana al tranque, en el mismo predio.

#### **4.2.1.2 Evaporación**

Se utilizaron los registros mensuales de la estación meteorológica Huechún Andina, que son considerados datos oficiales por la Dirección General de Aguas (DGA). La DAND proporcionó datos de la estación desde marzo de 1994 hasta junio de 2007.

#### **4.2.2 Otros Datos de Entrada**

La DAND facilitó la información de la producción de mineral mes a mes en el período entre enero del 2004 y junio del 2007. Para los valores entre diciembre de 1999 y mayo de 2004 se consideró la producción anual que aparece en el estudio de REG.

Se contó con datos mensuales de la concentración de sólidos en peso del relave transportado en el período entre enero de 2005 y junio de 2007. Para el período entre diciembre de 1999 y diciembre de 2004 se utilizó un valor constante cercano al promedio del período con datos.

Datos mensuales del porcentaje de finos de los sólidos del afluente a la batería de ciclones se tiene desde enero de 2004 hasta junio de 2007. Para los meses anteriores se utilizó el promedio de los meses con datos.

Del porcentaje de finos en los sólidos del overflow de la batería de ciclones se contó con datos desde enero de 2004 hasta junio de 2007. Para los meses anteriores se utilizó

el promedio de los meses con datos. Se contó con datos en el mismo período del porcentaje de finos en el underflow de la batería de ciclones y para completarlos se consideró un valor cercano al promedio de los meses con datos.

Datos mensuales de la concentración de sólidos en peso en el underflow de la batería de ciclones se tienen desde enero de 2004 hasta junio de 2007. Para completarlos se consideró un valor cercano al promedio de los meses con datos. Además se corrigieron los datos de abril de 2005, agosto de 2005 y de enero de 2007, dentro de un rango razonable.

Los datos de la densidad del muro y de la humedad del mismo, se obtuvieron de los ensayos de laboratorio a muestras del talud del muro. Se contó con información desde enero de 2005 hasta junio de 2007. Se consideró como la densidad representativa del muro a la densidad compactada húmeda de los ensayos a las muestras del talud. Los meses sin datos se completaron con el valor promedio de los meses con datos.

Registros mensuales del volumen de agua de retorno desde las sentinas se consiguió desde enero de 2004 hasta junio de 2007. Para los meses anteriores se consideró los valores del estudio de REG.

Los datos de la densidad aparente de los sólidos de las lamas se obtuvieron de los informes de las batimetrías, que contienen datos desde octubre de 2000 hasta febrero de 2006. También tienen datos de los meses posteriores pero no se especifica la fecha exacta de medición. Los datos de los meses anteriores al período con datos se rellenaron con valores algo menores al promedio de los meses con datos y los datos de los meses posteriores al período con datos se rellenaron con datos algo mayores al promedio de los meses con datos, de acuerdo a lo que se espera que suceda con la densidad aparente a partir del proceso de consolidación al que se ven sometidas las lamas.

Como valor de la densidad real de los sólidos de las lamas se utilizó un valor único de  $2,8 \text{ Ton/m}^3$ , de acuerdo a los antecedentes recopilados al respecto durante el estudio.

La escorrentía afluyente al canal de contorno mes a mes se obtuvo a partir de los resultados del modelo de síntesis de caudales.

Lo valores del volumen de agua de descarte en riego mes a mes se obtuvieron de los resultados del modelo auxiliar.

La superficie total de la cuenca se consideró como  $52,5 \text{ Km}^2$  y fue un dato proporcionado por la DAND. Se midió a partir de la topografía digital facilitada por la DAND la superficie total aguas abajo del canal de contorno, resultando ser de  $12,3 \text{ Km}^2$ . De la misma forma se midió la superficie de las quebradas afluentes cuya escorrentía no es captada por el canal de contorno, obteniéndose un valor de  $3,416 \text{ Km}^2$ .

Respecto del canal de contorno, se consideró una longitud total de 17 Km., un ancho basal representativo de 2 m y una pendiente media de  $0,5 \text{ ‰}$ , datos proporcionados por la DAND.

Respecto del volumen descartado de grandes crecidas por la torre de evacuación, aunque no se consiguió registros del volumen descartado, se averiguó con el personal que ha estado durante toda la operación del tranque, que la única vez que se ha utilizado la torre de evacuación fue durante la gran tormenta del mes de junio de 2002. Se estima que en total, durante ese mes hubo aportes de tormentas, ya sea por crecidas o precipitación incidente, por algo más de 4.000.000 m<sup>3</sup>, de acuerdo a los resultados del balance. Se estima que en total en ese mes se evacuaron algo mas de 3.000.000 m<sup>3</sup>, ya sea mediante el canal de contorno o mediante la torres de evacuación. Se consideró, que por la torre de evacuación se evacuaron 1.500.000 m<sup>3</sup>.

En la Tabla 4.6 se presenta un resumen de los datos de entrada mensuales, con el tipo de la fuente de la información utilizada.

Los valores de los datos de entrada mensuales utilizados se presentan en los anexos (1 a 6) del archivo magnético adjunto.

**Tabla 4.6 Resumen de los Datos de Entrada Mensuales**

Resumen de los Datos de Entrada. Continuación.

Resumen de los Datos de Entrada. Continuación.



### 4.2.3 Parámetros

Los parámetros constituyen información más incierta que los datos de entrada, debido a que no se miden y por lo tanto no se conoce con moderada exactitud su valor. Es por esto que se varían los parámetros para obtener una mejor calibración.

El porcentaje del mineral extraído en faena que corresponde a relaves se consideró como un 97% para todos los meses, de acuerdo a lo informado por la DAND.

El porcentaje de sólidos de rebose en la dilución se consideró un 20% para todos los meses, ajustado en la calibración. No existe registro ni mediciones de este parámetro.

Se consideró que la concentración de sólidos en peso de los reboses de la dilución es de un 50% para todos los meses, la que fue ajustada durante la calibración, considerando que su valor lógicamente debe ser menor a la concentración de sólidos en peso de los relaves en la canaleta y probablemente será menor a la concentración de sólidos en peso a la que se diluyen los relaves para ser clasificados en la batería de los ciclones. No se realizan mediciones de este parámetro.

El porcentaje de aumento de finos durante la separación en la batería de ciclones se consideró como un 50% hasta noviembre de 2003 y como un 47% desde diciembre de 2003, producto de la calibración realizada.

El coeficiente de evaporación desde las lamas se consideró como 0,8 para todos los meses, tomando en cuenta que en su mayor parte la superficie de las lamas expuestas se encuentran con un alto nivel de humedad o saturadas y en base a la revisión bibliográfica.

El coeficiente de evaporación desde el espejo de agua de la laguna de aguas claras se consideró igual a 0,75 para todos los meses, de acuerdo a la bibliografía y estudios revisados.

Para los parámetros del canal de contorno, se han diferenciado dos períodos. El primero que va desde el inicio de la operación hasta marzo de 2005, y el segundo que va desde abril de 2005 en adelante, mes desde el cual el canal de contorno ha funcionado con obras de mejoramiento, como el revestimiento con HDP de algunos tramos. Para el primer período se consideró un coeficiente  $n$  de Manning de 0,025, característico de canales de tierra, libres de vegetación y ripio suelto. Para el segundo período se consideró un coeficiente  $n$  de Manning de 0,23, producto del alisamiento de las paredes. Respecto del coeficiente de infiltración, en el primer período se utilizó el valor 0,41 y para el segundo 0,37, ambos en el rango adecuado para un suelo limo arenoso. Cabe mencionar que estos coeficientes se obtuvieron también ajustándolos según la calibración lo requirió.

Los valores mensuales de los parámetros utilizados se presentan en el Anexo 7, del archivo magnético adjunto.

#### 4.2.4 Condiciones Iniciales

Las condiciones iniciales son las que describen el comienzo de la operación, vale decir:

- $MTSL_0 = 0.$
- $SLAC_0 = 0.$
- $SLE_0 = 0.$
- $VLAC_0 = 0.$

#### 4.2.5 Modelo Auxiliar Volumen de Descarte en Riego

Para la implementación de este modelo auxiliar se consideró la estadística de precipitaciones de la estación meteorológica Huechún Andina, debidamente corregida. Para la estadística de evaporación de bandeja se consideró la de la misma estación.

Se mantienen forestaciones de Eucalyptus y de bosque nativo, cuya superficie se ha ido incrementando anualmente tal como se muestra en la Tabla 4.7. Se ha considerado que las plantaciones se comienzan a regar en el mes de septiembre del año en que se realizan.

Para el caso de los Eucalyptus, los coeficientes de cultivo mensuales van aumentando a medida en que pasan más años desde que se realizó la plantación, lo que se muestra en la Tabla 4.8.

Los coeficientes de cultivos mensuales para el bosque nativo utilizados se presentan en la Tabla 4.9.

**Tabla 4.7 Superficies Forestadas**

Año	Sup. Eucalyptus [hà]	Sup. B. Nativo [hà]
2000	143	46
2001	77	136
2002	100	87
2003	240	0
2004	0	51
2005	12	0
Total	572	320

Fuente: DAND.

**Tabla 4.8 Coeficientes de Cultivo Eucalyptus**

Mes	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
Septiembre	0,44	0,55	0,66	0,71	0,76
Octubre	0,53	0,67	0,80	0,86	0,91
Noviembre	0,63	0,81	0,96	1,02	1,08
Diciembre	0,73	0,92	1,10	1,18	1,26
Enero	0,76	0,97	1,15	1,23	1,31
Febrero	0,73	0,92	1,10	1,18	1,26
Marzo	0,59	0,76	0,90	0,96	1,01
Abril	0,53	0,67	0,80	0,86	0,91
Mayo	0,44	0,55	0,66	0,71	0,76
Junio	0,38	0,49	0,58	0,62	0,65
Julio	0,33	0,42	0,50	0,53	0,57
Agosto	0,37	0,47	0,56	0,60	0,64

Fuente: Estudio REG.

**Tabla 4.9 Coeficientes de Cultivo Bosque Nativo**

Mes	K <sub>C</sub>
Septiembre	0,22
Octubre	0,28
Noviembre	0,30
Diciembre	0,33
Enero	0,34
Febrero	0,34
Marzo	0,34
Abril	0,32
Mayo	0,29
Junio	0,27
Julio	0,27
Agosto	0,27

Fuente: Estudio REG.

Para escoger el valor de la Curva Número, se ha utilizado la clasificación según antecedentes de humedad grupo AMC II, con el propósito de representar condiciones promedio. Se ha considerado que el suelo pertenece al grupo hidrológico C y su uso como bosques con cubierta pobre, Dado lo anterior, el valor de la curva número utilizado es 80.

Para el coeficiente de cubeta  $k_p$  se ha utilizado un valor de 0,75, obtenido del cuadro 19 de la publicación FAO 24.

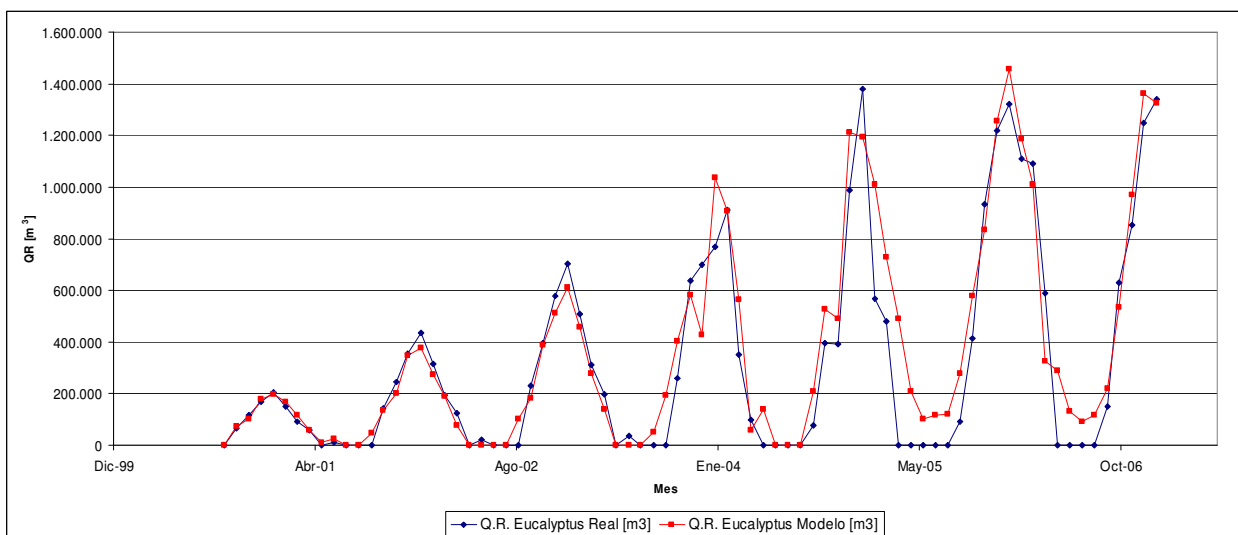
Para la eficiencia del sistema de riego  $\eta$  se ha utilizado un valor de 0,6 para el caso de los Eucalyptus y de 0,45 para el caso del bosque nativo, obtenidos del documento

“Servicio Integral de Operación del Sistema de Deposición de Relaves en División Andina. Bases Técnicas”.

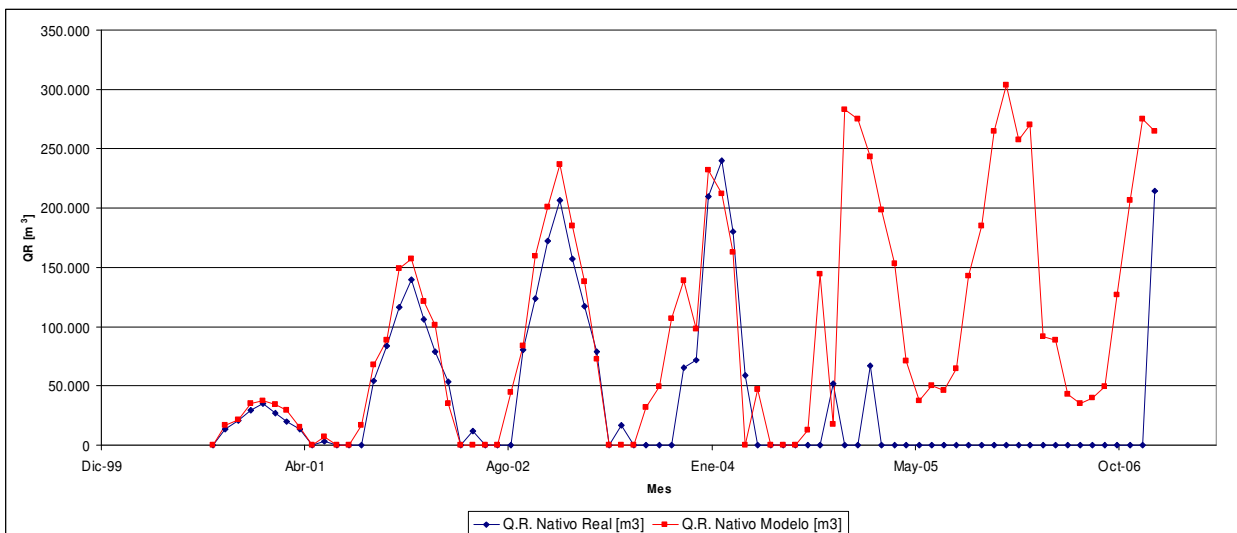
Con los datos y parámetros del modelo anteriormente descritos, se estimaron los caudales de riego utilizados tanto para el total de las forestaciones de Eucalyptus como para las de bosque nativo, comparándose los resultados con los caudales registrados y proporcionados por la DAND. La comparación de los valores resultantes del modelo y de los valores medidos para los Eucalyptus, el bosque nativo y el total de agua para riego se presentan gráficamente en la Figura 4.11, la Figura 4.12 y la Figura 4.13 respectivamente.

Se puede apreciar un buen ajuste en general, en el caso de los caudales totales se aprecia que, a partir de la temporada de riego 2004-2005, los calculados comienzan a ser algo mayores que los informados por la DAND. Esto se debe posiblemente a que, a a partir de la misma temporada de riego, la DAND no informó sobre el agua utilizada para riego del bosque nativo, como se ve en la Figura 4.12.

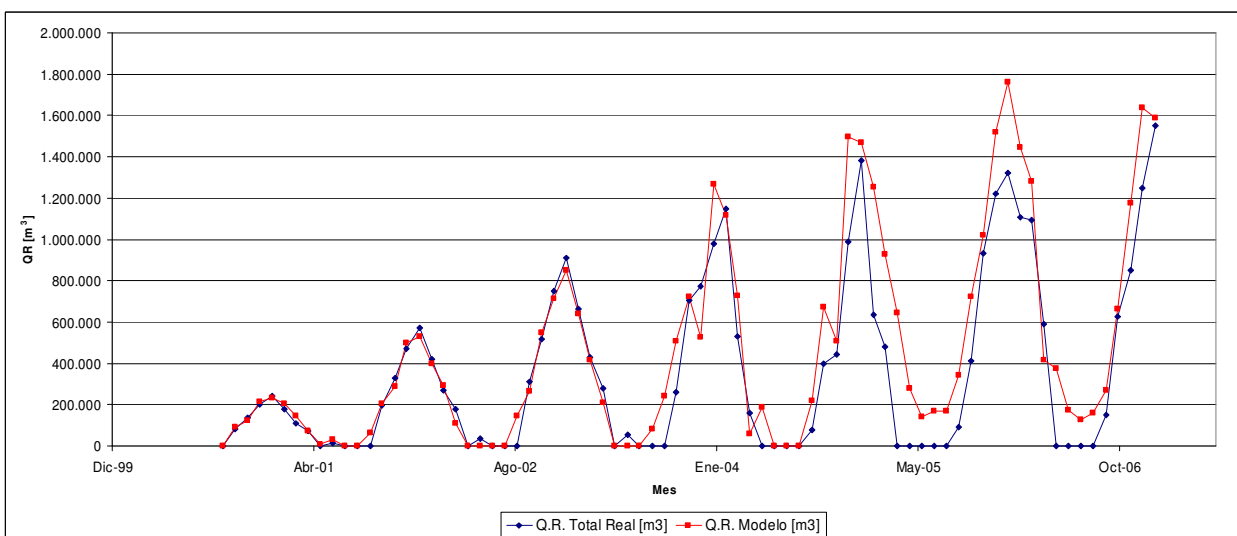
**Figura 4.11 Ajuste Q.R. Eucalyptus**



**Figura 4.12 Ajuste Q.R. Bosque Nativo**



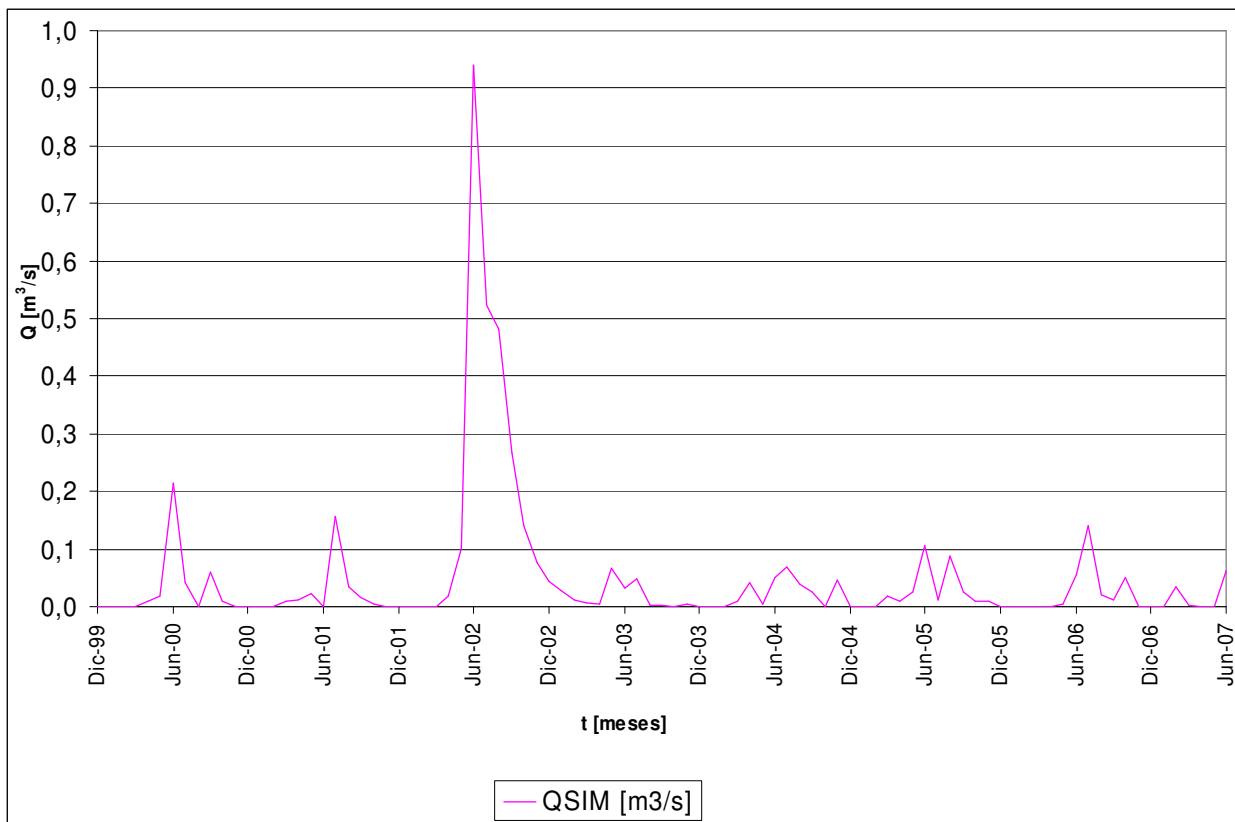
**Figura 4.13 Ajuste Q.R. Total Forestaciones**



#### 4.2.6 Síntesis de Caudales

Se sintetizan los caudales correspondientes a la escorrentía afluente al canal de contorno, con un área aportante de 36.784.083 m<sup>2</sup>. Se utilizan las precipitaciones corregidas de la estación Huechún Andina, la evaporación de bandeja medida en la misma estación y los parámetros de la calibración realizada y descrita en el punto 4.1.2.2. En la Figura 4.14 se presenta el gráfico de los caudales sintetizados en el período.

**Figura 4.14 Caudales Sintetizados Escorrentía Afluente al Canal de Contorno**



### 4.3 Verificación

Primeramente, para verificar la consistencia del balance hídrico que realiza el modelo, se verificó el cumplimiento de la ecuación de continuidad en el sistema en su conjunto. El volumen total de agua que entra al sistema en todo el período es de 202.748.082 m<sup>3</sup>. El volumen total de las salidas en todo el período es de 138.078.677. El volumen almacenado durante el período es de 63.970.117 m<sup>3</sup>. Lo anterior implica una diferencia es de apenas 12 m<sup>3</sup> en todo el período, lo que es absolutamente despreciable en comparación con las cantidades totales que ingresan, salen y se almacenan.

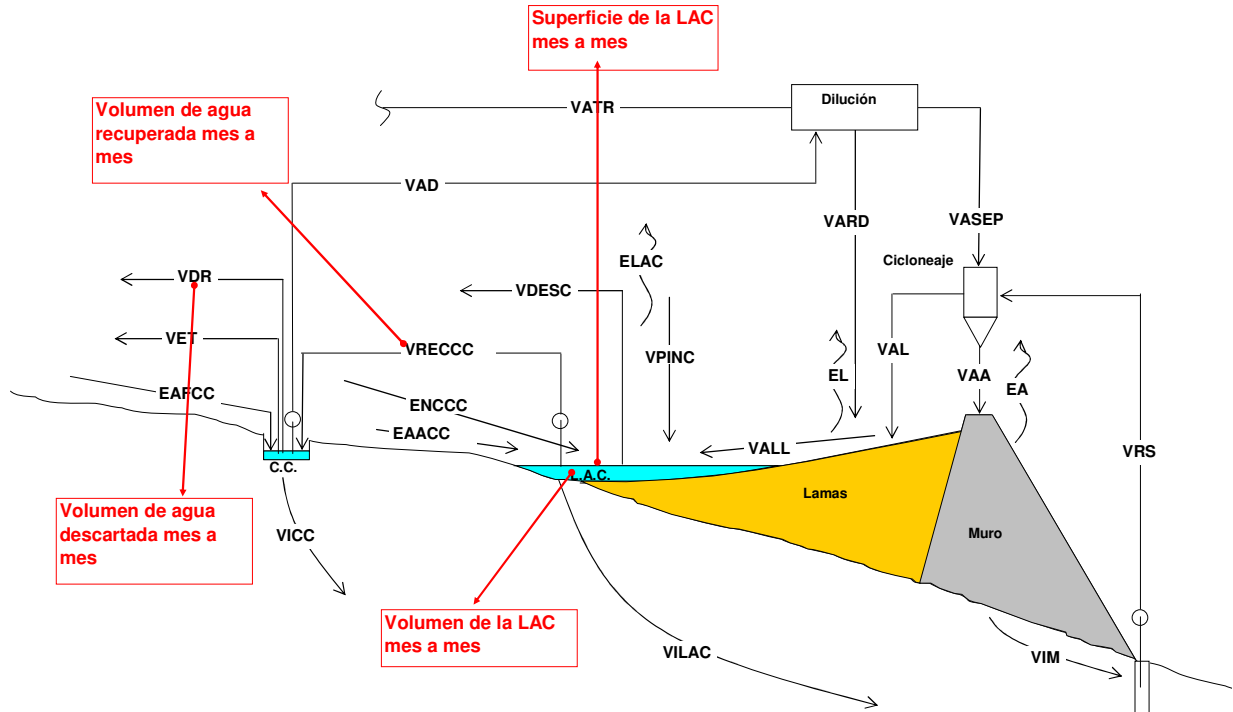
También se verificó el balance de los sólidos. Las entradas totales son de 177.692.777 Ton, las salidas totales son de 155.561.833 Ton y los almacenamientos son de 22.130.945 Ton. La diferencia en este caso no existe.

Por otro lado, se hizo variar los parámetros y datos con el objeto de verificar que las variaciones que se produjeran en los resultados tuvieran coherencia. Este proceso se realizó hasta que se llegó al convencimiento de que el modelo funciona adecuadamente.

#### 4.4 Calibración

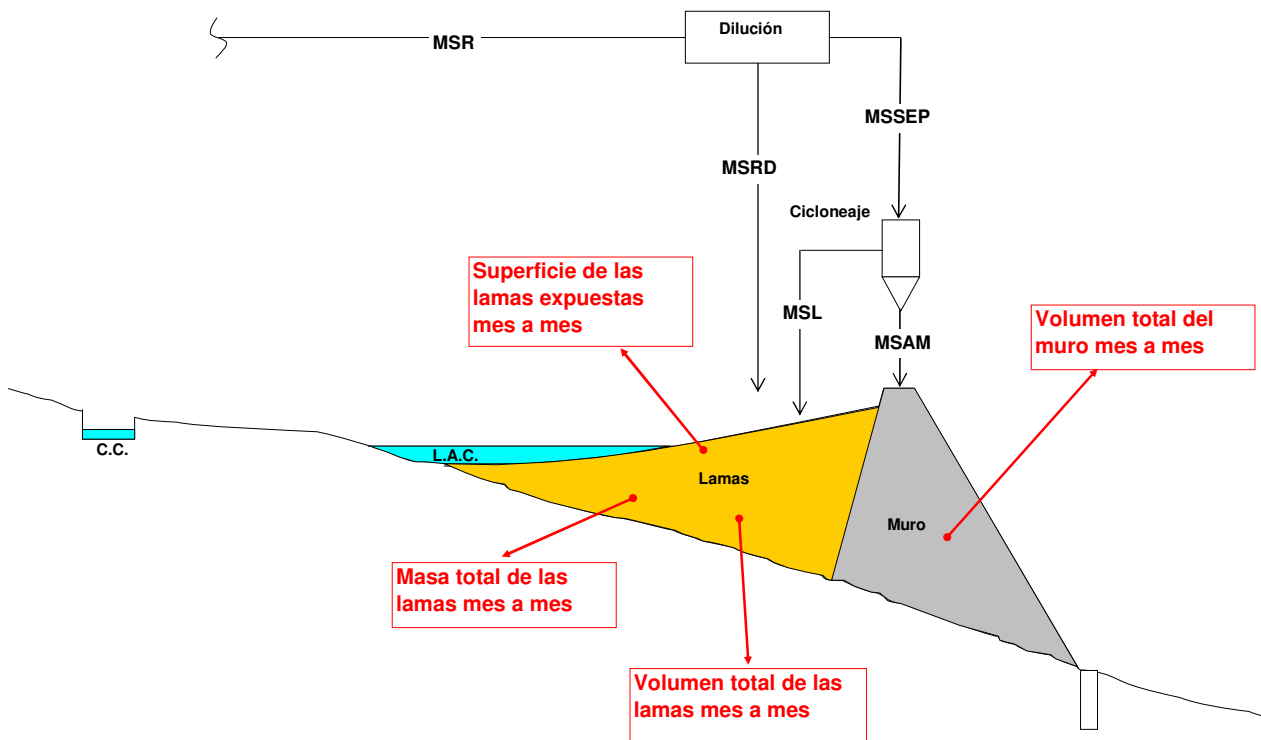
La calibración se efectuó con diferentes puntos de control para el balance de aguas y para el balance de sólidos. Los puntos de control del balance de aguas se muestran en la Figura 4.15 y los puntos de control del balance de sólidos se muestran en la Figura 4.16.

Figura 4.15 Puntos de Control Balance de Aguas

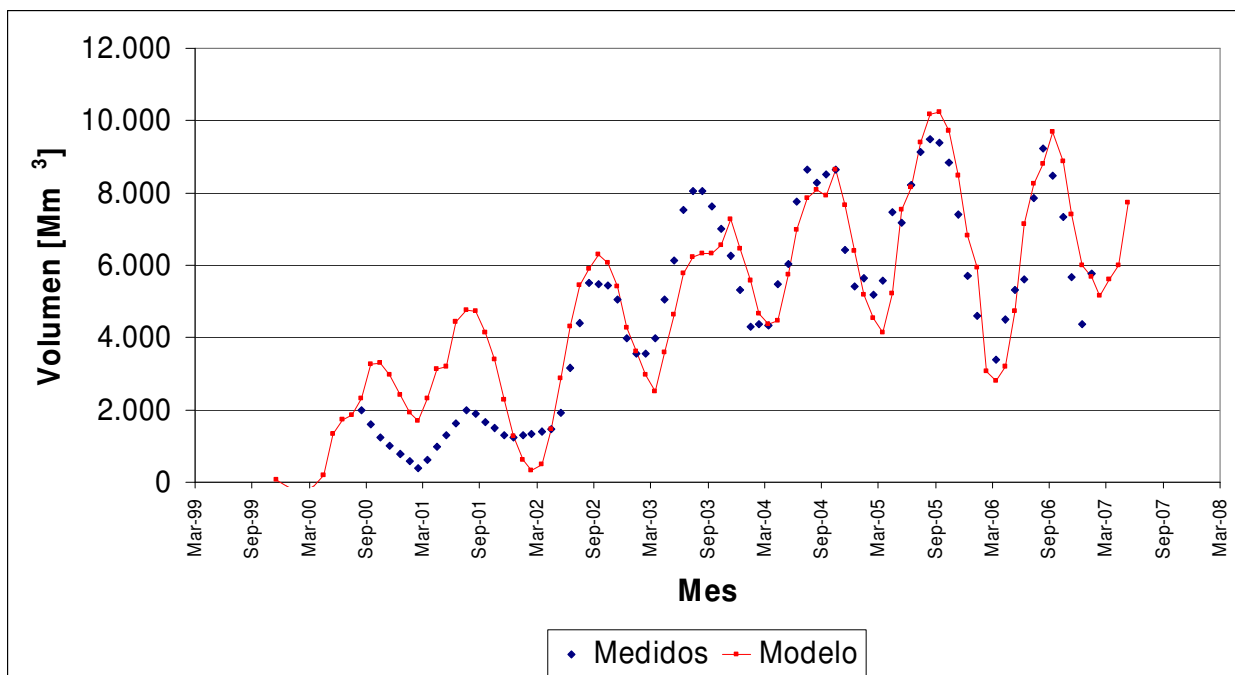


La calibración se realizó con el mayor número de datos que se pudo, mostrándose los resultados de la calibración en los puntos de control del balance de aguas en la Figura 4.17, la Figura 4.18, la Figura 4.19 y la Figura 4.13. La calibración para los puntos de control del balance de sólidos se presenta en la Figura 4.20, la Figura 4.21, la Figura 4.22 y la Figura 4.23.

**Figura 4.16 Puntos de Control Balance de Sólidos**

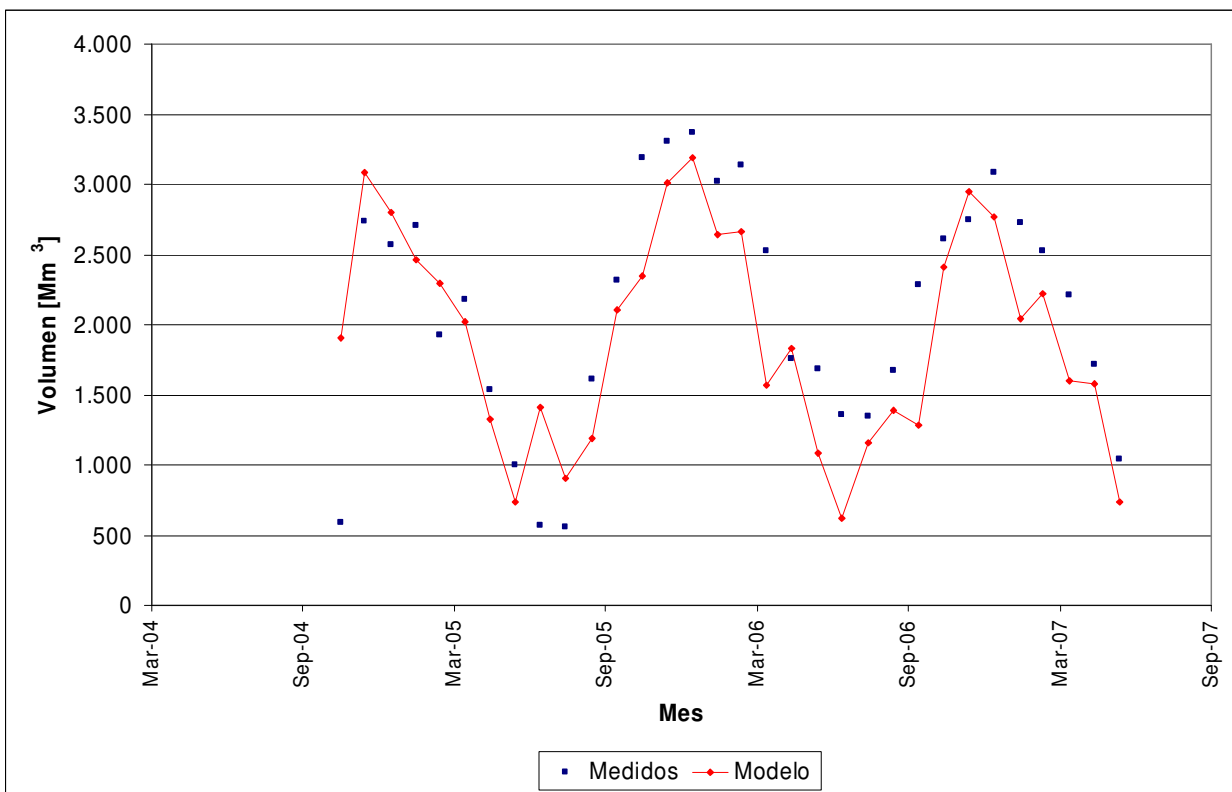


**Figura 4.17 Calibración Volumen Laguna de Aguas Claras**

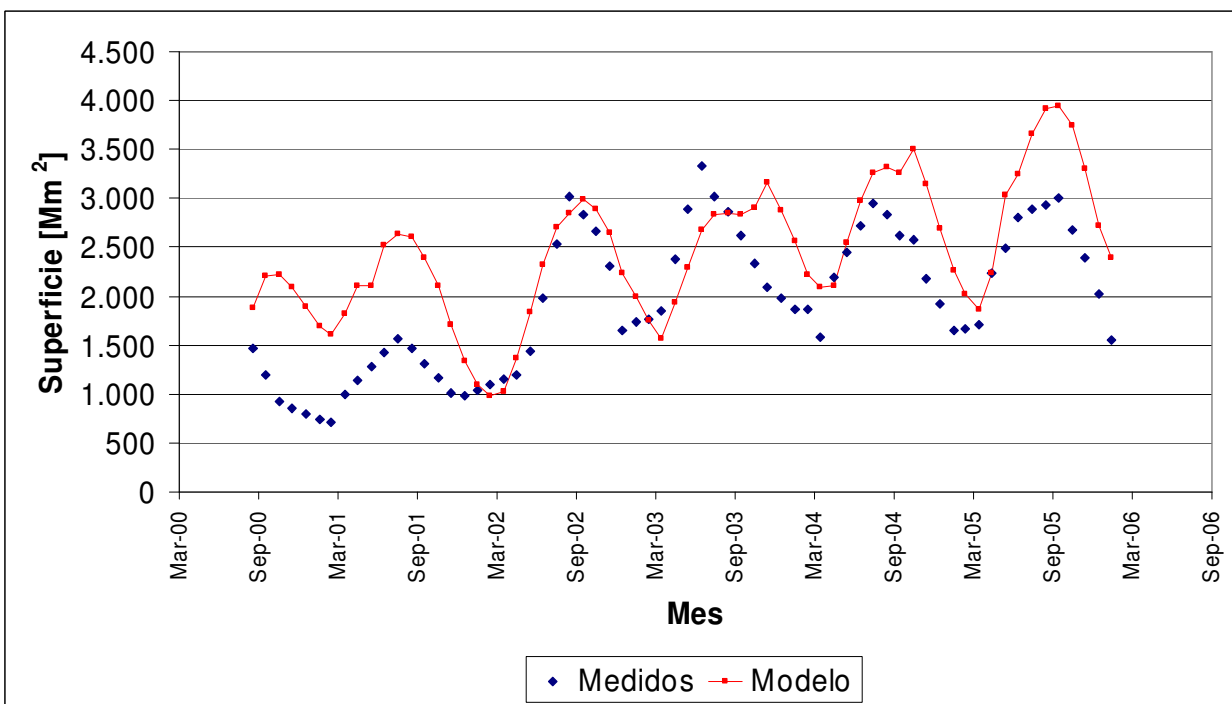




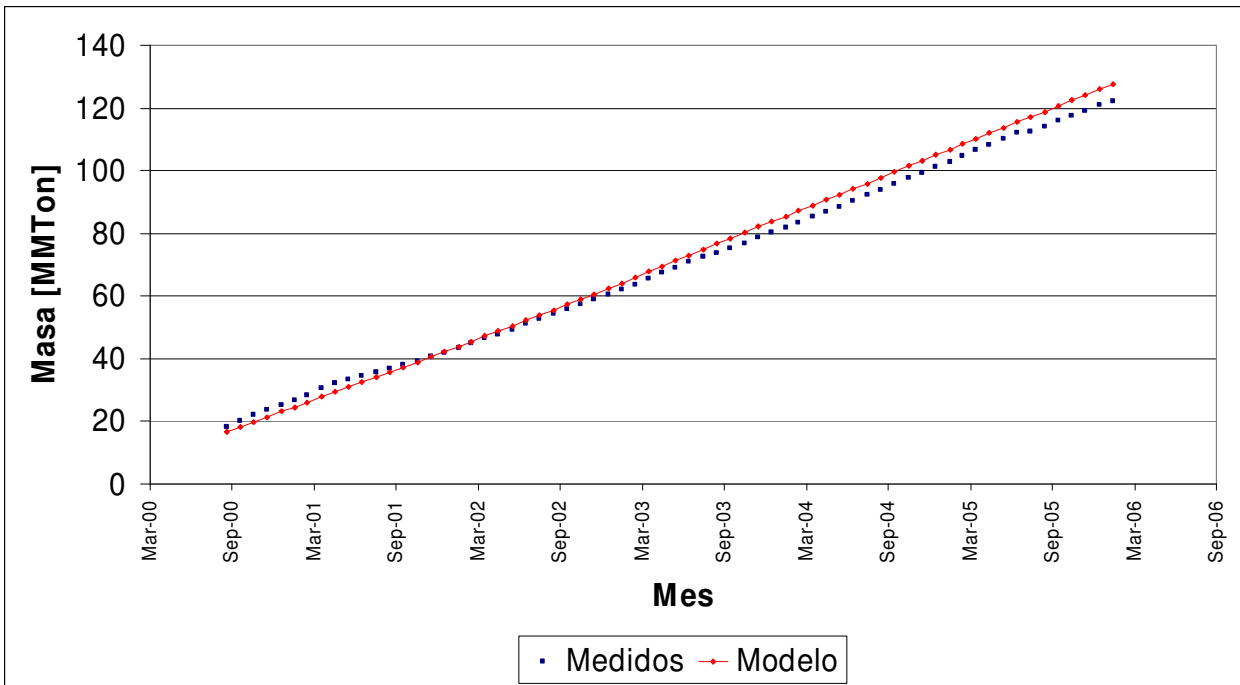
**Figura 4.18 Calibración Volumen Recuperado desde LAC**



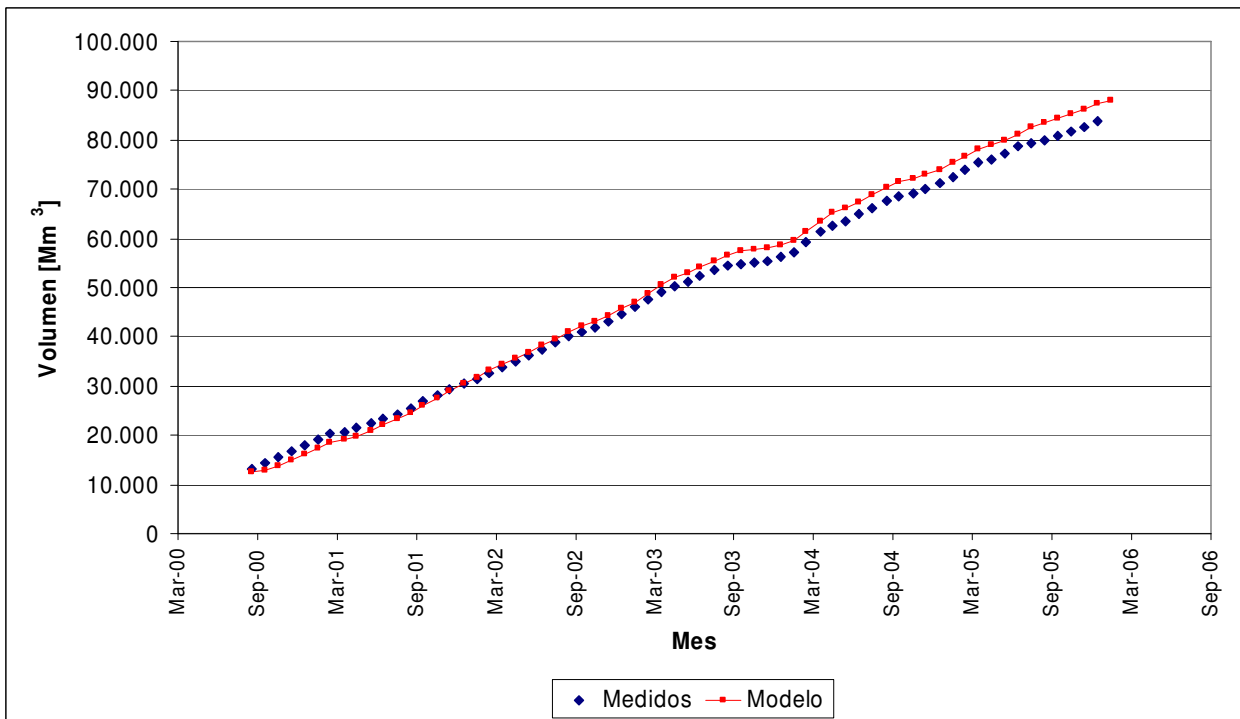
**Figura 4.19 Calibración Superficie de Laguna de Aguas Claras**



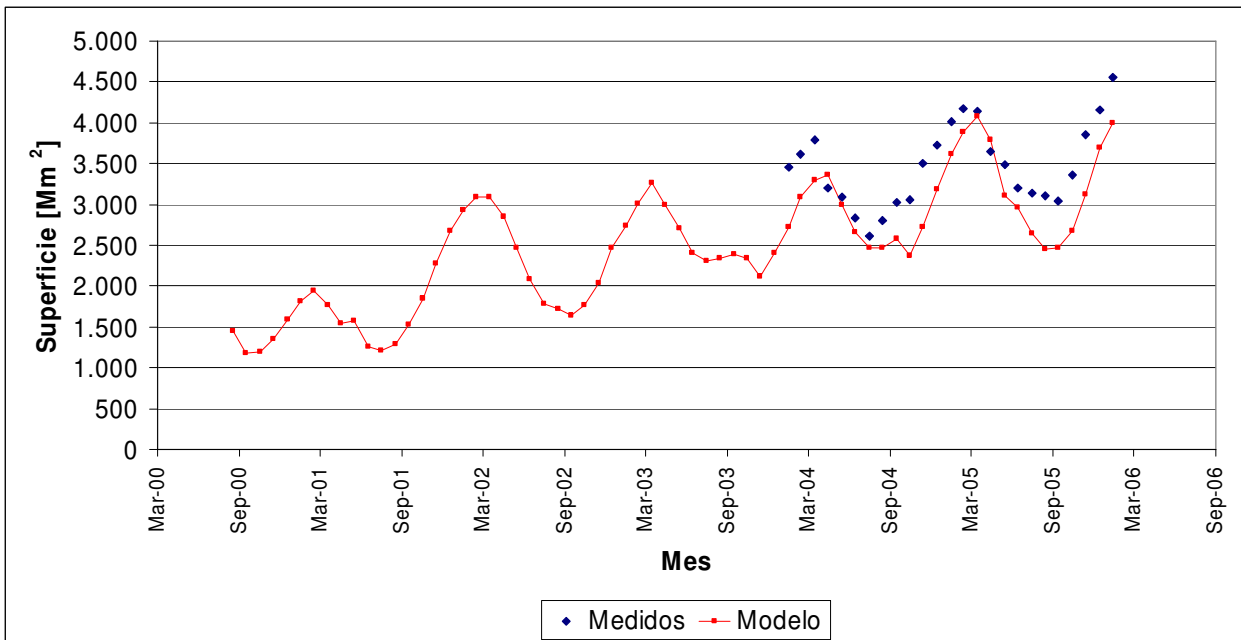
**Figura 4.20 Calibración Masa Total de Sólidos Depositados en Lamas**



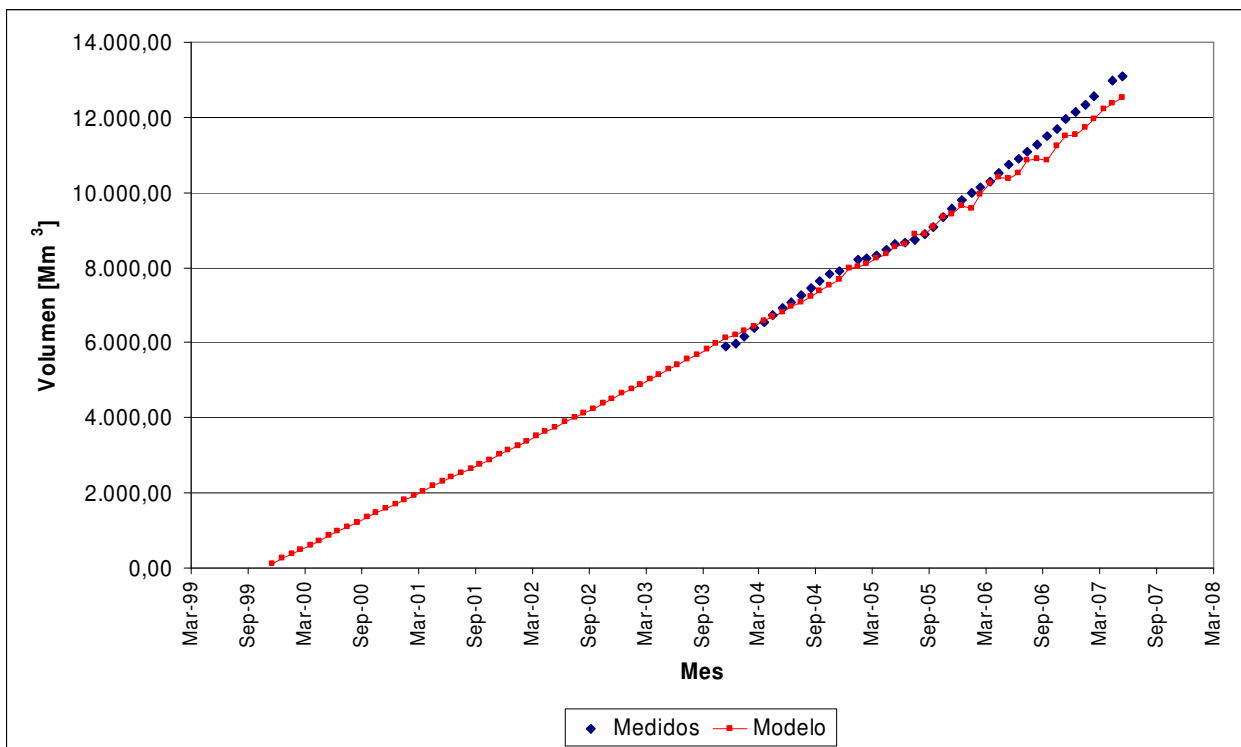
**Figura 4.21 Calibración Volumen Total de Lamas Depositadas**



**Figura 4.22 Calibración Superficie de Lamas Expuestas**



**Figura 4.23 Calibración Volumen Total del Muro**



## 5 RESULTADOS

### 5.1 Escenario Actual

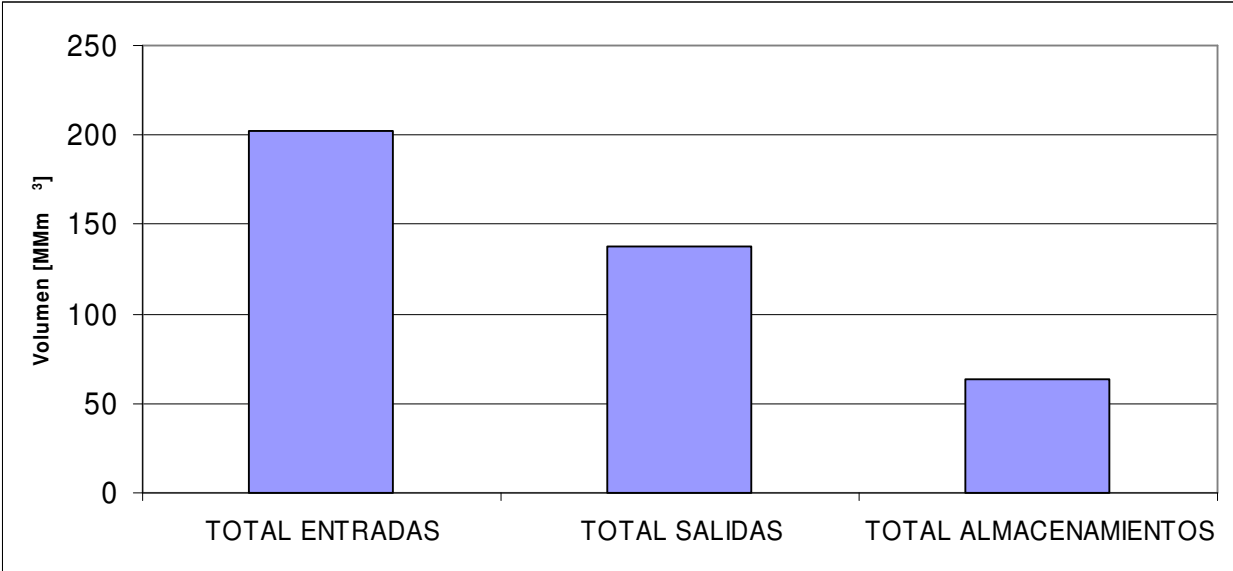
Los flujos de entrada y salida del período total se presentan en la Tabla 5.1.

**Tabla 5.1 Flujos Totales Escenario Actual**

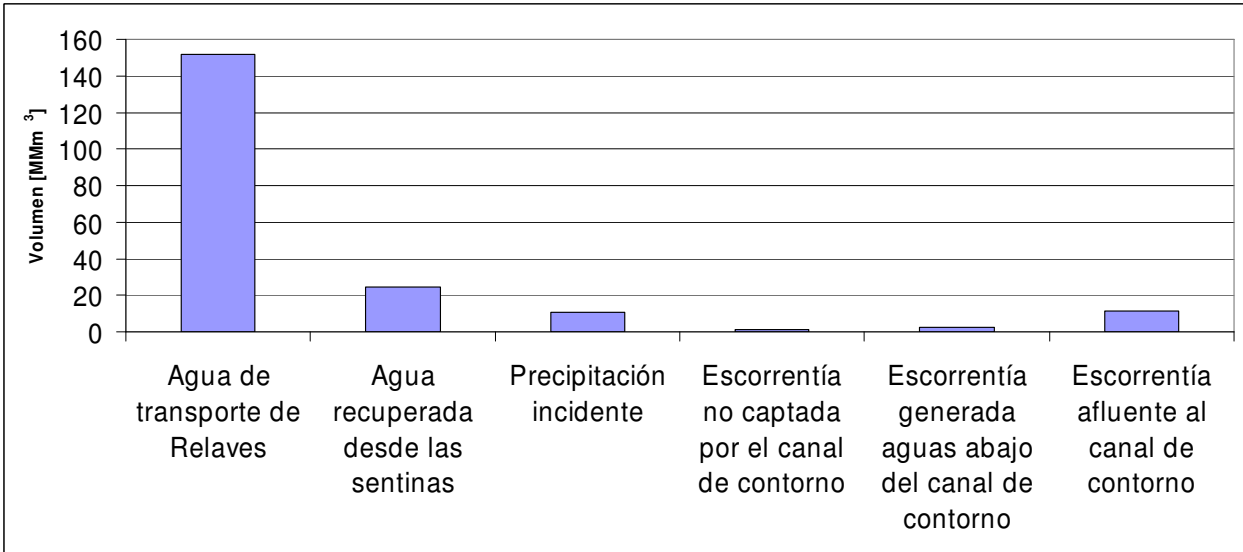
	Total [KTon]	Promedio [KTPD]		
	Producción Mineral	183.199	66,161	
<b>1.- ENTRADAS</b>	<b>Volumen Total [m<sup>3</sup>]</b>	<b>Q Promedio [l/s]</b>	<b>Incidencia [%]</b>	
Agua de transporte de Relaves	151.801.999	634,5	75,1	
Agua recuperada desde las sentinas	24.546.642	102,6	12,1	
Precipitación incidente	10.701.185	44,7	5,3	
Escorrentía no captada por el canal de contorno	1.072.403	4,5	0,5	
Escorrentía generada aguas abajo del canal de contorno	2.378.455	9,9	1,2	
Escorrentía afluente al canal de contorno	11.548.099	48,3	5,7	
<b>TOTAL ENTRADAS</b>	<b>202.048.782</b>	<b>844,5</b>	<b>100,0</b>	
<b>2.- SALIDAS</b>	<b>Volumen Total [m<sup>3</sup>]</b>	<b>Q Promedio [l/s]</b>	<b>Incidencia [%]</b>	
Agua infiltrada desde la laguna de aguas claras	25.541.247	106,8	18,5	
Agua infiltrada desde el canal de contorno	26.079.623	109,0	18,9	
Agua de pérdidas en el muro (infiltración + evaporación)	10.904.313	45,6	7,9	
Evaporación (ELAC + EL)	33.143.353	138,5	24,0	
Agua de descarte por riego	36.659.794	153,2	26,5	
Descarte de aportes de tormentas intensas y crecidas (VDESC+VET)	5.750.346	24,0	4,2	
<b>TOTAL SALIDAS</b>	<b>138.078.677</b>	<b>577,2</b>	<b>100,0</b>	
<b>3.- ALMACENAMIENTOS</b>	<b>Volumen Total [m<sup>3</sup>]</b>	<b>Q Promedio [l/s]</b>	<b>Incidencia [%]</b>	
Agua en laguna de aguas claras	7.717.865	32,3	12,1	
Agua en lamas depositadas	54.769.744	228,9	85,6	
Agua en muro	1.482.503	6,2	2,3	
<b>TOTAL ALMACENAMIENTOS</b>	<b>63.970.111</b>	<b>267,4</b>	<b>100,0</b>	

El total de entradas, salidas y almacenamientos en todo el período se presentan gráficamente en la Figura 5.1. En tanto, los flujos de entrada y salida para todo el período se presentan gráficamente en la Figura 5.2 y la Figura 5.3 respectivamente.

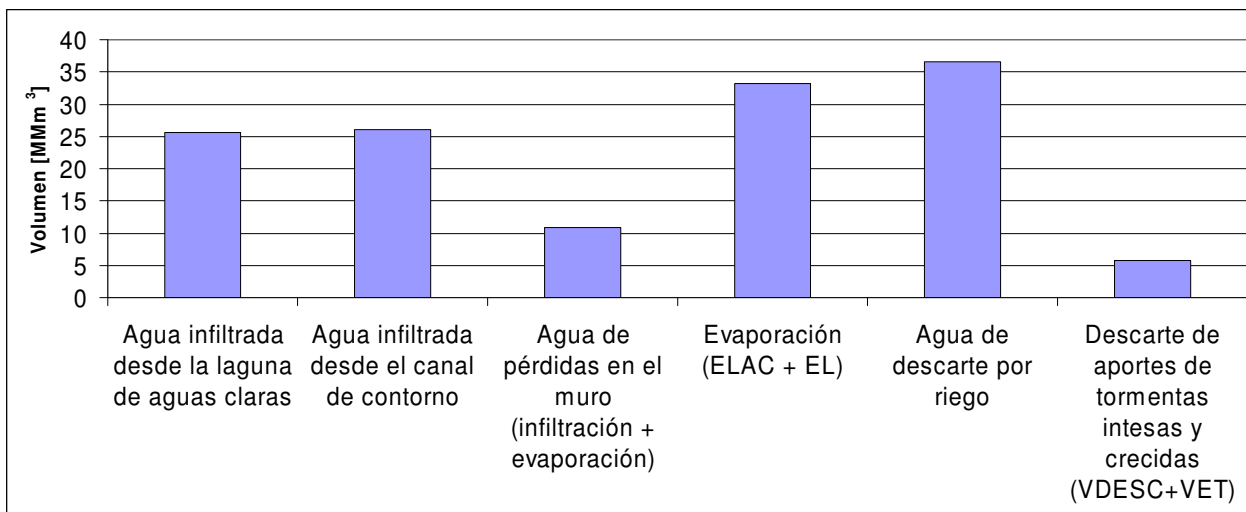
**Figura 5.1 Flujos Totales Escenario Actual**



**Figura 5.2 Entradas Totales Escenario Actual**



**Figura 5.3 Salidas Totales Escenario Actual**



Otro resultado que vale la pena presentar y que no se ha incluido anteriormente porque no es una entrada ni una salida del modelo, sino que es un flujo de circulación interna, es el total de agua con que se llevan a depositar las lamas, considerando el rebose de la dilución y el underflow de la batería de ciclones, cuyo valor es de 260.929.714 m<sup>3</sup>.

## 5.2 Curvas de Operación del Tranque

Con el objeto de estimar las curvas representativas de la operación de tranque de relaves, se simularon distintos escenarios de producción, variando únicamente ese dato de entrada y utilizando la calibración obtenida del modelo.

**Tabla 5.2 Entradas Totales en los Distintos Escenarios**

Producción Mineral [KTPD]	Entradas					
	VATR [l/s]	VRS [l/s]	VPINC [l/s]	ENCCC [l/s]	EAACC [l/s]	EAFCF [l/s]
66,16	634,5	102,6	44,7	4,5	9,9	48,3
72,00	689,5	102,6	47,4	4,5	9,5	48,3
90,00	861,9	102,6	53,9	4,5	8,7	48,3
150,00	1.436,5	102,6	75,8	4,5	5,8	48,3
210,00	2.011,1	102,6	97,8	4,5	2,9	48,3
230,00	2.202,6	102,6	105,1	4,5	1,9	48,3
290,00	2.777,2	102,6	127,2	4,5	-1,0	48,3

**Tabla 5.3 Salidas Totales en los Distintos Escenarios**

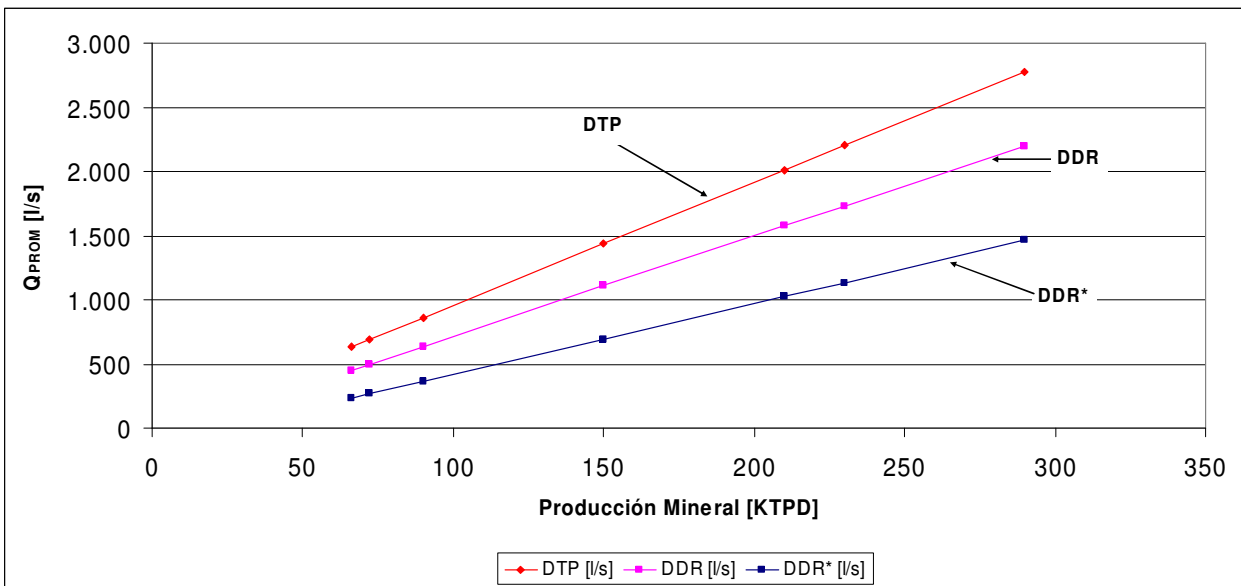
Producción Mineral [KTPD]	Salidas					
	VILAC [l/s]	VICC [l/s]	VAPM [l/s]	ELAC + EL [l/s]	VDR [l/s]	VDESC + VET [l/s]
66,16	106,8	109,0	45,6	138,5	153,2	24,0
72,00	119,3	111,9	49,8	149,1	153,2	24,0
90,00	154,4	119,3	62,2	177,0	153,2	24,0
150,00	273,5	140,4	103,7	270,6	153,2	24,0
210,00	394,2	158,0	145,2	365,0	153,2	24,0
230,00	434,7	163,3	159,0	396,5	153,2	24,0
290,00	556,8	178,2	200,5	491,4	153,2	24,0

**Tabla 5.4 Almacenamientos Totales en los Distintos Escenarios**

Producción Mineral [KTPD]	Almacenamientos		
	VLAC [l/s]	VTAL [l/s]	VTAM [l/s]
66,16	32,3	228,9	6,2
72,00	38,4	249,3	6,7
90,00	69,6	311,6	8,4
150,00	174,6	519,4	14,0
210,00	280,8	727,2	19,6
230,00	316,3	796,4	21,4
290,00	423,4	1.004,2	27,0

Las curvas resultantes se presentan en la Figura 5.4.

Figura 5.4 Curvas de Operación Hídrica del Tranque





## **6 DISCUSIÓN, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **6.1 Discusión**

En todo trabajo que se realice, se debe reflexionar acerca de su validez y sus alcances, con tal de interpretar sus resultados de manera acertada y no inducir a errores por mal uso de los resultados, que pueden derivar en decisiones incorrectas siendo muchas veces relevantes.

En el caso del presente trabajo de título, se puede decir que los flujos calculados para el escenario actual tienen gran validez, debido a que se logró reproducir de buena manera y en una importante cantidad de puntos de control, lo observado en la realidad.

Distinta es la situación de las simulaciones realizadas para los escenarios de expansión de la producción, el uso de los resultados obtenidos es únicamente valedero para los fines con que se utilizan en el presente estudio, que son hacer una estimación de las curvas representativas de la operación hídrica de tranque y de esta manera tener también una estimación de los derechos de agua de carácter consuntivo y no consuntivo que se deben poseer al momento de planificar dicha expansión en la producción, situación en la que se encuentra la DAND hoy día.

Lo anterior ocurre debido a que lógicamente en un escenario de expansión de la producción, se deben tomar algunas medidas de tipo constructivo como reconstruir el canal de contorno en una cota más alta producto del crecimiento del depósito de lamas y/o replanificar el descarte de aguas mediante el riego de las forestaciones, se puede apostar a aumentar la evapotranspiración para evitar un aumento de infiltración producto de los mayores volúmenes de agua con que se opera, o bien mantener o disminuir las forestaciones con tal de reutilizar el agua disponible en el proceso productivo. Se debieran ejecutar obras tendientes a impermeabilizar la cubeta con tal de que las infiltraciones no aumenten, etc. Todas esas son decisiones que debe tomar la DAND y que no fueron consideradas en este estudio, en el que los escenarios de expansión de la producción se simularon con las mismas condiciones de operación del tranque.

De todas maneras, la confección de las curvas representativas de la operación del tranque relevantes para los efectos de estimar los derechos de agua, no depende de los factores antes mencionados y por ende los resultados son igualmente válidos para esos efectos.

Una pretensión de este trabajo era explorar la posibilidad de implementar un modelo matemático para evaluar el proceso de consolidación al que están sometidos las lamas depositadas, y así poder estimar la cantidad de agua que queda retenida en ellas y la que es liberada durante dicho proceso. Para poder llevar a cabo la implementación de un modelo de esas características, y dada la magnitud de los asentamientos que se podrían producir mes a mes, que sería del orden de centímetros o unos pocos metros (Verdugo, 2007), es imprescindible contar con las mediciones, registros y ensayos que permitan calibrar adecuadamente dicho modelo. Otra dificultad importante que se presenta en la implementación de un modelo matemático para evaluar la consolidación,

es conocer la cantidad de agua con que comienza el proceso, lo que necesariamente implica conocer el agua que se libera durante el proceso de sedimentación anterior. Sin embargo, en este trabajo se ha evaluado la cantidad de agua total retenida en las lamas depositadas y la cantidad de agua que se libera mes a mes desde las lamas, agregando la cantidad de agua liberada en el proceso de sedimentación y en el de consolidación. La estimación se ha realizado utilizando las mediciones existentes y en base a una aplicación de la ecuación de continuidad en las lamas depositadas.

Durante la realización del presente estudio se tuvo bastantes dificultades para conseguir la información que permitiera realizar un buen modelo. La calidad del modelo conseguido está estrechamente relacionada con la calidad de la información de que se disponga. En general, se debe procurar la utilización de una cantidad razonablemente acotada de parámetros, que aunque sirven para calibrar el modelo, una cantidad excesiva de éstos permite obtener resultados que pueden ser engañosos. Se podría obtener resultados aceptables con un modelo que no represente los fenómenos acontecidos, con lo que al aplicar el modelo en algún escenario distinto perdería total validez, lo mismo ocurriría con los resultados de los flujos que no se pudo calibrar. Afortunadamente en este caso, para todos los datos de entrada definidos se pudo contar con información en a lo menos un período, lo que permitió realizar suposiciones razonables para los meses donde no se tuvo datos (ver Tabla 4.6).

Relacionado con lo anterior, se pudo constatar que los cambios en las empresas contratistas que tienen a su cargo la operación del tranque, conllevan la pérdida casi absoluta de la información registrada en el período anterior, dado que Codelco actualmente no se hace cargo de buena manera del procesamiento y debido ordenamiento de la información que se va generando a diario. Fundamentalmente se pudo contar, en el presente estudio, con información desde enero de 2004 en adelante, precisamente desde que el tranque lo opera la empresa contratista actual.

Es importante discutir también acerca del aporte de los puntos de control utilizados en la calibración a la hora de evaluarla.

De todos los puntos de control el que tiene una importancia más sustancial es el volumen de agua en la laguna de aguas claras, pues en él se ven integrados todos los flujos del sistema.

La cantidad de agua descartada mediante riego, como se puede ver en la Figura 5.3, es una de las principales salidas del sistema.

El volumen de agua recuperada desde la laguna de aguas claras tiene también una gran importancia, debido que se obtiene de aplicar la ecuación de continuidad en el canal de contorno y por ende controla que las consideraciones realizadas para ese elemento sean adecuadas, en particular, en conjunto con el volumen de descarte por riego, una buena calibración del volumen de agua recuperada desde la laguna de aguas claras implica que se han considerado correctamente las infiltraciones desde el canal.

La superficie del espejo de aguas de la laguna de aguas claras, incide en la precipitación incidente, que no es un flujo tan importante pero tampoco es despreciable,

además de la evaporación desde la misma superficie, que como se ve en la Figura 5.3, es una salida importante del sistema.

La superficie de las lamas expuestas incide de la misma manera que la anterior, también se puede considerar como un punto de control para el balance de los sólidos pero el balance de los sólidos queda mejor controlado por la masa de sólidos depositados en las lamas, su volumen y el volumen total del muro.

De la calibración propiamente tal se considera que:

- El volumen de la laguna de aguas claras se reproduce adecuadamente a partir de mayo de 2002, existiendo coincidencia en las tendencias de los valores observados y los valores simulados y sin evidenciarse un sesgo claro de sobreestimar o subestimar los valores. Las diferencias también son pequeñas en ese período. El período más importante de estimar correctamente es después de estabilizado el nivel de llenado del embalse, por que es una situación que tiende a mantenerse en el futuro. Por lo general es más difícil estimar adecuadamente el período en que el embalse se ha llenado.
- La calibración obtenida para el volumen recuperado desde la laguna de aguas claras es adecuada tanto a nivel de tendencias como a nivel de las diferencias en todo el período donde se contó con información para calibrar que fue desde noviembre de 2.004.
- La superficie de la laguna de aguas claras no se consigue reproducir del todo bien, especialmente hasta enero de 2002 y desde octubre de 2003, aunque las tendencias son acertadas en el período total. Es importante notar que las diferencias aparecidas son las mismas que se cometieron al estimar la función auxiliar con que se calcula (ver punto 4.1.4)
- Respecto del balance de sólidos, se aprecia tanto en la Figura 4.20 como en la Figura 4.21 y la Figura 4.23, que se consiguió un buen ajuste en todo el período, evidenciándose un pequeño sesgo de estimar como mayor el aporte de sólidos a las lamas y menor al muro, a partir de marzo de 2002 aproximadamente. Dicho sesgo no se traduce en grandes diferencias al final del período, considerando que como se van aumentando los valores las diferencias tienden a agrandarse con el paso del tiempo.
- Respecto de la superficie de las lamas expuestas, se considera que se ajustaron razonablemente bien en el período en que se pudo comparar, evidenciándose un sesgo a subestimarlas. Se hace notar que ésta se calcula mediante una función que es decreciente con la superficie del espejo de agua de la laguna de aguas claras, por lo que probablemente el error se esté arrastrando desde la estimación de dicha superficie, que justamente en ese período se sobreestimó.

Es importante notar que el modelo está implementado de tal forma que se puede cambiar la función con que se calcula la superficie de la laguna de aguas claras, que según el análisis recién expuesto es el punto más deficiente del modelo, sin alterar el

diagrama de flujo o en caso de la nueva función depender de otras variables, hacer sencilla la modificación.

También es importante hacer notar que la mejor aproximación se consiguió en el período donde se contó con la mayor cantidad de información certera (ver Tabla 4.6), lo que reafirma la importancia de contar con la más completa información con tal de desarrollar un mejor modelo.

Durante el proceso de calibración se verificó la concentración de sólidos en peso de la alimentación a la batería de ciclones, que se utilizó como parámetro al no medirse actualmente, resulta determinante en los resultados obtenidos.

Un asunto que llamó la atención durante la realización del trabajo, es que actualmente no se toman muestras periódicas de los relaves depositados para ensayarlos en laboratorio. El argumento principal es la complejidad que se presenta al tomar las muestras, debido a las limitaciones impuestas por las características del depósito, al que no es posible adentrarse demasiado. En la actualidad existe tecnología que permite integrar el control de muchos parámetros de un tranque y también que permite recolectar muestras de relaves. La utilización de un aerodeslizador permite recolectar muestras de relaves en el contorno de la laguna a la vez de servir para realizar la batimetría, entre otras aplicaciones (Engels, J. et al , 2006).

## 6.2 Conclusiones

Se logró implementar un modelo bien calibrado, que reproduce de buena manera los procesos involucrados en el balance superficial de aguas del tranque.

La calidad y cantidad de la información que se utilice para desarrollar un modelo resulta fundamental en el resultado final que se obtenga, lo que aquí probablemente se ha visto reflejado en los resultados de la calibración, al tenerse mejores resultados en los períodos con más y mejor información.

Es de suma importancia que la elaboración de un modelo debe realizarse rigurosamente, documentando todos los pasos de cálculo, todas las consideraciones realizadas y el algoritmo de solución a través de un diagrama de flujo, de modo de que éste se pueda reproducir y revisar.

Los procesos de verificación y calibración deben realizarse de manera concienzuda por el modelador, sobre todo el proceso de verificación, que aunque no se evidencia en los resultados, es importantísimo en la validez del modelo. No se debe escatimar en el tiempo que se le dedica a la verificación y se debe abandonar sólo una vez de que se tenga el convencimiento de que el modelo funciona adecuadamente.

De los resultados se puede concluir que durante la operación del tranque de relaves Ovejería, se ha estado infiltrando un caudal promedio cercano a los 215 l/s en total, tomando en cuenta tanto las infiltraciones desde la cubeta como las que se producen desde el canal de contorno.

La demanda de agua para el transporte de la pulpa se estima que es cercana a los 9,5 l/s por cada KTPD de mineral extraído, manteniéndose constante con los aumentos de producción. El caudal anterior corresponde a los derechos de agua totales que se requieren para la operación del tranque, consuntivos y no consuntivos.

Los derechos de carácter consuntivo que necesita tener la DAND son de entre 5,5 y 6 l/s por cada KTPD de mineral extraído. Se constata que este valor disminuye levemente con el aumento de la producción de mineral.

Se estima que el agua que libera de las lamas debido a la sedimentación previa a la consolidación es aproximadamente del 50%.

La entrada de agua más importante al sistema del tranque de relaves Ovejería corresponde al agua utilizada en el transporte de los relaves. En importancia la sigue el agua recuperada desde las sentinas, pero muy por debajo del aporte antes mencionado. El aporte de agua por precipitación incidente es un aporte que aumenta en el tiempo y también con el aumento de la producción, pudiendo llegar a ser un aporte significativo.

En la situación actual la salida más importante es el agua que se descarta por riego y que es evapotranspirada por las especies forestadas. Las infiltraciones son también una salida importante (agregadas son la mayor).

### 6.3 Recomendaciones

Se recomienda:

- Medir, registrar y documentar ordenadamente todos los flujos importantes que no se están midiendo. Registrar y documentar ordenadamente los flujos que actualmente se miden. Flujos importantes que no se miden actualmente son: Alimentación, underflow y overflow de la batería de ciclones, depositación de relaves antes de la separación, descarte de crecidas mediante la torre de evacuación y evacuación de tormentas hacia el embalse Huechún mediante el canal de contorno.
- Medir, registrar y documentar ordenadamente la concentración de sólidos en peso de la alimentación a la batería de ciclones.
- Realizar ensayos periódicos de diverso tipo (granulometría, consolidación, etc.) y en distintas zonas y profundidades a las lamas depositadas.
- Realizar obras para disminuir la infiltración desde la cubeta y el canal de contorno, como por ejemplo: Disponer una parte de las lamas desde diversos puntos el norte de la cubeta y revestir completamente el canal de contorno con un material impermeable como el HDP.
- Implementar nueva tecnología para el control de los parámetros del tranque, por ejemplo la utilización de aerodeslizadores.
- Reutilizar toda el agua disponible en el tranque para el proceso minero.
- Exigir explícitamente en el contrato que los modelos se entreguen adecuadamente descritos por los consultores.
- Continuar desarrollando modelos propios, una alternativa es ofreciendo más temas de memoria, tendientes a modelar de la manera mas completa los procesos acontecidos en el tranque.

## REFERENCIAS

1. Ayala y Cabrera Ingenieros Consultores, 2000. "Modelo de Simulación Hidrológico Operacional Cuencas de los Ríos Maipo y Mapocho". Para Dirección General de Aguas.
2. ASTM, 2004. D 2435. "Standard Test Methods for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils Using Incremental Loading".
3. Chow, Ven Te, 1994. "Hidrología Aplicada".
4. CODELCO – CHILE, División Andina, Ingeniería ATC-MN Ltda. "Ingeniería de Perfil Transporte y Disposición de Relaves Espesados. Balance Hídrico del Tranque Ovejería".
5. CODELCO – CHILE, División Andina, REG Estudios de Ingeniería Ltda. "Modelación del Crecimiento del tranque de relaves Ovejería de CODELCO – CHILE".
6. CODELCO – CHILE, División Andina. "Manual de Operaciones. Manejo de Aguas Embalse Tranque Ovejería".
7. CODELCO – CHILE, División Andina. "Servicio Integral de Operación del Sistema de Depositación de Relaves en División Andina. Bases Técnicas".
8. CODELCO – CHILE, División Andina. "Manual de Operación de la Forestación y Riego del Sistema de Depositación de Relaves en Embalse Ovejería".
9. CODELCO – CHILE, División Andina, REG Estudios de Ingeniería Ltda. "Informe Final Estudio Control de Infiltraciones, Anexo 1 Balance Hidrológico".
10. CONAMA, 2002. "Propuesta para Regular las Emisiones de Riles desde Depósitos de Relaves".
11. CONIC-BF Ingenieros Consultores, 2007. "Bases para la Formulación de un Plan Director para la Gestión de los Recursos Hídricos Cuenca del Río Maipo". Para Dirección General de Aguas
12. Dirección General de Aguas, Departamento de Administración de Recursos Hídricos, 2002. "Evaluación de Recursos Subterráneos de la Cuenca del Río Aconcagua".
13. Dirección General de Aguas, 2004. "Diagnóstico y Clasificación de los Cursos y Cuerpos de Agua Según Objetivos de Calidad. Cuenca del Río Aconcagua".
14. Edwards Amparo, 2007. "Impacto de un Tranque de Relaves de la Minería del Cobre sobre el Agua Subterránea de una Región. Análisis Crítico de un Modelo de Simulación Hidrogeológico". Memoria Para Optar al Título de Ingeniero Civil. Universidad de Chile.

- 15.Engels J, 2006. Thickened and Paste Tailings Facilities – Measuring the Surface Geometry”.
- 16.FAO, Publicación N ° 24, 1977. “Las Necesidades de Agua de los Cultivos”.
- 17.Grozescu Serban, 1996. “Large-Scale Hydraulic Testing of Low-Permeability Clays”. Tailings and Mine Waste '96. Balkema, Rotterdam.
- 18.Haase Matthias. “2D Modeling of the Consolidation of Soft Soils”.
- 19.Hubert J., 1996. “Assessment of the Performance of a Capillary Barrier”. Tailings and Mine Waste '96. Balkema, Rotterdam.
- 20.Imai G., 1981. “Experimental Studies on Sedimentation Mechanism and Sediment Formation of Clay Material, Soils and Foundations”. Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 21, N ° 1, pp. 7-20.
- 21.Krizek Raymond, 2004. “Slurries in Geotechnical Engineering”. Texas A&M University.
- 22.Lambe, T. William, 1972. “Mecánica de Suelos”. Editorial Limusa – Wiley.
- 23.Lewis R. L., 1996. “Numerical Simulation of Low-Flow Bulkheads to Reduce Uncontrolled Discharge from an Underground Copper Mine”. Tailings and Mine Waste '96. Balkema, Rotterdam.
- 24.Mlittal, H.K., 1996. “Management of Fine Tailings”. Tailings and Mine Waste '96. Balkema, Rotterdam.
- 25.Newson T, 1996. “A Field Study of the Consolidation Behavior of Saline Gold Tailings”. Tailings and Mine Waste '96. Balkema, Rotterdam.
- 26.Proskin S.A., 1996. “Field Test Evaluating Freeze-Thaw Dewatering of Fine Tailings”. Tailings and Mine Waste '96. Balkema, Rotterdam.
- 27.Stormont J.C., 1996. “Capillary Barriers for Covering Mine Wastes”. Tailings and Mine Waste '96. Balkema, Rotterdam.
- 28.Turner John, 1996. “Hydraulic Conductivity of Oil Shale Solid Waste”. Tailings and Mine Waste '96. Balkema, Rotterdam.
- 29.Verdugo Ramón, 2007. Entrevista personal.
- 30.Wickland Benjamin and Wilson Ward, 2005. “Self-weight Consolidation of Mixtures of Mine Waste Rock and Tailings”. NCR Research Press.
- 31.Wood Guillermo, 2007. Entrevista personal.
- 32.Yoshimasa Fujiyasu, 2000. “Field Investigation of Evaporation from Freshwater Tailings”. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering.



33. Yunxin Qiu and D.C. Segó, 2001. "Laboratory Properties of Mine Tailings". NCR Research Press.